

JAHRESBERICHT  
**2019**



# JAHRESBERICHT 2019

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Steinbachstraße 15  
52074 Aachen  
Telefon +49 241 8906-0  
Fax +49 241 8906-121

[info@ilt.fraunhofer.de](mailto:info@ilt.fraunhofer.de)  
[www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

*»Kompetenz, Freude an Innovation und Leidenschaft für Technologieentwicklung sind die Zutaten des Fraunhofer ILT für eine starke Partnerschaft mit unseren Kunden.«*

Prof. Constantin Häfner

#### Liebe Leserinnen und Leser,

ausgeprägtes Know-how und mitreißende Visionen sind starke Grundpfeiler, um Fortschritt zu gestalten und die Welt zu verändern. Aber sie sind nur notwendige Voraussetzungen dafür. In der Hauptsache bedarf es eines engagierten und innovativen Teams mit Einsatzbereitschaft, Mut und Hartnäckigkeit, um das Wissen in konkrete – manchmal auch ungewöhnliche – Lösungen zum Nutzen der Gesellschaft zu transferieren.

Genau hier setzen wir am Fraunhofer ILT an. Unsere Mitarbeiter spornt die tägliche Auseinandersetzung mit neuen Herausforderungen aus Wissenschaft und Industrie an. Ob es sich um neue Laserstrahlquellen im Weltraum für die Klimaforschung, den Einsatz von Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern zum Präzisionsbohren von Flugzeugtragflächen für Treibstoffeinsparungen oder um die Produktivitätssteigerung von 3D-Druckanlagen handelt, die Experten des Fraunhofer ILT loten vielfältige Möglichkeiten zur technischen Lösung der anstehenden Aufgaben aus und gehen dabei oft gänzlich neue Wege. Das ist auch der Grund, weshalb sich viele Unternehmen uns anvertrauen. Sie wissen, dass wir bei Fraunhofer kreative Ideen entwickeln und diese mit konsequentem Systems Engineering in Lösungen umsetzen.

In diesem Jahresbericht werden Sie viele konkrete Verfahrensentwicklungen und Systemlösungen finden, die wir im laufenden Jahr realisiert haben. Dabei können wir aus Gründen der Vertraulichkeit natürlich nur einen kleinen Ausschnitt unseres breiten Portfolios veröffentlichen. Wenn Sie selbst herausfordernde Aufgabenstellungen haben, dann sprechen Sie uns an. Wir lieben kurze Wege und den unmittelbaren Dialog.

Als neuer Institutsleiter des Fraunhofer ILT sehe ich meine Aufgabe darin, Rahmenbedingungen zu schaffen, die es unseren Experten ermöglichen, ihre Kreativität und ihr erprobtes Know-how mit Leidenschaft einzusetzen. Die Diversifizierung unserer Teams soll zudem neue Sichtweisen erschließen und damit unsere Innovationsfähigkeit stärken. Wir analysieren die Marktverschiebungen bei der Lasertechnologie und loten mit unseren Kunden und Partnern neue Horizonte für zukünftige Technologien aus. So können wir anspruchsvolle Aufgaben aus Wirtschaft und Gesellschaft lösen und die Wettbewerbsfähigkeit unserer Kunden ausbauen.

Um neue Potenziale für unsere Partner zu realisieren und die Zukunft zu gestalten, treiben wir Themen wie die Digitalisierung in der Produktion und den Einsatz von Künstlicher Intelligenz voran. Die Erkenntnisse lassen wir wiederum in die universitäre Lehre und Ausbildung der nächsten Generation einfließen, die dann als qualifizierte und motivierte Fachexperten und Führungskräfte den Fortschritt bei uns und in der Industrie weitertragen. Packen wir es an. Ich freue mich auf anregende Gespräche mit Ihnen.

Ihr

Prof. Dr. rer. nat. Constantin Häfner



10

FuE-HIGHLIGHTS



22

THEMENSCHWERPUNKTE



32

FORSCHUNGSERGEBNISSE



114

NETZWERKE UND CLUSTER



140

VERANSTALTUNGEN  
UND PUBLIKATIONEN

## INHALT

### DATEN UND FAKTEN

- 6 Leitbild
- 8 Das Institut im Profil
- 10 FuE-Highlights
- 12 Institutsstruktur
- 14 Das Institut in Zahlen
- 16 Auszeichnungen und Preise
- 17 Nachwuchsförderung
- 20 Alumni-Netzwerk

### THEMENSCHWERPUNKTE

- 22 Mobilität
- 24 Produktion
- 26 Digitalisierung
- 28 Gesundheit
- 30 Umwelt

### FORSCHUNGSERGEBNISSE

- 34 Laser und Optik
- 52 Lasermaterialbearbeitung
- 96 Medizintechnik und Biophotonik
- 102 Lasermesstechnik und EUV-Technologie
- 113 Zuwendungsgeber

### NETZWERKE UND CLUSTER

- 115 Die Fraunhofer-Gesellschaft auf einen Blick
- 116 Fraunhofer-Verbund »Light & Surfaces«
- 118 Strategische Fraunhofer-Projekte
- 120 Fraunhofer-Allianzen und Leistungszentren
- 122 Fraunhofer Cluster of Excellence
- 124 Lasertechnik an der RWTH Aachen University
- 127 Digital Photonic Production DPP
- 128 RWTH Aachen Campus
- 129 Cluster Photonik
- 132 Forschungscampus DPP
- 134 Ausgründungen
- 136 Standortinitiativen
- 138 Kooperationen und Verbände
- 139 Arbeitskreis Lasertechnik AKL e.V.

### VERANSTALTUNGEN UND PUBLIKATIONEN

- 141 Patente
- 144 Dissertationen
- 145 Veranstaltungen
- 148 Aix-Laser-People
- 149 Kolloquium Lasertechnik
- 149 Messen
- 152 Kundenreferenzen
- 153 Impressum

Eine Liste der wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Vorträge sowie Bachelor- und Masterarbeiten finden Sie online in unserer Mediathek unter:  
[www.ilt.fraunhofer.de/de/mediathek.html](http://www.ilt.fraunhofer.de/de/mediathek.html)

## LEITBILD

### MISSION

Wir nehmen beim Transfer der Lasertechnik für die Nutzung in der Wirtschaft eine internationale Spitzenposition ein. Wir erweitern Wissen und Know-how unserer Branche, initiieren Zukunftstrends und tragen so maßgeblich zur Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik bei.

### KUNDEN

Wir arbeiten kundenorientiert. Diskretion, Fairness und Partnerschaftlichkeit haben für uns im Umgang mit unseren Kunden oberste Priorität. Entsprechend der Anforderung und Erwartung unserer Kunden erarbeiten wir Lösungen und deren wirtschaftliche Umsetzung. Wir wollen, dass unsere Kunden zufrieden sind und gerne wiederkommen.

### CHANCEN

Konzentriert auf Kernkompetenzen erweitern wir systematisch unser Wissen. Wir bauen unser Netzwerk bestehend aus industriellen und institutionellen Partnern mit sich ergänzenden Leistungen aus und realisieren strategische Kooperationen. Wir agieren verstärkt auf internationalen Märkten.

### FASZINATION LASER

Wir sind fasziniert von den einzigartigen Eigenschaften des Laserlichts und der daraus resultierenden Vielseitigkeit der Anwendungen. Uns begeistert die Möglichkeit, durch technologische Spitzenleistungen und erstmalige industrielle Umsetzung internationale Maßstäbe zu setzen.

### MITARBEITER

Das Zusammenwirken von Individuum und Team ist Basis unseres Erfolgs. Jeder von uns arbeitet eigenverantwortlich, kreativ und zielorientiert. Dabei gehen wir sorgfältig, zuverlässig und ressourcenbewusst vor. Wir bringen unsere individuellen Stärken in das Team ein und gehen respektvoll und fair miteinander um. Wir arbeiten interdisziplinär zusammen.

### STÄRKEN

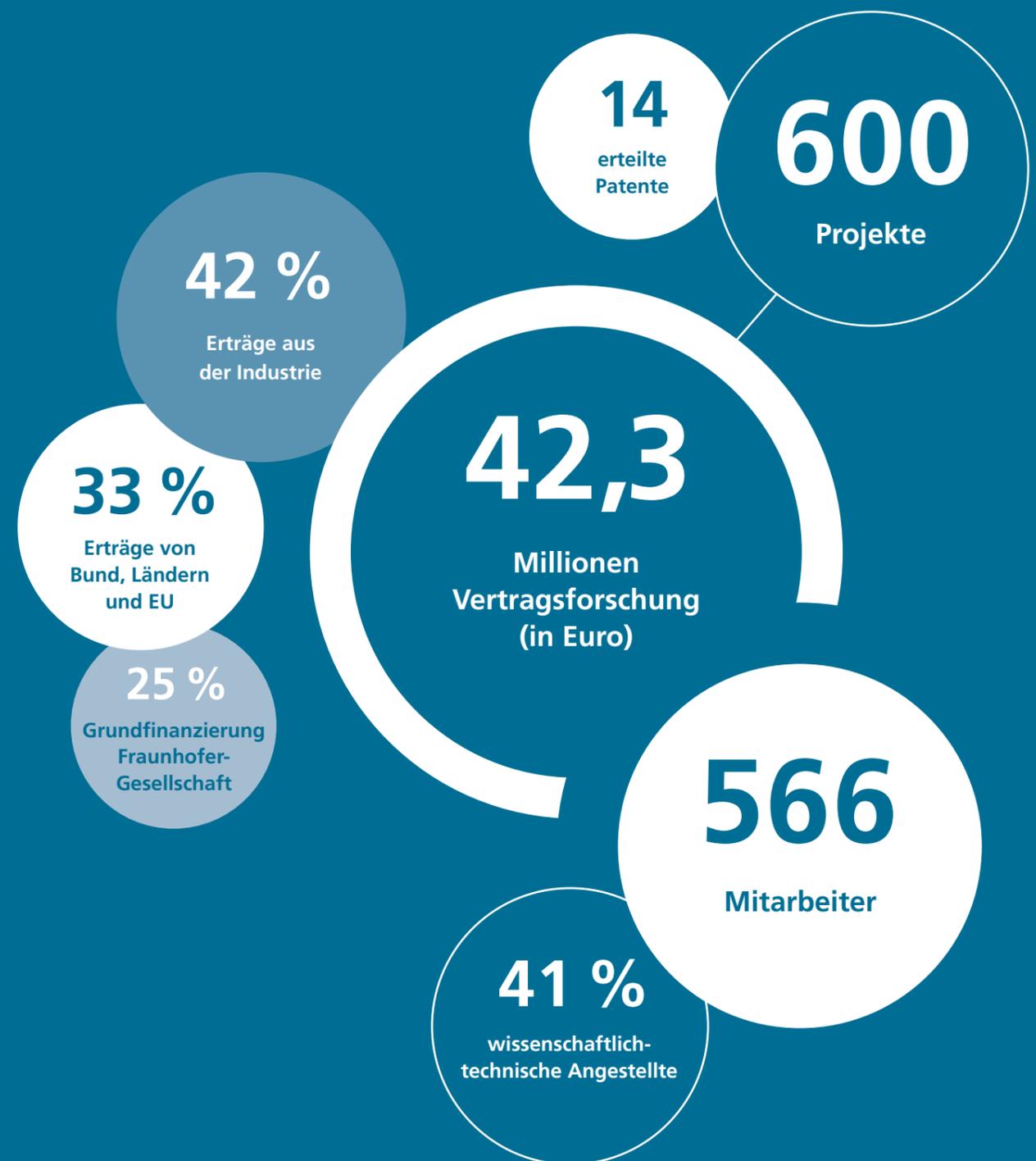
Wir haben ein breites Spektrum an Ressourcen. Wir liefern innovative und wirtschaftliche Lösungen und bieten FuE, Beratung und Integration aus einer Hand. Wir arbeiten auf der Basis eines zertifizierten Qualitätsmanagementsystems.

### FÜHRUNGSSTIL

Kooperativ, fordernd und fördernd. Die Wertschätzung unserer Mitarbeiter als Person, ihres Know-hows und ihres Engagements ist die Basis unserer Führung. Wir binden unsere Mitarbeiter in die Erarbeitung von Zielen und in Entscheidungsprozesse ein. Wir legen Wert auf effektive Kommunikation, zielgerichtete und effiziente Arbeit und klare Entscheidungen.

### POSITION

Unsere Kompetenzen erstrecken sich entlang der Kette Strahlquelle, Bearbeitungs- und Messverfahren über die Anwendung bis hin zur Integration einer Anlage in die Produktionslinie des Kunden. Wir arbeiten in einem dynamischen Gleichgewicht zwischen anwendungsorientierter Grundlagenforschung und Entwicklung. Wir wirken aktiv an der Formulierung und Gestaltung forschungspolitischer Ziele mit.



# DAS INSTITUT IM PROFIL



## KURZPORTRAIT

ILT – dieses Kürzel steht seit mehr als 30 Jahren für gebündeltes Know-how im Bereich Lasertechnik. Innovative Lösungen von Fertigungs- und Produktionsaufgaben, Entwicklung neuer technischer Komponenten, kompetente Beratung und Ausbildung, hochspezialisiertes Personal, neuester Stand der Technik sowie internationale Referenzen: dies sind die Garantien für langfristige Partnerschaften. Die zahlreichen Kunden des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT stammen aus Branchen wie dem Automobil- und Maschinenbau, der Chemie und der Elektrotechnik, dem Flugzeugbau, der Feinmechanik, der Medizintechnik und der Optik. Mit rund 570 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie mehr als 19.500 m<sup>2</sup> Nettogrundfläche zählt das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT weltweit zu den bedeutendsten Auftragsforschungs- und Entwicklungsinstituten seines Fachgebiets.

Die vier Technologiefelder des Fraunhofer ILT decken ein weites Themenspektrum in der Lasertechnik ab. Im Technologiefeld »Laser und Optik« entwickeln wir maßgeschneiderte Strahlquellen sowie optische Komponenten und Systeme. Das Spektrum reicht von Freiformoptiken über Dioden- und Festkörperlaser bis hin zu Faser- und Ultrakurzpulslasern. Neben der Entwicklung, Fertigung und Integration von Komponenten und Systemen befassen wir uns auch mit Optikdesign, Modellierung und Packaging. Aufgabenstellungen zum Schneiden, Abtragen, Bohren, Reinigen, Schweißen, Lötten, Beschriften sowie zur Oberflächenbearbeitung und Mikrofertigung lösen wir im Technologiefeld »Lasermaterialbearbeitung«. Im Vordergrund stehen Verfahrensentwicklung und Systemtechnik. Dies schließt Maschinen- und Steuerungstechnik genauso ein wie Prozess- und Strahlüberwachung sowie Modellierung und Simulation. Experten des Technologiefelds »Medizintechnik und Biophotonik« erschließen gemeinsam mit Partnern aus den Lebenswissenschaften neue Anwendungen des Lasers

in der Bioanalytik, der Lasermikroskopie, der klinischen Diagnostik, der Lasertherapie, der Biofunktionalisierung und der Biofabrication. Auch die Entwicklung und Fertigung von Implantaten, mikrochirurgischen und mikrofluidischen Systemen und Komponenten zählen zu den Kernaktivitäten. Im Technologiefeld »Lasermesstechnik und EUV-Technologie« entwickeln wir für unsere Kunden Verfahren und Systeme zur Inline-Messung physikalischer und chemischer Größen in einer Prozesslinie. Neben der Fertigungsmesstechnik und der Materialanalytik liegen Umwelt und Sicherheit sowie Recycling und Rohstoffe im Fokus der Auftragsforschung. Mit der EUV-Technologie stoßen wir in die Submikrometerwelt der Halbleitertechnik und Biologie vor.

Unter einem Dach bietet das Fraunhofer ILT Forschung und Entwicklung, Systemaufbau und Qualitätssicherung, Beratung und Ausbildung. Zur Bearbeitung der Forschungs- und Entwicklungsaufträge stehen zahlreiche industrielle Lasersysteme verschiedener Hersteller sowie eine umfangreiche Infrastruktur zur Verfügung. Im angrenzenden Forschungscampus »Digital Photonic Production DPP« arbeiten mit dem Fraunhofer ILT kooperierende Unternehmen in eigenen Labors und Büroräumen. Grundlage für diese spezielle Form des Technologietransfers ist ein langfristiger Kooperationsvertrag mit dem Institut im Bereich der Forschung und Entwicklung. Der Mehrwert liegt in der Nutzung der technischen Infrastruktur und dem Informationsaustausch mit Experten des Fraunhofer ILT. Rund 20 Unternehmen nutzen diese Vorteile bereits. Neben etablierten Laserherstellern und innovativen Laseranwendern finden hier Neugründer aus dem Bereich des Sonderanlagenbaus, der Laserfertigungstechnik und der Lasermesstechnik ein geeignetes Umfeld zur industriellen Umsetzung ihrer Ideen.



DQS zertifiziert nach  
DIN EN ISO 9001  
Reg.-Nr.: DE-69572-01

## UNSER ANGEBOT

### Leistungsspektrum des Fraunhofer ILT

- Laserstrahlquellenentwicklung
- Komponenten und Systeme zur Strahlführung und -formung
- Packaging optischer Hochleistungskomponenten
- Modellierung und Simulation von optischen Komponenten sowie lasertechnischen Verfahren
- Verfahrensentwicklung für die Lasermaterialbearbeitung, die Lasermesstechnik, die Medizintechnik und die Biophotonik
- Prozessüberwachung und -regelung
- Muster- und Testserien
- Entwicklung, Aufbau und Test von Pilotanlagen
- Integration von Lasertechnik in bestehende Produktionsanlagen oder Messsysteme
- Entwicklung von Röntgen-, EUV- und Plasmasystemen

## KOOPERATIONEN

### Kooperationen des Fraunhofer ILT mit FuE-Partnern

- Durchführung von bilateralen, firmenspezifischen FuE-Projekten mit und ohne öffentliche Unterstützung (Werkvertrag)
- Beteiligung von Firmen an öffentlich geförderten Verbundprojekten (Mitfinanzierungsvertrag)
- Übernahme von Test-, Null- und Vorserienproduktion durch das Fraunhofer ILT zur Ermittlung der Verfahrenssicherheit und zur Minimierung des Anlauftrisikos (Werkvertrag)
- Firmen mit Niederlassungen auf dem Campusgelände der RWTH Aachen University und Kooperationen über den Forschungscampus Digital Photonic Production DPP

## NEUER INSTITUTSLEITER

Seit November 2019 ist Prof. Dr. rer. nat. Constantin Häfner neuer Institutsleiter des Fraunhofer ILT. Parallel zu dieser Position hat er auch die Leitung des assoziierten Lehrstuhls für Lasertechnik LLT an der RWTH Aachen University übernommen. Als Hochschullehrer bringt sich Prof. Häfner in die vielfältigen Aktivitäten der RWTH Aachen University ein. Dazu gehören die interdisziplinären Forschungsarbeiten 16 verschiedener RWTH-Institute innerhalb des Research Center for Digital Photonic Production RCDPP sowie die strategischen Kooperationen mit der Industrie im Rahmen des Forschungscampus Digital Photonic Production DPP.

Prof. Constantin Häfner hat Physik in Konstanz studiert und wurde danach an der Universität Heidelberg im Fach Physik promoviert. 2004 wechselte er in die USA, zuerst an die Nevada Terawatt Facility der University of Nevada, Reno, und ab 2006 an das Lawrence Livermore National Laboratory in Livermore, Kalifornien. Dort leitete er als Direktor des Programms »Advanced Photon Technologies« die Entwicklung der weltweit leistungsfähigsten Lasersysteme und die Erforschung und Entwicklung zukunftsweisender Lasertechnologien.



**Prof. Constantin Häfner**  
Telefon +49 241 8906-110  
constantin.haefner@ilt.fraunhofer.de

# HIGHLIGHTS



Beschichtung einer Bremscheibe mit EHLA.



Gedruckte und laserfunktionalisierte Dehnungsmesssensoren auf Polymerfolien.



Verzweigte Mikroröhren ebenso wie komplette Mikrofluidiksysteme für die biomedizinische Analysetechnik.

## FuE-HIGHLIGHTS 2019

### Laserverfahren für funktionsintegrierte Composites

Composites vereinen die Vorteile artungleicher Materialien und bergen somit ein großes Potenzial für die Herstellung von Bauteilen mit speziellen Anforderungen, beispielsweise für den Leichtbau. Für die effiziente Herstellung und Bearbeitung von Verbundmaterialien bietet die Lasertechnik ein breites Spektrum an Verfahren wie Fügen und Trennen oder Oberflächenstrukturierung.

Bei der Herstellung von Hybridverbindungen aus Kunststoff und Metall müssen die Metalloberflächen zunächst vorbereitet werden. Dabei kommen z. B. die Mikrostrukturierung per cw-Laser oder die Mikro- beziehungsweise Nanostrukturierung mit Ultrakurzpuls-Laser (UKP) infrage. Ein single-mode-Faserlaser (mit 1064 nm Wellenlänge) bringt mit Flächenraten von bis zu 1000 mm<sup>2</sup> pro Sekunde präzise Hinterschnitte in die Bauteiloberfläche ein, die sich im späteren Spritzgussverfahren mit Kunststoff ausfüllen lassen. Mit glasfaserverstärktem Kunststoff wurden Hybridverbindungen mit hohen Zugschereigenschaften bis zu 22,4 MPa realisiert – die Bauteile sind extrem leicht und gleichzeitig hochbelastbar.

### Mit Laserlicht zur gedruckten Elektronikvielfalt

Die Integration von Elektronik in Bauteile lässt sich mit dem 3D-Druck realisieren. Damit sich Bauteile für die Integration einer elektrischen Funktion optimal bedrucken lassen, kommen nasse Beschichtungsverfahren wie Tintenstrahl-, Tampon- oder Dispensdruck zum Einsatz. Sie benötigen eine Wärmenachbehandlung, die konventionell beispielsweise in einem Ofen geschieht. Der Einsatz des Lasers bietet hier eine Alternative, die wesentlich schneller und zielgerichteter

arbeitet: Zunächst wird mit dem Laserstrahl die Schicht getrocknet. Übrig bleiben nur noch die sogenannten Funktionspartikel zum Beispiel aus Silber oder Gold. Der Laser schmilzt diese Mikro- beziehungsweise Nanopartikel anschließend teilweise oder vollständig auf und verbindet sie so miteinander, dass sie Strom leiten können.

Im Fraunhofer-Leitprojekt »Go Beyond 4.0« wurde das Aufbringen von elektronischen Funktionsschichten auf Bauteile u. a. aus dem Bereich Automotive gezeigt. In Fahrzeugen wird sehr viel Elektronik eingebaut – von der Scheibenwischersteuerung über das Kameramodul in der Stoßstange bis hin zu moderner Sensorik. Mit der neuen Technologie können auf Massenbauteilen wie Türen Signal- und Stromleitungen für unterschiedliche Ausstattungsoptionen automatisch, direkt und individuell aufgebracht werden.

### Funktionale Dünnschichtstrukturen für integrierte Radarsensoren

Im Verbundprojekt RadarGlass wurde ein Schichtsystem entwickelt, das die Integration von Radarsensoren in PKW-Frontscheinwerfer ermöglicht – ein Meilenstein für das autonome Fahren. Bei Radarsensoren bietet es sich an, diese in die Frontscheinwerfer des Fahrzeugs einzubauen. Um den Radarstrahl zu lenken und zu formen, müssen kleine Elemente der Beschichtung präzise strukturiert werden, sodass diese als Antennen für die Radarwellen fungieren können. Dazu wurde am Fraunhofer ILT ein Laserprozess zur Erzeugung der Antennenelemente entwickelt. Die lasergefertigten Strukturen sind mit einer Auflösung von bis zu 10 µm viel präziser als solche, die mit herkömmlichen Druckverfahren hergestellt wurden. Alternative Verfahren wie z. B. Lithographie lassen sich nicht für die komplexen 3D-Oberflächen von Scheinwerferabdeckungen nutzen. Zudem erfordern konventionelle Verfahren eine aufwändige Prozesskette. Zwei Hindernisse, die durch das neue laserbasierte Verfahren überwunden werden.

### Neue Stahlwerkstoffe für den 3D-Druck

Geeignete qualifizierte und zertifizierte Werkstoffe für das Laser Powder Bed Fusion (LPBF), mit denen sich prozesssicher Bauteile ohne Bildung von Rissen und Defekten additiv fertigen lassen, stehen entweder gar nicht oder noch nicht im geforderten Maße für die industrielle Fertigung zur Verfügung. Das NRW-Leitmarktprojekt AddSteel hat es sich daher zum Ziel gesetzt, die Digitalisierung der Stahlbranche und die Entwicklung neuer funktionsangepasster Stahlwerkstoffe für den LPBF-Prozess voranzutreiben. Zentraler Bestandteil ist dabei die Qualifizierung der entwickelten Werkstoffe für den metallischen 3D-Druck am Fraunhofer ILT.

Die Projektpartner setzen in AddSteel auf eine iterative Legierungsentwicklung in Kombination mit einer systematischen Anpassung der LPBF-Prozessführung und -Anlagentechnik. Anschließend folgt der Bau von Demonstratoren für die Herstellung von neuen Komponenten und Ersatzteilen, mit denen die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit getestet und validiert werden.

### Polymerstrukturen schneller produzieren – zwei Verfahren in einer Maschine

Die Kombination von Stereolithographie und Multiphotonen-Polymerisation soll die schnelle und präzise Herstellung feinsten Polymerstrukturen möglich machen: Wissenschaftler des Fraunhofer ILT entwickeln im EFRE-Projekt HoPro-3D eine Maschine für hochpräzise, wirtschaftliche 3D-Aufbautechniken, die beide Verfahren nutzt. Die UV-Polymerisation auf Basis der Stereolithographie (SLA) oder des Digital Light Processing (DLP) sowie die Multiphotonenpolymerisation (MPP) im mikroskopischen Maßstab sind zwei separate Verfahren zur Erzeugung makroskopischer Polymerstrukturen mit Auflösung bis in den Submikrometerbereich. Die Projektpartner kombinieren nun das DLP-gestützte Verfahren mit dem MPP-Verfahren und

entwickeln eine Maschine mit zwei wählbaren Belichtungssystemen für entweder hohe Aufbauraten oder hohe Präzision. Sie nutzen Hochleistungs-LEDs mit einer Wellenlänge von 365 nm und einen DLP-Chip mit HD-Auflösung für die Lithographie. Für das MPP-Modul wird ein Femtosekundenlaser mit einem schnellen Scanner und Mikroskopoptik eingesetzt.

Die Anwendungsbereiche sind vielfältig. Zur Herstellung von Bauteilen für die biomedizinische Analysetechnik dürfte die Maschine am interessantesten sein. Stützgerüste für 3D-Gewebemodelle (scaffolds), mikromechanische Bauteile oder komplette Mikrofluidiksysteme sind typische Anwendungsbeispiele.

### Bremscheiben effektiv schützen mit EHLA

Zu den am stärksten beanspruchten Teilen eines Autos gehören Bremscheiben. Das Extreme Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) eignet sich besonders für die Automobilindustrie, z. B. für die Beschichtung von Bremscheiben, die bisher wegen der großen Belastungen und hohen Anforderungen an Wirtschaftlichkeit sowie Umweltfreundlichkeit nur schwierig beschichtet werden konnten. Beim EHLA-Verfahren werden die Pulverpartikel des Beschichtungswerkstoffs direkt im Laserstrahl aufgeschmolzen und nicht erst im Schmelzbad auf der Oberfläche des Bauteils. Dadurch kann die Prozessgeschwindigkeit von bisher 0,5 bis 2 m/min beim herkömmlichen Laserauftragschweißen um mehrere Größenordnungen auf bis zu 500 m/min gesteigert werden. Die große Prozessgeschwindigkeit führt dazu, dass die Wärme in das zu beschichtende Material nur bis in den Mikrometerbereich thermisch eindringt und sich dadurch der Kohlenstoff aus der Bremscheibe nicht in der Schmelze löst. So werden spröde Phasen, Poren, Bindefehler und Risse in der Beschichtung bzw. der Anbindungszone vermieden. Damit können Bremscheiben aus Grauguss erstmalig effektiv mit stoffschlüssig angebundenen Schichten geschützt werden.

# INSTITUTSSTRUKTUR



Kuratoriumssitzung 2019 im Fraunhofer ILT.

## INSTITUTSLEITUNG



**Prof. Constantin Häfner**  
Institutsleiter (ab 1.10.2019)



**Prof. Reinhart Poprawe**  
Institutsleiter (bis 30.9.2019)



**Prof. Peter Loosen**  
Stellvertretender Institutsleiter



**Dr. Vasvija Alagic-Keller MBA**  
Kaufmännische Direktorin

## VERWALTUNG UND STABSTELLEN



**Dr. Vasvija Alagic-Keller MBA**  
Verwaltung und Infrastruktur



**Dipl.-Phys. Axel Bauer**  
Marketing und Kommunikation



**Dr. Alexander Drenker**  
Qualitätsmanagement



**Dr. Bruno Weikl**  
IT-Management

## KOMPETENZFELDER



**Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hoffmann**  
Laser und Laseroptik



**Dr. Arnold Gillner**  
Abtragen und Fügen



**Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum**  
Generative Verfahren  
und funktionale Schichten



**Prof. Reinhard Noll**  
Messtechnik und EUV-Strahlquellen

## KURATORIUM UND GREMIEN

### KURATORIUM

Das Kuratorium berät die Organe der Fraunhofer-Gesellschaft sowie die Institutsleitung und fördert die Verbindung zu den an Forschungsarbeiten des Instituts interessierten Kreisen. Mitglieder des Kuratoriums waren im Berichtszeitraum:

### VORSITZENDER

Carl F. Baasel, ROFIN-BAASEL Lasertech GmbH & Co. KG

### MITGLIEDER

- Dr. Reinhold E. Achatz, thyssenkrupp AG
- Dr. Norbert Arndt, Rolls-Royce plc.
- Dipl.-Ing. Frank C. Herzog, HZG Management GmbH & Co. KG
- Dipl.-Ing. Volker Krause, Laserline GmbH
- Dipl.-Ing. Michael Lebrecht, Daimler AG
- Prof. Gerd Marowsky, Photonik Inkubator GmbH
- Manfred Nettekoven, Kanzler der RWTH Aachen University
- Dr. Joseph Pankert, TRUMPF Photonics Components GmbH
- Dr. Silke Pflueger
- Dr. Torsten Scheller, JENOPTIK Automatisierungstechnik GmbH
- Susanne Schneider-Salomon, Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes NRW
- Dr. Ulrich Steegmüller, OSRAM Opto Semiconductors GmbH
- Dr. Klaus Wallmeroth, TRUMPF Laser GmbH + Co. KG

Die 34. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 18. September 2019 im Fraunhofer ILT in Aachen statt.

### INSTITUTSLEITUNGS-AUSSCHUSS ILA

Der Institutsleitungsausschuss ILA berät die Institutsleitung und wirkt bei der Entscheidungsfindung über die Grundzüge der Forschungs- und Geschäftspolitik des Instituts mit. Mitglieder des ILA sind: Prof. R. Poprawe (bis 30.9.2019), Prof. C. Häfner (ab 1.10.2019), Prof. P. Loosen, Dr. V. Alagic-Keller, Peter Abels (ab 1.11.2019), A. Bauer, T. Biermann, D. Esser, Dr. A. Gillner, H.-D. Hoffmann, V. Nazery Goneghany (bis 31.10.2019), Prof. R. Noll, Dr. D. Petring, Prof. J. H. Schleifenbaum, Prof. W. Schulz, Dr. B. Weikl, Dr. J. Stollenwerk.

### ARBEITSSCHUTZ-AUSSCHUSS ASA

Der Arbeitsschutzausschuss ASA ist für die Lasersicherheit und alle anderen sicherheitstechnischen Fragen im Fraunhofer ILT zuständig. Mitglieder des Ausschusses sind: Prof. R. Poprawe (bis 30.9.2019), Prof. C. Häfner (ab 1.10.2019), Prof. P. Loosen, Dr. V. Alagic-Keller, A. Bauer, M. Brankers, R. Day, W. Fiedler, R. Frömbgen, A. Hajdarovic, S. Jung, D. Maischner, V. Nazery Goneghany, B. Quilitzsch, M. F. Steiner, F. Voigt, T. Yildirim, Dr. R. Keul (Betriebsarzt B.A.D), J. Pohl, S. Schoenen, (B.A.D Gesundheitsvorsorge und Sicherheitstechnik GmbH).

### WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER RAT WTR

Der Wissenschaftlich-Technische Rat WTR der Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt und berät die Organe der Gesellschaft in wissenschaftlich-technischen Fragen von grundsätzlicher Bedeutung. Ihm gehören die Mitglieder der Institutsleitungen und je Institut ein gewählter Vertreter der wissenschaftlich-technischen Mitarbeiter an. Mitglieder im Wissenschaftlich-Technischen Rat sind: Prof. R. Poprawe (bis 30.9.2019), Prof. C. Häfner (ab 1.10.2019), D. Esser.

### BETRIEBSRAT

Seit März 2003 gibt es am Fraunhofer ILT einen Betriebsrat.

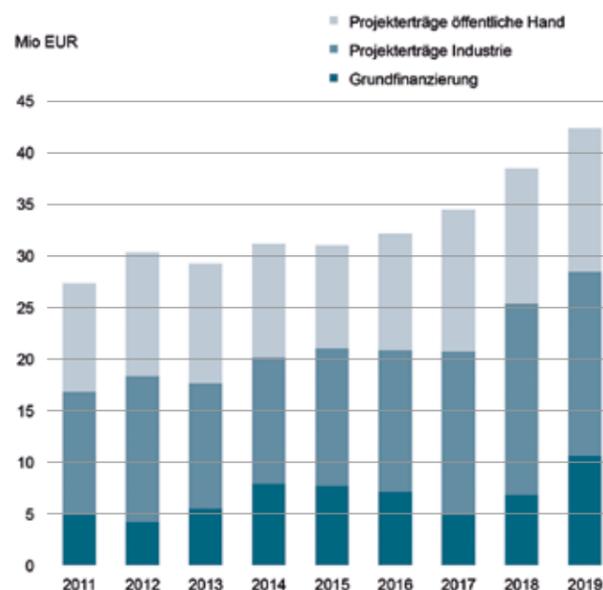
# DAS INSTITUT IN ZAHLEN



PERSONAL 2019	Anzahl
<b>Stammpersonal</b>	<b>275</b>
- Wissenschaftler und Ingenieure	182
- Mitarbeiter der technischen Infrastruktur	49
- Verwaltungsangestellte	44
<b>Weitere Mitarbeiter</b>	<b>291</b>
- wissenschaftliche Hilfskräfte	282
- externe Mitarbeiter	5
- Auszubildende	4
<b>Mitarbeiter am Fraunhofer ILT, gesamt</b>	<b>566</b>

AUFWENDUNGEN 2019	Mio EUR
- Personalaufwendungen	24,2
- Sachaufwendungen	18,1
<b>Aufwendungen Betriebshaushalt</b>	<b>42,3</b>
<b>Investitionen</b>	<b>8,4</b>

ERTRÄGE 2019	Mio EUR
- Erträge aus der Industrie	17,8
- Zusatzfinanzierung durch Bund, Länder und EU	13,9
- Grundfinanzierung durch die Fraunhofer-Gesellschaft	10,6
<b>Erträge Betriebshaushalt</b>	<b>42,3</b>
<b>Investitionerträge aus der Industrie</b>	<b>0,5</b>
<b>Fraunhofer Industrie <math>\rho_{\text{Ind}}</math></b>	<b>43,2 %</b>



## AUSSTATTUNG

Die Nettogrundfläche des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT beträgt über 19.500 m<sup>2</sup>.

### TECHNISCHE INFRASTRUKTUR

Zur technischen Infrastruktur des Instituts gehören eine mechanische und eine elektronische Werkstatt, ein Metallographie- und ein Fotolabor, ein Labor für optische Messtechnik sowie eine Konstruktionsabteilung.

### WISSENSCHAFTLICHE INFRASTRUKTUR

Zur wissenschaftlichen Infrastruktur zählen u. a. Literatur- und Patentdatenbanken, Programme zur Berechnung wissenschaftlicher Fragestellungen und Datenbanken zur Prozessdokumentation sowie eine umfangreiche Fachbibliothek.

### GERÄTEAUSSTATTUNG

Die Geräteausstattung des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT wird ständig auf dem neuesten Stand der Technik gehalten. Sie umfasst derzeit als wesentliche Komponenten:

### STRAHLQUELLEN

- CO<sub>2</sub>-Laser bis 12 kW
- Scheibenlaser bis 12 kW
- Scheibenlaser mit grüner Wellenlänge
- Multimode-Faserlaser bis 6 kW
- Singlemode-Faserlaser bis 5 kW
- Diodenlaser bis 12 kW
- Kurz- und Ultrakurzpuls laser bis 1 kW mit Pulsdauern im Nano-, Piko- und Femtosekundenbereich
- Frequenzvervielfachte Laser im sichtbaren Spektralbereich
- Excimerlaser
- Breitbandig abstimmbare Laser
- MIR-Laser (ps, ns) mit mittlerer Leistung > 10 W

### ANLAGEN UND BEARBEITUNGSSYSTEME

- Dreiachsige Bearbeitungsstationen
- Fünfachsig Portalanlagen inkl. Dreh-/Kipptisch
- Robotersysteme inkl. 6-Achs-Knickarmroboter mit Drehkipptisch
- Kommerzielle Anlagentechnik und Laborsysteme für das Laser Powder Bed Fusion (LPBF)
- Direct-writing und Laser-PVD-Stationen
- Strahlführungssysteme
- Diverse Pulver- und Drahtförderer für die Additive Fertigung
- Drucker für Sol-Gele-Hybrid-Polymere und nano- bis mikroskalige Dispersionen

### SPEZIALLABORE

- Reinräume zur Montage von Dioden- und Festkörperlaser sowie Laseroptiken
- Life Science-Labor mit S1-Klassifizierung
- Batterietechniklabor
- Applikationslabor für Anwender von Hochleistungs-UKP-Lasern

### MESSTECHNIK UND SENSORIK

- Geräte zur Verfahrens- und Prozessdiagnostik sowie zur Hochgeschwindigkeits-Prozessanalyse
- Laser-Spektroskopiesysteme zur chemischen Analyse fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe
- Konfokales Laser-Scanning-Mikroskop
- Raster-Elektronen-Mikroskop
- Shack Hartmann-Sensor zur Charakterisierung von Laserstrahlen und Optiken
- Messinterferometer und Autokollimator zur Analyse von Laseroptiken
- Messequipment zur Charakterisierung von Ultrakurzpuls Lasern
- Vibrationsprüfstand
- Single-Photon-Detektor (APD) für NIR-Laser
- Systeme zur Charakterisierung von Pulverwerkstoffen
- Messsysteme zur Einzelquanten-Detektion

# AUSZEICHNUNGEN UND PREISE



Femtec Exkursion am 18. September 2019 im Fraunhofer ILT.

## CAMX AWARD 2019

### CAMX Award für Team des NRW-Projekts CarboLase

Das Team des NRW-Projekts CarboLase, zu dem auch das Fraunhofer ILT gehört, wurde am 25. September 2019 auf der »CAMX – The Composites and Advanced Materials Expo« in Anaheim, Kalifornien, USA mit dem CAMX Award ausgezeichnet. Die Wissenschaftler des Fraunhofer ILT entwickelten gemeinsam mit Wissenschaftlern der AMPHOS GmbH, der Lunovu GmbH, des Instituts für Textiltechnik der RWTH Aachen University sowie der Kohlhage Fasteners GmbH & Co. KG ein Verfahren zur kundenoptimierten Just-in-Time FVK-Bauteilfertigung mit robotergeführtem Ultrakurzpuslaser.

### Springorum-Denkmünze und Borchers-Plakette

Die Verleihung der Springorum-Denkmünzen und Borchers-Plaketten fand am 14. September 2019 im Rahmen des RWTH-Graduiertenfestes statt.

Die Springorum-Denkmünze verleiht proRWTH, der Förderverein der RWTH Aachen, Studierenden, die ihre Diplom-, Magister oder Masterprüfung mit Auszeichnung bestanden haben. Von den assoziierten Lehrstühlen des Fraunhofer ILT war 2019 Manuel Jung unter den Ausgezeichneten. Die Denkmünze geht zurück auf den Kommerzienrat Dr.-Ing. E. h. Friedrich Springorum, der 1918 die Gesellschaft von Freunden der Aachener Hochschule gründete und sie bis zum Jahre 1925 als Vorsitzender leitete.

Mit der Borchers-Plakette werden herausragende Promotionen gewürdigt. Für ihre mit Auszeichnung bestandenen Doktorprüfungen erhielten Torsten Hermanns und Stefan Janssen, beide Mitarbeiter des Fraunhofer ILT, diese Plakette. Torsten Hermanns für seine Doktorarbeit zum Thema »Interaktive Prozesssimulation für das industrielle Umfeld am Beispiel des Bohrens mit Laserstrahlung« sowie Stefan Janssen für seine Doktorarbeit zum Thema »Laserstrahlbohren von CFK-Preforms« an der Fakultät für Maschinenwesen. Namensgeber der Ehrenplakette ist der Geheimrat Professor Wilhelm Borchers, der von 1897 bis 1925 Ordinarius für Metallhüttenkunde an der Hochschule war.

### Ausgründung des Fraunhofer ILT gewinnt Start-up Challenge auf der formnext

Das Spin-off des Fraunhofer ILT, die Laser Melting Innovations GmbH & Co. KG aus Aachen, zählt zu den Gewinnern der »formnext Start-up Challenge« 2019. Die Aachener Wissenschaftler wurden am 19. November 2019 auf der formnext in Frankfurt am Main für die Entwicklung ihrer Low Cost LPBF-Maschine Alpha 140 von der Jury geehrt. Mit dieser Anlage für das Laser Powder Bed Fusion (LPBF) mit Metallpulver steht insbesondere KMUs eine industrietaugliche Low Cost-Anlage für den metallischen 3D-Druck zur Verfügung.

## NACHWUCHSFÖRDERUNG

### Girls'Day – Mädchenzukunftstag 2019

Am 28. März 2019 öffneten die drei Fraunhofer-Institute in Aachen interessierten Mädchen ab der 5. bis zur 7. Klasse ihre Türen und boten Einblicke in die tägliche Arbeit. Neben der kurzen Vorstellung der Institute und den Führungen durch die Labore und Hallen konnten die Mädchen auch selbst Experimente zu folgenden Themen durchführen:

- Impfstoff aus Tabak: Wie Pflanzen Medikamente produzieren
- Experiment: Filtern von DNA aus einer Tabakpflanze
- Operation »Fliegendes Ei« - Konstruktion eines Fluggerätes
- Experiment: Bauen eines eigenen Hologramms

### Besuch der jungen Deutschen Physikalischen Gesellschaft (jDPG) am 26. April 2019

Im Rahmen einer Exkursionswoche der jungen Deutschen Physikalischen Gesellschaft (jDPG) ermöglichte das Fraunhofer ILT 25 Physikstudierenden am 26. April 2019 einen exklusiven Institutsrundgang am Forschungsstandort Aachen. Die Teilnehmenden erhielten einen anwendungsorientierten Einblick zu den Forschungsschwerpunkten Strahlquellenentwicklung, EUV-Technologie, Lasermesstechnik und Additive Fertigung mit LPBF.

### Schüleruni Maschinenbau vom 15.–19. Juli 2019

2019 fand erneut die Schüleruni Maschinenbau mit Beteiligung des Exzellenzcluster Internet of Production IoP statt. 21 Schülerinnen und Schüler aus ganz Deutschland, aber auch aus China und der Türkei, verbrachten eine Woche an der RWTH Aachen University, um einen ersten Eindruck von dem Studiengang Maschinenbau und seinen vielfältigen Möglichkeiten zu erhalten. Durch den Besuch bei verschiedenen Instituten erhielten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer Einblicke in die Bereiche Produktionstechnik, Verfahrenstechnik, Kunststoff-, Textil- und Kraftfahrzeugtechnik sowie Optik und Lasertechnik. Neben Vorträgen und Institutsführungen konnten die Schülerinnen und Schüler auch selbst experimentieren. Am 19. Juli 2019 entdeckten sie dann die Welt der Photonik mit vielen Einblicken, wie Laserstrahlung generiert und wofür sie eingesetzt wird. Mit Hilfsmitteln wurden Laserstrahlen sichtbar gemacht und optische Phänomene im Alltag, wie die »Katakaustik in der Kaffeetasse«, erklärt. Insgesamt eröffnete die Woche den Schülerinnen und Schülern erste spannende Einblicke in das weite Feld des Maschinenbaus und darüber hinaus in die Studien- und Arbeitswirklichkeit an der RWTH Aachen University.

### Femtec Exkursion – Summerschool 2019

Am 18. September 2019 besuchten 34 MINT-begeisterte Stipendiatinnen von neun Hochschulen im Rahmen der Summerschool 2019 die Fraunhofer-Institute ILT und IPT in Aachen. Neben Informationen zu Einstiegs- und Karrieremöglichkeiten und einem Laborrundgang erhielten die Stipendiatinnen die Gelegenheit, sich mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auszutauschen und zu vernetzen.

# NACHWUCHSFÖRDERUNG



Gut besucht: »Fraunhofer-Abend« beim September Special in Aachen.



»Zurück in die Zukunft« Originalfahrzeug auf dem Aachener September Special.

## Fraunhofer-Abend am 20. September 2019 auf dem Aachener September Special

Unter dem Motto »70 Jahre Fraunhofer – 70 Jahre Zukunft #WHATSNEXT« wurde auch in Aachen, einem der größten Fraunhofer-Standorte in Deutschland, das 70-jährige Jubiläum der Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen einer großen kulturellen Veranstaltung – Aachener September Special – gefeiert.

Mit dem Aachener September Special präsentierte die Stadt Aachen an vier Tagen den Bürgerinnen und Bürgern der Städteregion Aachen sowie der angrenzenden Nachbarländer Niederlande und Belgien ein abwechslungsreiches Kulturprogramm mit vielen Live Acts auf insgesamt fünf Open-Air-Bühnen.

Im Rahmen dieses Public Events organisierte das Fraunhofer ILT, in enger Kooperation mit der RWTH Aachen University, am 20. September 2019 den »Fraunhofer-Abend« auf der RWTH-Bühne vor dem Universitätshauptgebäude. Neben einem international renommierten DJ-Set (SAMA und GERD JANSON) boten die Fraunhofer-Institute ILT und IPT ab 18.00 Uhr 1000 MINT-Studierenden die Gelegenheit, sich in lockerer Atmosphäre direkt auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand auszutauschen und über Einstiegs- und Karrieremöglichkeiten bei Fraunhofer zu informieren. Als besonderes Highlight präsentierte das Fraunhofer ILT dem begeisterten Publikum das Originalfahrzeug aus dem Film »Zurück in die Zukunft«. Moderiert wurde der Abend von der Bloggerin Lisa Ruhfus, alias »Klugscheisserin«.

## Australische Doktoranden zu Besuch

20 Doktoranden aus Melbourne haben am 27. September 2019 das Fraunhofer ILT und den Lehrstuhl für Digital Additive Production DAP der RWTH Aachen University besucht. Die Doktoranden befanden sich auf einer Studienreise unter der Leitung von Prof. Gary Bryant, Associate Dean for Higher Degree by Research, RMIT School of Science Melbourne.

## 32. bonding Firmenkontaktmesse am 7. November 2019

Zum vierten Mal in Folge präsentierte sich das Fraunhofer ILT in Aachen auf der größten studentisch organisierten Firmenkontaktmesse – der bonding. Neben 380 weiteren Ausstellern informierte das Fraunhofer ILT in persönlichen Gesprächen insbesondere Studierende und Absolventen aus den Ingenieur-, Wirtschafts- und Naturwissenschaften über Einstiegs- und Karrieremöglichkeiten am Institut.



Fraunhofer ILT-Laborführung im Rahmen der jDPG-Exkursion.

## »5 vor 12« - Die RWTH Wissenschaftsnacht am 8. November 2019

Alljährlich präsentiert die RWTH-Wissenschaftsnacht »5 vor 12« Wissenschaft in ungewöhnlicher Form zu ungewöhnlicher Zeit. Die Wissenschaft wird für alle Generationen auf unterhaltsame Art mit einem breiten Angebot an spannenden Vorträgen, Filmvorführungen und kabarettistischen sowie musikalischen Beiträgen verständlich und greifbar gemacht. Wie vielfältig einsetzbar das Werkzeug Licht ist, zeigten die Lehrstühle für Lasertechnik LLT, für Technologie Optischer Systeme TOS und für Digital Additive Production DAP der RWTH Aachen University am 8. November 2019 im Hörsaalzentrum C.A.R.L. in Aachen. Die Lehrstühle LLT, TOS und DAP präsentierten Exponate zum Thema »Faszination Laser – Fertigung mit Licht«. Zwei spannende Experimente standen zur Auswahl: Zum einen konnten die Studierenden bei der interaktiven Nutzung eines Lasercutters individuelle, lasergeschnittene Giveaways kreieren. Zum anderen ermöglichte der Einsatz eines 3D-Druckers, der Linsenhalter für Smartphones bauen wird, neue Einblicke durch die eigene Smartphonekamera.

Darüber hinaus präsentierte der Lehrstuhl TOS unter dem Motto »Laserlicht zum Anfassen – Musizieren mit Licht« die im Rahmen einer Projektarbeit entstandene Laserharfe und Christian Hinke vom Lehrstuhl LLT hielt einen Vortrag zum Thema »Der Laser – ein faszinierendes Werkzeug«.

## Fraunhofer Digital Escape Game

Am 11. und 12. Dezember 2019 veranstalteten das Fraunhofer ILT und IPT gemeinsam das zweite »Fraunhofer Digital Escape Game« im Fraunhofer ILT in Aachen.

Rund 40 Studierende stellten sich an zwei Abenden der Herausforderung und tüftelten gemeinsam an den Rätseln im Fraunhofer Escape Room. Während im Hintergrund der Zeitzähler für eine drohende Datenexplosion tickte, stellten die Teilnehmenden ihre Kreativität, ihren Teamgeist und ihr technisches Geschick unter Beweis. Bei einer Führung durch die Hallen und Labore konnten die Studierenden die Fraunhofer-Arbeitswelt am Standort Aachen live erleben und Fragen stellen.



Teilnehmer des »Fraunhofer Digital Escape Game«.

# ALUMNI-NETZWERK

## LEBENDIGES ALUMNI-NETZWERK AM FRAUNHOFER ILT

Das Fraunhofer ILT und die assoziierten Lehrstühle und -gebiete der RWTH Aachen University tragen wesentlich zu einer qualifizierten Aus- und Fortbildung des wissenschaftlich-technologischen Nachwuchses im Bereich der Lasertechnik bei. Allein in 2019 haben 109 Studenten ihre Bachelor- oder Masterarbeit am Fraunhofer ILT durchgeführt und 16 Mitarbeiter ihre Promotion abgeschlossen. Durch ihre Praxiserfahrungen und tiefgehenden Einblicke in innovative Entwicklungen warten diese Mitarbeiter mit besten Voraussetzungen auf, um eine Tätigkeit in Wissenschaft und Industrie aufzunehmen. Sie sind daher gefragtes Nachwuchspersonal.

Seit 2000 betreibt das Fraunhofer ILT das Alumni-Netzwerk »Aix-Laser-People« mit mittlerweile über 450 Ehemaligen, um den Kontakt sowohl zu ILT-Mitarbeitern als auch untereinander zu fördern. Über 80 Prozent der Alumni arbeiten in der produzierenden Industrie, viele davon in laser-relevanten Branchen. 20 Prozent der Alumni wirken weiterhin in der Wissenschaft und über 40 Unternehmen wurden von Ehemaligen gegründet. Durch den Transfer von »innovativen Köpfen« in die Industrie und Wissenschaft leistet das Institut einen direkten gesellschaftlichen Nutzen. Neben dem Alumni-Netzwerk »Aix-Laser-People« bündelt der Verein »Arbeitskreis Lasertechnik AKL e.V.« die thematischen Interessen derjenigen, die weiterhin im Bereich der Lasertechnik tätig sind. Rund 150 Alumni, also gut ein Drittel, sind Mitglieder des AKL e.V..

### Ansprechpartner im Fraunhofer ILT

Dipl.-Phys. Axel Bauer (Alumni-Manager)  
Telefon +49 241 8906-194  
axel.bauer@ilt.fraunhofer.de

### Neuer Alumnus: Die internationale Lasercommunity verabschiedet sich von Prof. Poprawe

Unter dem Titel »Digital Photonic Production and Industry 4.0 – what it means for education and research?« veranstaltete das Fraunhofer ILT im Vorfeld der Weltleitmesse LASER World of PHOTONICS am 23. Juni 2019 ein Symposium zu Ehren von Prof. Dr. Reinhart Poprawe. Rund 280 Wegbegleiterinnen und Wegbegleiter aus Industrie und Wissenschaft folgten seiner Einladung nach München, darunter Führungskräfte des Fraunhofer ILT und der assoziierten RWTH-Lehrstühle sowie Leiter deutscher Laserzentren und Hochschulinstitute. Anlässlich seines Ausscheidens aus dem Beruf würdigten sie sein wissenschaftliches Wirken als Professor der Lasertechnik und seinen Brückenschlag von der Fraunhofer-spezifischen Auftragsentwicklung über die Grundlagenforschung bis hin zur universitären Ausbildung.

Nach der Begrüßung durch Prof. Reinhart Poprawe richteten Dr. Reinhard Pfeiffer, stellvertretender Vorsitzender der Geschäftsführung der Messe München, sowie der amtierende RWTH-Rektor Prof. Ulrich Rüdiger das Wort an Prof. Poprawe und seine Gäste. Es folgten Denkanstöße zur Digitalisierung von Dr. e. h. Peter Leibinger, dem stellvertretenden Vorsitzenden der Geschäftsführung der TRUMPF Gruppe, von Prof. Alfred Gossner, dem ehemaligen Fraunhofer-Finanzvorstand, sowie von dem ehemaligen RWTH-Rektor Prof. Burkhard Rauhut. Themen wie digitalisiertes Lernen oder interdisziplinäre Ausbildung waren ausgewählte Aspekte in diesem Zusammenhang und es wurde deutlich herausgestellt, dass Prof. Poprawe eine Vorbildrolle bei der Vermittlung seines Lehrstoffs einnahm. So führte er zum Beispiel neue Lehrformate wie die »Flipped Classrooms« ein. Die Studierenden zeichneten ihn nicht ohne Grund vier Mal mit dem Lehrpreis der Fakultät Maschinenwesen der RWTH Aachen University aus.



Prof. Poprawe begrüßt die rund 280 Gäste des Symposiums »Digital Photonic Production and Industry 4.0« in München.

In seiner Zeit als Lehrstuhlinhaber war er zudem Erstgutachter bei über 200 Promotionen. Weiterhin waren sich die Referenten einig, dass Prof. Poprawe mit seinem konsequenten und visionären Wirken in der Photonik Maßstäbe gesetzt hat. Als Prorektor für Forschung, Struktur und wissenschaftlichen Nachwuchs der RWTH Aachen University war Prof. Poprawe Mit-Initiator des RWTH Aachen Campus, der mittlerweile zu einer der international bedeutendsten Technologielandschaften heranwächst und innovative Köpfe aus Industrie und Wissenschaft an einem Ort zusammenwirken lässt.

Unter seiner Leitung hat sich das Cluster Photonik seit 2010 mit neuen Wegen zur Erzeugung, Formung und Nutzung von Licht beschäftigt, insbesondere als Werkzeug für die industrielle Produktion. Rund 30 Unternehmen haben sich mit ihren Laserexperten in diesem Umfeld bereits angesiedelt und nutzen die kurzen Wege für neue Ideen und kreative Lösungen zu anstehenden technologischen Fragestellungen. Private Investoren schufen dafür auf dem Campus die baulichen Voraussetzungen. Mit dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungscampus Digital Photonic Production DPP wurden in diesem Umfeld neue Formen der langfristigen und systematischen Kooperation zwischen RWTH, Fraunhofer-Gesellschaft und Industrie etabliert – ein Ergebnis des persönlichen Engagements von Prof. Poprawe und seinem Aachener Team.

Prof. Reimund Neugebauer, Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, erklärte per Videobotschaft: »Prof. Poprawe verkörpert den Fraunhofer-Geist durch und durch: Unser Namenspatron war in den Optischen Technologien tätig und hat wie er Innovationen immer mit Blick auf konkrete Anwendungsmöglichkeiten betrachtet. Seit der Gründung des Fraunhofer ILT in Aachen hat Prof. Poprawe die weltweit führende Stellung der deutschen Laserindustrie maßgeblich



Rund 60 der über 200 Doktoranden von Prof. Poprawe beim Ehrensymposium anlässlich seiner Verabschiedung in München.

mitgeprägt. Als die positive Wirkung von Technologieclustern noch nicht erkannt war, hat er bereits den Grundstein für den Aachener Schwerpunkt in der Verbindung von Optischen Technologien, Maschinenbau und Prozesstechnik gelegt.«

Den Abschluss des Symposiums bildete eine Podiumsdiskussion zum Thema »Digital Photonic Production and Industrie 4.0 – was heißt das für Bildung und Forschung?« mit Dr. E.h. Leibinger, Prof. Gossner, Prof. Rauhut und Prof. Poprawe, moderiert durch den Fernsehmoderator Tobias Ranzinger. Das Fazit der Diskussion: Insbesondere in der produzierenden Industrie ergeben sich durch den Einzug der Digitalisierung neue Perspektiven – sowohl im Hinblick auf innovative Produkte und Dienstleistungen als auch im Hinblick auf neue Absatzmärkte und effizientere Prozessabläufe. Auch die lasergestützte Fertigung trägt durch die Vernetzung mit der virtuellen Welt des Internets zu einer systematischen Weiterentwicklung von Industrie 4.0 Konzepten bei.

Das Ehrensymposium fand im Rahmen der Fachkonferenz »Lasers in Manufacturing LiM« statt, die von der WLT Wissenschaftlichen Gesellschaft Lasertechnik e.V. organisiert wurde.

Quelle und weiterführende Informationen  
im Internet unter: [www.fraunhofer.de/de/schnelleinstieg/alumni.html](http://www.fraunhofer.de/de/schnelleinstieg/alumni.html)

# MOBILITÄT

## LASERTECHNISCHE LÖSUNGEN FÜR INDUSTRIE UND GESELLSCHAFT



### FORSCHEN FÜR DIE MOBILITÄT VON MORGEN

**Zwei Trends dominieren die Mobilität von heute: Einerseits die wachsende Automatisierung in der Produktion, andererseits der Übergang zu elektrischen Antrieben. Beide Entwicklungen forcieren das Interesse an der Lasertechnik. Das Fraunhofer ILT forscht daher intensiv an einer effizienten Systemtechnik für den industriellen Einsatz von heute und morgen. Neben Anwendungen im Leichtbau, in der Batterietechnik oder zur Herstellung von Brennstoffzellen wird auch an neuen Technologien zum Recycling gearbeitet.**

**Mit einem einzigen Laserwerkzeug schneiden, schweißen und additiv fertigen**

Mobilität heute – das heißt hybrider Leichtbau und Elektromobilität. Damit verbunden ist der Spagat zwischen Flexibilität und Produktivität. Schnell wechselnde Produkte, schwankende Losgrößen und neuartige Fertigungskonzepte bestimmen das Bild insbesondere bei kleinen und mittelständischen Unternehmen.

Für dieses Umfeld hat das Fraunhofer ILT zusammen mit drei Partnern das Verbundprojekt »MultiPROmobil – Multifunktionale Robotertechnologie mit universellem Laserwerkzeug für trennende, fügende und additive Fertigungsprozesse im semi-bionischen E-Mobil-Leichtbau« gestartet. Ziel ist dabei die Entwicklung eines Laserbearbeitungskopfs und eine Robotertechnologie für die flexible und wirtschaftliche Fertigung von Blechbaugruppen. Das System soll nicht nur schneiden und schweißen können, sondern auch additive Strukturen generieren und das im »fliegenden Wechsel« – ohne Optik- oder Düsenwechsel.

Neben der Technologie werden auch die Prozesse optimiert. Auf Basis der hochflexiblen Prozesskette legen die Partner von MultiPROmobil Fahrzeugkomponenten digital aus und testen die neuen Methoden. Als ein erstes Anwendungsbeispiel wird der Dreieckslenker eines Elektrofahrzeugs konstruktiv optimiert und in der multifunktionalen Laserroboterzelle ohne Werkzeugwechsel geschnitten, geschweißt sowie mit additiven Strukturen verstärkt.

Mit der agilen, lasergestützten Fertigung lassen sich Prozessketten für die Blechbearbeitung gerade bei der schrittweisen Einführung der Elektromobilität flexibel und skalierbar gestalten.

#### Grundlagenforschung für mobile Energiespeicher

Noch bestimmen Lithium-Ionen-Batterien mit flüssigen Elektrolyten das Bild, aber es wird erwartet, dass Festkörperbatterien die Elektromobilität in den nächsten zehn Jahren erheblich mitbestimmen. Neben neuen Materialien ist die Entwicklung der notwendigen Prozess- und Systemtechnik für die industrielle Fertigung von Festkörperbatterien von entscheidender Bedeutung.

Im Infrastrukturprojekt »NextGenBat – Forschungsinfrastruktur für zukünftige Batteriegenerationen« baut das Fraunhofer ILT zusammen mit fünf Instituten der RWTH Aachen University und des Forschungszentrums Jülich eine Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur für die nächste Batteriegeneration auf. Am Fraunhofer ILT wird in diesem Rahmen ein eigenes Battery Lab errichtet. In NextGenBat entwickeln die Partner einzelne Prozessschritte als Modulbausteine. Materialien und Messtechnik werden erprobt sowie die Herstellung und Prozessierbarkeit der verschiedenen Festkörperbatteriesysteme erforscht. Ein weiterer wesentlicher Arbeitspunkt ist das Recycling von Batterien.

Die beteiligten Institute wollen die vorhandene Infrastruktur so ausbauen, dass insbesondere Unternehmen in NRW für die Entwicklung von Batteriematerialien und -systemen der nächsten Generation optimale Bedingungen und Unterstützung vorfinden.

#### Laserverfahren für die Batterie der Zukunft

Wir erwarten mit fortschreitender Elektromobilität große technologische Herausforderungen. So werden zum Beispiel elektrifizierte Nutzfahrzeuge größere Batterien und höhere Ladeströme benötigen, wodurch die Anforderungen an Fügeprozesse wie das Lasermikroschweißen steigen.

Lasertechnik bietet entlang der gesamten Prozesskette ein großes Potenzial für kosteneffizientere und energiesparende Verfahren. Das gilt für Trenn-, Strukturier- und Fügeprozesse sowie auch für Trocknungs- oder Sinterverfahren. Innovative Lasertrocknungsverfahren z. B. ermöglichen einen effizienteren Energieeintrag als konventionelle Durchlauföfen bei deutlich kompakterer Bauweise.

#### Wasserstoff – Energieträger der Zukunft

Die Nutzung von regenerativen Energien zur Substituierung der fossilen Brennstoffe stellt hohe Anforderungen an die zukünftigen Speicherkonzepte. Wasserstoff birgt als Energieträger der Zukunft ein großes Potenzial. Hinsichtlich der Umsetzung in elektrischen Strom spielen Brennstoffzellen wiederum eine wichtige Rolle – für die Elektromobilität sowie als Strom- und Wärmelieferant z. B. für die Gebäudetechnik.

Die Herausforderungen in der Mobilität sind groß, u. a. bei der Herstellung von Bipolarplatten. Ein Brennstoffzellenstapel besteht je nach Ausführung aus einigen hundert dieser Platten. Sie müssen umlaufend wasserstoffdicht gefügt werden. Dabei fallen Nahtlängen von mehr als 200 Meter pro Brennstoffzelle an. Geschwindigkeit ist hier beim Laserschweißen ebenso gefordert wie eine hohe Nahtqualität.

Das Fraunhofer ILT stellt mit seinen FuE-Aktivitäten die Weichen für eine flexible und effiziente Produktion von Komponenten für die Brennstoffzellentechnik und leistet so einen Beitrag zur Erreichung eines klimaneutralen Mobilitätskonzepts.

#### Ausgewählte Forschungsergebnisse

Thema Mobilität: Seite 37, 82, 86, 87, 88, 89, 90 und 93.

Weitere Informationen im Internet unter:

[www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

# PRODUKTION

## LASERTECHNISCHE LÖSUNGEN FÜR INDUSTRIE UND GESELLSCHAFT

### EFFIZIENTE SYSTEMTECHNIK MACHT SERIENPRODUKTION PROFITABEL

Eine der Kernaufgaben der Fraunhofer-Institute ist die Überführung von Forschungsergebnissen in die industrielle Anwendung. Das Engineering, also die Entwicklung der Prozess- und Systemtechnik, steht dabei im Fokus. Für aktuelle Trends wie den 3D-Druck oder den Einsatz von ultrakurz gepulsten Lasern ist das entscheidend: Erst mit einer verlässlichen und hocheffizienten Systemtechnik lassen sich die neuen Verfahren in die Serienproduktion überführen.

#### Multistrahlensysteme für mehr Durchsatz bei UKP-Lasern

Ultrakurzgepulste (UKP) Laser mit Pulsdauern im Bereich von Piko- und Femtosekunden versprechen Erstaunliches: Sie können beliebige Werkstoffe mit höchster Präzision bearbeiten. Der bei der Bearbeitung auftretende Wärmeeintrag in das Werkstück ist dabei vernachlässigbar klein, sodass zum Beispiel präzise Konturen in Kunststoff und andere thermisch empfindliche Werkstoffe schadungsfrei erzeugt werden können. Bislang war vor allem die eingeschränkte Produktivität der Prozesse limitierend für eine stärkere Marktdurchdringung. Das ändert sich gerade, da Strahlquellen mit einer mittleren Leistung bis in den kW-Bereich verfügbar werden und eine Skalierung der Prozesse ermöglichen. Die gesteigerten mittleren Leistungen erfordern allerdings auch neue systemtechnische Ansätze, um die zur Verfügung stehenden Leistungen in den entsprechenden Prozessen umsetzen zu können. Nur mit der richtigen Prozesstechnik und -führung lässt sich die hohe Qualität der Bearbeitung gewährleisten und gleichzeitig der Durchsatz der Prozesse steigern.

Am Fraunhofer ILT wurden dafür Lösungen entlang der gesamten Prozesskette entwickelt. Ein Ansatz ist, die Pulsenergie der Laserstrahlen homogen auf eine Matrix mit vielen identischen Teilstrahlen aufzuteilen. Diese Matrix kann sehr schnell größere Flächen mit periodischen Strukturen bearbeiten. Mit einem derartigen System wurden bereits metallische Mikrofilter mit 20.000 Löchern pro Sekunde gebohrt. Ein weiteres Anwendungsfeld ist das Bohren von großen Tragflächenkomponenten von Flugzeugen, mit dem Ziel turbulente Strömungen zu vermeiden und den Luftwiderstand signifikant zu reduzieren.

In einem aktuellen Forschungsprojekt wird ein systemtechnischer Ansatz entwickelt, bei dem sich die einzelnen Teilstrahlen einer Strahlmatrix unabhängig voneinander einzeln an- und abschalten, ähnlich wie bei einem Matrixdrucker. Ein anderer Ansatz verwendet einen Flüssigkristallmodulator, welcher eine dynamische Erzeugung von unterschiedlichen Strahlmustern oder -profilen auch während der Bearbeitung ermöglicht.

Der erfolgreiche Einsatz solcher Multistrahloptiken oder auch neuer ultraschneller Scanner setzt voraus, dass die Prozessführung auf dem Werkstück optimiert ist. Dafür wurde am Fraunhofer ILT eine spezielle Simulationssoftware entwickelt, mit der sich thermische Effekte bei der UKP-Laserbearbeitung simulieren lassen.

#### Präzisionsbearbeitung nimmt zu

Das wachsende Interesse an der UKP-Lasertechnik resultiert auch aus dem Wunsch nach immer höherer Präzision in der Lasermaterialbearbeitung. Dafür untersuchen unsere Experten auch konventionelle Festkörperlaser mit kürzeren Wellenlängen.



Ein langfristiges Ziel ist dabei die Erzeugung von Strukturen im Mikrometer- und Sub-Mikrometerbereich. Die Lasermaterialbearbeitung könnte auf diese Weise nasschemische Prozesse ersetzen, die derzeit noch für die Erzeugung solcher Mikro- und Nanostrukturen genutzt werden. Neben neuen Strahlquellen werden dafür auch spezielle Optiken untersucht.

#### Kosten für Additive Fertigung halbieren

Bei der Additiven Fertigung ist das primäre Ziel, Aufwand und Kosten zu senken. Eine höhere Effizienz lässt sich entweder mit mehr Leistung oder mit geringerem Aufwand erreichen.

Komplexe Metallbauteile wie Turbinenschaufeln, Getriebe- oder Motorenteile können additiv durch pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen gefertigt werden. Derzeit laufen dort die einzelnen Arbeitsschritte aber meist noch isoliert ab und erfordern viele manuelle Eingriffe von Experten.

Im Rahmen des Projekts »IDEA – Industrialisierung von Digitalem Engineering und Additiver Fertigung« wollen 14 Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzverfahren für die Serienfertigung tauglich machen, indem sie Produktkosten sowie Entwicklungs- und Durchlaufzeiten um etwa 50 Prozent senken.

Großes Potenzial besteht vor allem in der effizienteren Kopplung von Hard- und Software. Zeit- und Kostenvorteile sollen durch die Nutzung von einheitlichen Datenformaten, Prozesssimulationen, modernen Produktionssystemen und der durchgängigen Erfassung von Fertigungsdaten erreicht werden.

Im Rahmen des Projekts werden zwei Pilotlinien aufgebaut: eine im Siemens Gasturbinenwerk Berlin und eine als Modell für kleine und mittelständische Unternehmen bei der MBFZ toolcraft GmbH in Georgensgmünd.

#### 3D-Druck für die Serienfertigung in der Automobilindustrie

Die Digitalisierung von Prozessketten wird auch in der Automobilindustrie als wesentlich für den Durchbruch additiver Technologien gesehen. Gemeinsam mit Partnern aus Forschung, Großunternehmen und KMU hat das Fraunhofer ILT deshalb das Projekt »IDAM – Industrialisierung und Digitalisierung von Additive Manufacturing (AM) für automobiler Serienprozesse« gestartet.

Im Projekt IDAM wird der 3D-Druck erstmalig in einen industrialisierten und hochautomatisierten Serienprozess der Automobilindustrie überführt. Vor- und nachgelagerte Prozesse sollen möglichst integriert und eine durchgängige Datenkette neu aufgebaut werden.

Dafür werden im Additive Manufacturing Center der BMW Group in München sowie im Bonner Werk des Automobilzulieferers GKN Powder Metallurgy zwei modulare und nahezu vollständig automatisierte AM-Fertigungslinien aufgebaut. Durch die anvisierten Stückzahlen erhält das Verbundprojekt Signalwirkung: Geplant sind 50.000 Bauteile pro Jahr in der Gleichteilfertigung und über 10.000 Individual- und Ersatzteile.

#### Ausgewählte Forschungsergebnisse

Thema Produktion: Seite 39, 46, 51, 54, 56, 57, 58, 62, 63, 66, 79 und 84.

#### Weitere Informationen im Internet unter:

[www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

# DIGITALISIERUNG

## LASERTECHNISCHE LÖSUNGEN FÜR INDUSTRIE UND GESELLSCHAFT



### DIGITALISIERUNG IN DER PRODUKTION EFFIZIENT UMSETZEN

**Die Digitalisierung in der Industrie ist ein komplexer Transformationsprozess. Ziel ist eine digitale Rendite, also ein Zuwachs bei Effizienz und Gewinn durch die Einführung digitaler Technologien und Prozesse. Dahinter stehen viele Fragen: Wie lässt sich die neue Technik bei laufender Produktion einführen? Welche Kosten fallen dafür an? Und wie nehmen wir die Menschen mit? Am Fraunhofer ILT wird seit vielen Jahren an digitalen Technologien gearbeitet. Aufgrund dieser Erfahrungen können Firmen bei jedem Schritt der Transformation nachhaltig beraten und umfassend unterstützt werden.**

#### Digitalisierung beginnt mit einem Assessment

Der Blick in eine Werkhalle zeigt heute vielerorts noch eine Umgebung, die von klassischen Werkzeugmaschinen dominiert wird. Gerade bei mittelständischen Firmen schreitet der Übergang zu neuen, digital vernetzten Technologien oft langsam voran. Meist beginnt er zunächst unsichtbar mit der Digitalisierung einzelner Schritte in bestehenden Arbeitsabläufen. Grundlegende Veränderungen in dem Zusammenspiel von Betriebsabläufen, Personal und Technik beginnen mit einem Digitalisierungs-Assessment: Wo lassen sich anstehende Investitionen sinnvoll mit der Digitalisierung verbinden? Wo sind Effizienzgewinne möglich? Das Fraunhofer ILT hat für diese Fragestellungen ein Startpaket entwickelt. Unsere Experten analysieren den Bedarf und stellen Lösungsansätze aus den jeweiligen Leistungsangeboten dar. So schaffen sie die Basis für eine systematische Analyse von Potenzial und Mehrwert im Hinblick auf die Abläufe und Ziele des Unternehmens.

Gemeinsam werden konkrete Anwendungen identifiziert, in denen die Digitalisierung im produktionstechnischen Umfeld einen Beitrag zum Unternehmenserfolg leisten kann. Die abschließende Umsetzungsempfehlung fasst Analyse und Potenziale zusammen und beschreibt konkrete Lösungen, die dem Unternehmen einen erfolgreichen Start in die nächste Generation der Fertigung ermöglichen.

#### Testphase in der »Digital Light Factory«

Wenn die Potenziale klar analysiert sind und die Entscheidung für neue Investitionen gefallen ist, folgt die Umsetzung in die Produktion. Zur Integration der neuen Technologien soll diese nur möglichst kurz unterbrochen werden. Eine Testphase, Mitarbeiterschulungen und gegebenenfalls auch die Optimierung der Prozesse sind aber unerlässlich.

Am Fraunhofer ILT wurde dafür eine spezielle Infrastruktur geschaffen, die »Digital Light Factory«. Hier können Maschinen und Prozesse in einer realtypischen Umgebung installiert, getestet und für die Produktion qualifiziert werden. Die individuelle und isolierte Entwicklungs- und Produktionsumgebung umfasst die Fertigungstechnologien mit allen gewünschten Steuerungs- und Automatisierungsschnittstellen. Je nach Zielsetzung im Industrie 4.0-Reifegradindex ist diese Umgebung über eine individuelle Netzwerkverbindung in einem virtuellen oder realen MES- oder ERP-System integriert.

Kundenspezifische Fertigungssysteme werden in der Digital Light Factory auf den digital integrierten Produktionsanlauf vorbereitet. Zusätzliche Sensoren können installiert und getestet sowie Prozesse optimiert werden. Unsere Experten stehen auch für Schulungen zur Verfügung. In Vorbereitung auf die Inbetriebnahme am Produktionsort schulen sie die Ingenieure und Bediener im Rahmen der Systemvalidierung.

#### Der Zukunft ein Stück näher: Das AI-Labor

Als ein Werkzeug der Digitalisierung wird zunehmend Künstliche Intelligenz (»artificial intelligence«, kurz AI) eingesetzt, bislang meist in der Qualitätssicherung z. B. zur Mustererkennung. Gerade in größeren Datensätzen sind es Abweichungen oder Trends, aus denen ein entsprechend trainiertes System zum Beispiel Prozessabweichungen bzw. die finale Bauteilqualität identifizieren kann. Solche AI-basierten Systeme können bereits Aussagen z. B. zur Verschmutzung von Schutzgläsern oder zum Verschleiß von Antriebssystemen liefern.

Damit sind auch Voraussagen zur Wartung eines Systems möglich (»predictive maintenance«), sodass sich einerseits Stillstandszeiten reduzieren und andererseits auch Fehler außerhalb des Toleranzbereichs erkennen lassen. Auf diesem Wege kommen moderne Produktionssysteme einer »zero defect production« immer näher. Etwa beim Laserschweißen im Automobilbau oder beim Mikrofügen in der Batterietechnik lassen sich bereits heute Schweißnähte mit bildbasierten Überwachungssystemen in Echtzeit analysieren und die Nahtqualität mit angepassten Algorithmen zuverlässig klassifizieren.

Die Entwicklung und Adaptierung von AI-Prozessen ist entsprechend komplex. Das Fraunhofer ILT hat dafür ein AI-Labor eingerichtet. Dort können Nutzer auf Basis vorbereiteter Module mit ihren eigenen Daten experimentieren und so neben den etablierten Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens (ML) auch neue Architekturen, basierend auf tiefen Neuronalen Netzen (deep learning), testen. Speziell entwickelte Systemumgebungen stellen für die verschiedenen Anwendungstests eine hoch performante Infrastruktur bereit. Die Ergebnisse werden für den Anwender verständlich aufbereitet, sodass er Entscheidungen ableiten kann. Das AI-Labor stellt mit dem praktischen Angebot auch eine Umgebung für den sicheren Betrieb technischer Systeme bereit, in denen AI-Lösungen auf der Regelungsebene verwendet werden.

#### Die digitale Werkzeugbox

Noch ist die Digitalisierung für viele Firmen Neuland. Obwohl sie an vielen Stellen Abläufe vereinfacht und auf gemeinsame Standards zurückführt, muss die Integration dieser Technologie für jede Firma individuell betrachtet werden. Das Fraunhofer ILT bietet deshalb einen ganzheitlichen Ansatz, bei dem Mensch, Maschine und Prozesse zusammen betrachtet werden. Gemeinsam mit unseren Kunden werden Lösungen entwickelt und ihren Bedürfnissen entsprechend umgesetzt. Dafür steht ein breites Spektrum von Technologien und Komponenten wie Simulations- und Vernetzungstechnologien sowie eine Vielzahl von Sensorsystemen, Optiken und Lasersystemen zur Verfügung. Schließlich wird die Technologie durch die Anwendung definiert.

#### Ausgewählte Forschungsergebnisse

Thema Digitalisierung: Seite 50, 55, 59, 66, 67, 83, 90 und 95.

#### Weitere Informationen im Internet unter:

[www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

# GESUNDHEIT

## LASERTECHNISCHE LÖSUNGEN FÜR INDUSTRIE UND GESELLSCHAFT



### LASERBASIERTER 3D-DRUCK FÜR DIE ENTWICKLUNG NEUER IMPLANTATE

**Laser haben sich im klinischen Alltag sowohl bei therapeutischen Anwendungen als auch bei der Diagnose in vielen Bereichen etabliert. Große Veränderungen bewirken die Laser aber auch z. B. im Labor oder in der Medizintechnik. Die Stärken der Lasertechnik kommen gerade bei der personalisierten Medizin zum Tragen. Technologien wie der laserbasierte 3D-Druck zeigen, wie Know-how aus der industriellen Fertigung die Medizintechnik voranbringen kann. Die Spannweite der Anwendungen ist dabei groß: Von individualisierten Hörgeräten über einwachsende Knochenimplantate bis hin zu Herzklappen aus körpereigenen Zellen.**

#### Automatisiert und individuell fertigen

Schon heute ist jedes Hörgerät oder Zahnmodell ein Unikat. Die Frage ist, wie sich bei der Produktion von individualisierten Teilen Zeit und Kosten einsparen lassen. Insbesondere für kleine Kunststoffteile können die Experten des Fraunhofer ILT eine hocheffiziente Methode für die industrielle Fertigung anbieten: »TwoCure« heißt das Verfahren, mit dem sich dreidimensionale Strukturen schneller, einfacher und vor allem vollautomatisch aufbauen lassen. Mithilfe der photolithographisch basierten Methode können Kunststoffteile ganz ohne Stützstrukturen hergestellt werden. Das spart Vor- und Nacharbeiten und erlaubt eine bessere Nutzung des gesamten Bauraums. Mit einer TwoCure-Anlage können zum Beispiel mehrere 100 individuelle Otoplastiken für Hörgeräte an einem Tag gefertigt werden.

#### Lastangepasste Implantate additiv herstellen

Implantate, die Hartgewebe ersetzen, sind höchsten Ansprüchen ausgesetzt: Sie müssen biokompatibel, haltbar und außerdem extrem belastbar sein. Die Forscher am Fraunhofer ILT haben hier viel Zeit investiert, um Materialien und Verfahren des laserbasierten 3D-Drucks von Metallstrukturen für die Anfertigung von Implantaten zu optimieren.

Die Methode der Wahl ist das Laser Powder Bed Fusion (LPBF). Das Verfahren ermöglicht es, Implantate und Prothesen passgenau und individuell herzustellen. Durch komplexe interne Strukturen kann dabei auch eine hohe, an den Knochen angepasste Steifigkeit erreicht werden. Darüber hinaus wird durch die Integration genau definierter Poren in die Metalloberfläche das Einwachsen von Knochen verbessert. Unsere Experten entwickeln zusammen mit Medizinern additiv gefertigte Wirbelkörperimplantate, die in ihrer Geometrie, Steifigkeit und Struktur individuell ausgelegt und lokal lastangepasst sind. Damit kann das Einsinken der implantierten Cages (Einsätze für den Zwischenwirbelraum) in die angrenzenden Wirbelkörper signifikant reduziert werden.

#### Resorbierbare Materialien für natürliche Heilungsprozesse

Noch einen Schritt weiter geht der Ansatz, mit einem Implantat das Knochenwachstum anzuregen und die Stützstruktur mit der Zeit vom Körper resorbieren zu lassen. Dafür wird eine netzartige Stützstruktur (Scaffold) aufgebaut, die aus einem resorbierbaren Polymer und Collagen besteht. Während die lasergesinterte Polymerstruktur vor allem eine Stützfunktion wahrnimmt, induziert das Collagen einen natürlichen Knochenheilungsprozess. Damit soll die endogene Regeneration von Knochen- und Knochen-Knorpel-Defekten stimuliert werden.

#### Eine Herzklappe wachsen lassen

Auch das Erforschen der Wechselwirkungen von laserstrukturierten Oberflächen und lebenden Zellen geht am Fraunhofer ILT weiter. So lassen sich mit dem Laser künstliche Oberflächen in verschiedenen Schritten so modifizieren, dass sie mechanische, topografische und molekulare Reize auf Zellen ausüben und deren Wachstum gezielt beeinflussen. Mikro- und Nanostrukturen verändern zum Beispiel die Rauheit und Benetzbarkeit von Oberflächen, wodurch Zelladhäsion und Proliferation beeinflusst werden.

Oberflächen können aber auch photochemische Funktionalitäten übernehmen. Dabei werden bestimmte chemische Gruppen auf der Oberfläche mit Licht aktiviert. Diese Ankergruppen können dann zur gezielten Immobilisierung von Peptiden, Proteinen oder Wachstumsfaktoren führen. In Verbindung mit Techniken aus dem 3D-Druck von Polymeren ergeben sich noch weitere Möglichkeiten. Unsere Wissenschaftler erforschen, wie man in Zukunft Stützstrukturen drucken kann, die das Gefäßwachstum stimulieren. Mit anderen Worten: wie man körpereigene Zellen dazu bringt, durchblutetes Gewebe auf einer Stützstruktur zu bilden. Ein Ziel ist hier zum Beispiel

die Kultivierung einer künstlichen Herzklappe mit patienteneigenem Gewebe. Wenn die Stützstruktur aus bioresorbierbarem Material besteht, kann sie sogar vom Körper selbst abgebaut werden. Am Fraunhofer ILT werden dafür Stützstrukturen aus Polymeren mit photolithographischen Verfahren aufgebaut und im Hinblick auf ihre mechanischen Eigenschaften getestet. Außerdem werden die neuen Materialien auf ihre Bioverträglichkeit untersucht.

Damit in Zukunft keine künstlichen Materialien mehr in den Körper eingebracht werden müssen, forschen die ILT-Wissenschaftler auch an laserbasiertem Bioprinting (»laser assisted bioprinting«, kurz LAB) zum Verdrucken lebender Zellen. Hier kommt das LIFT-Verfahren zum Einsatz. So sollen in Zukunft künstliche, durchblutete Organstrukturen wie Herzgewebe entstehen.

#### Ausgewählte Forschungsergebnisse

Thema Medizintechnik: Seite 40, 75, 98, 99 und 100.

#### Weitere Informationen im Internet unter:

[www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

# UMWELT

## LASERTECHNISCHE LÖSUNGEN FÜR INDUSTRIE UND GESELLSCHAFT



© CNES / Illustration David Ducros.

### PHOTONIK FÜR DEN KLIMA- UND UMWELTSCHUTZ

Beim Umweltschutz und in der Klimaforschung bietet die Photonik einzigartige und nachhaltige Lösungen. Sie leistet einen maßgeblichen Beitrag zum Verständnis der Ursachen des Klimawandels und zur Verringerung der Treibhausgasemissionen, beispielsweise durch einen verringerten Stromverbrauch wie bei LEDs, CO<sub>2</sub>-Ausstoß oder die Einsparung von Material durch neue Recyclingprozesse. Photonische Technologien ermöglichen es, Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz miteinander zu verbinden. Mit effizienten Laserverfahren lässt sich auch die Umweltbelastung durch Mikroplastik reduzieren – dank Filtern mit lasergebohrten Kleinstlöchern, welche die schädlichen Teilchen aus dem Wasser entfernen können.

#### Umweltfreundliche Energiewirtschaft dank Photonik

Bei den regenerativen Energien wie Photovoltaik oder Windenergie ermöglichen photonische Verfahren eine höhere Effizienz und längere Lebensdauer. Laserbasierte Dünnschichttechnologien lassen sich besser als jedes andere Verfahren für die wirtschaftliche und umweltfreundliche Erzeugung und Modifikation extrem dünner, funktionaler Schichten, etwa für die Photovoltaik oder die Elektronik, einsetzen.

#### »Urban Mining« mit Lasern – Recycling der nächsten Generation

Im Bereich der Kreislaufwirtschaft gilt es, komplexe Herausforderungen zu bewältigen, die sich beispielsweise aus der zunehmenden Materialvielfalt und Miniaturisierung bei Elektronikbauteilen ergeben, etwa bei ausgedienten Platinen von Computern, Servern und Mobiltelefonen. Hier ist ein umfassendes Recycling von Werkstoffen nötig, wobei extrem schnelle und präzise Laserverfahren zur Detektion und Sortierung genutzt werden können. Gemischte Metallschrotte lassen sich zum Beispiel mittels Lasertechnik sortieren, um wertvolle Legierungen etwa mit hohem Wolfram-, Kobalt- oder Tantalgehalten zurückzugewinnen.

Ein europäisches Konsortium, mit dem Ziel der nächsten Generation des Recyclings von Elektronik-Altgeräten den Weg zu bereiten, entwickelt im Projekt ADIR laserbasierte Prozesse und Maschinen für die automatisierte Entstückung und Separation elektronischer Bauteile sowie die Wiedergewinnung wertvoller Stoffe. Komponenten wie Batterien, Tantalkondensatoren, Magnete oder Vibrationsalarmlen lassen sich selektiv extrahieren und anschließend spezielle Stoffe wie Technologiemetalle oder seltene Erden zurückzugewinnen.

#### Lasergefertigte Filter gegen die Mikroplastikflut

Auch bei der Reduzierung der Umweltbelastung durch Mikroplastik spielen Laserverfahren eine wichtige Rolle. Die winzigen Kunststoffteile entstehen auf verschiedene Weise, etwa als Abrieb von Fahrzeugreifen oder beim Waschen moderner Funktionstextilien. Dazu kommen Kosmetikbestandteile, bei denen Mikroplastik als Füllstoff oder Bindemittel verwendet wird. Solche Teilchen gelangen in unser Abwasser und stellen Klärwerke vor erhebliche Probleme. Gerade winzige Partikel unter wenigen 10 Mikrometern lassen sich mit herkömmlichen Technologien nicht kosteneffizient herausfiltern und gelangen in die Umwelt.

Das Fraunhofer ILT entwickelt eine Technologie für das effiziente Bohren von Metallfolien und anderen Werkstoffen mit Durchmessern im Bereich von einem Mikrometer. Besonders geeignet sind dafür Lasersysteme mit ultrakurzen Pulsen im Piko- und Femtosekundenbereich. Im BMBF-geförderten Projekt SimConDrill entwickeln Partner aus Industrie und Wissenschaft ein langlebiges Filtermodul zur Extraktion von Mikroplastik auch aus großen Wassermengen. Das Filtermodul mit lasergebohrten Löchern filtert bis zu 10 Mikrometer kleine Partikel effizient aus dem Wasser heraus und arbeitet verstopfungsfrei. Das Filtermodul wurde für Klärwerke entwickelt und getestet, aber auch mobile Anwendungen in Kanalspülwagen oder in Privathaushalten sind denkbar. Die Reinigung von Ballastwasser bietet ebenfalls großes Potenzial.

#### Besonders effizient: Einfache Skalierbarkeit durch Multistrahlkonzepte

Zum Einbringen von Löchern beispielsweise in Filterfolien kommt ein Multistrahlkonzept zum Einsatz, bei dem ein Laserstrahl in viele Teilstrahlen geteilt wird. Mit diffraktiven optischen Elementen (DOE) lassen sich mehr als 200 Teilstrahlen gezielt für die Bearbeitung mit einer Präzision bis in den sub-Mikrometerbereich einsetzen. 12 000 Bohrungen pro Sekunde mit einem Durchmesser von weniger als 1 µm in Metallfolien lassen sich mit diesem Verfahren realisieren.

#### Klimaforschung mit maßgeschneiderten Lasern

Die Photonik leistet auch einen unverzichtbaren Beitrag zum Verständnis der Ursachen des Klimawandels. Satellitengestützte, robust ausgelegte Lasermesssysteme erfüllen z. B. die extremen Anforderungen für einen langjährigen Einsatz im Weltall und ermöglichen eine präzise Analyse der Quellen und Senken klimaschädlicher Gase in der Atmosphäre.

Im Rahmen der deutsch-französischen Klimaforschungsmission »MERLIN« soll ein Licht-Radar (LIDAR, Light Detection and Ranging) eingesetzt werden, das mittels Laserpulsen die Konzentration des Methans in der Atmosphäre misst und dabei, anders als bisher, unabhängig von Sonnenlicht ist.

Auch von der Erde aus lassen sich höhere Atmosphärenschichten, die in der Klimaforschung zunehmend an Bedeutung gewinnen, gezielt analysieren. Messdaten konnten dort bisher nur sehr aufwendig gewonnen werden – ein kompaktes LIDAR-System bietet hier neue Möglichkeiten. Gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP) hat das Fraunhofer ILT ein System mit diodengepumptem Alexandritlaser entwickelt. Damit lassen sich Baugröße und Energiebedarf bisheriger Systeme jeweils um einen Faktor 100 reduzieren und präzise Messungen in den anvisierten Höhen bis 120 km realisieren. Mehrere der neuen LIDAR-Systeme sollen demnächst erstmals in einem Netzwerk dreidimensional und zeitaufgelöst Wind- und Temperaturfelder in der mittleren Atmosphäre vermessen. Zudem ist mittelfristig ein Einsatz der kompakten LIDAR-Systeme auf Flugzeugen und Satelliten denkbar.

*Textauszüge aus der SPECTARIS Studie 2019 in Kooperation mit dem Fraunhofer ILT »Licht als Schlüssel zur globalen ökologischen Nachhaltigkeit«*

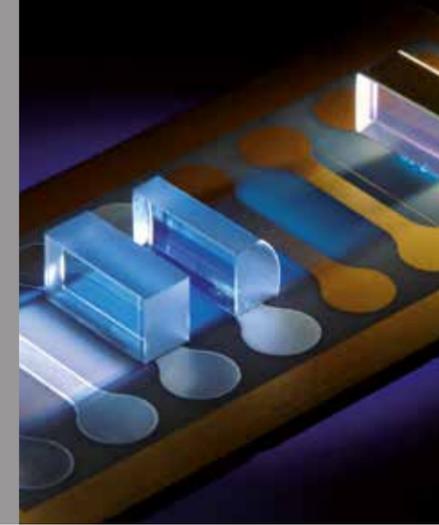
#### Ausgewählte Forschungsergebnisse

Thema Umwelt: Seite 43, 47, 77, 81, 105, 106 und 112.

#### Weitere Informationen im Internet unter:

[www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

## AUS DEN TECHNOLOGIEFELDERN



### LASER UND OPTIK

Das Technologiefeld Laser und Optik steht für innovative Laserstrahlquellen und hochwertige optische Komponenten und Systeme. Das Team der erfahrenen Laserexperten entwickelt Strahlquellen mit maßgeschneiderten räumlichen, zeitlichen und spektralen Eigenschaften und Ausgangsleistungen im Bereich  $\mu\text{W}$  bis  $\text{GW}$ . Das Spektrum der Laserstrahlquellen reicht von Diodenlasern bis zu Festkörperlasern, von Hochleistungsw-Lasern bis zu Ultrakurzpulslasern und von single-frequency Systemen bis hin zu breitbandig abstimmbaren Lasern.

Bei den Festkörperlasern stehen sowohl Oszillatoren als auch Verstärkersysteme mit herausragenden Leistungsdaten im Zentrum des Interesses. Ob Laserhersteller oder Anwender, die Kunden erhalten nicht nur maßgeschneiderte Prototypen für ihren individuellen Bedarf sondern auch Beratung zur Optimierung bestehender Systeme. Insbesondere im Bereich der Kurzpulslaser und der Breitbandverstärker können zahlreiche Patente und Rekordwerte als Referenz vorgewiesen werden.

Darüber hinaus bietet das Technologiefeld hohe Kompetenz bei Strahlformung und Strahlführung, dem Packaging optischer Hochleistungskomponenten und dem Design optischer Komponenten. Auch die Auslegung hocheffizienter Freiformoptiken zählt zu den Spezialitäten der Experten.

Die Anwendungsgebiete der entwickelten Laser und Optiken reichen von der Lasermaterialbearbeitung und der Messtechnik über Beleuchtungsapplikationen und Medizintechnik bis hin zum Einsatz in Weltraumapplikationen, der Quantentechnologie und der Grundlagenforschung.

### LASERMATERIAL-BEARBEITUNG

Zu den Fertigungsverfahren des Technologiefelds Lasermaterialbearbeitung zählen die Trenn- und Fügeverfahren in Mikro- und Makrotechnik sowie die Oberflächenverfahren. Ob Laserschneiden oder Laserschweißen, Bohren oder Löten, Laserauftragschweißen oder Reinigen, Strukturieren oder Polieren, Generieren oder Beschichten, das Angebot reicht von Verfahrensentwicklung und Machbarkeitsstudien über Simulation und Modellierung bis hin zur Integration der Verfahren in Produktionslinien.

Die Stärke des Technologiefelds beruht auf dem umfangreichen Prozess-Know-how, das auf die Kundenanforderungen zugeschnitten wird. So entstehen auch Hybrid- und Kombinationsverfahren. Darüber hinaus werden in Kooperation mit spezialisierten Netzwerkpartnern komplette Systemlösungen angeboten. Sonderanlagen, Anlagenmodifikationen und Zusatzkomponenten sind Bestandteil zahlreicher FuE-Projekte. So werden spezielle Bearbeitungsköpfe für die Lasermaterialbearbeitung nach Kundenbedarf entwickelt und gefertigt. Auch Prozessoptimierungen durch Designänderungen von Komponenten sowie Systeme zur Online-Qualitätsüberwachung zählen zu den Spezialitäten des Technologiefelds.

Der Kunde erhält somit laserspezifische Lösungen, die Werkstoff, Produktdesign, Konstruktion, Produktionsmittel und Qualitätssicherung mit einbeziehen. Das Technologiefeld spricht Laseranwender aus unterschiedlichen Branchen an: vom Maschinen- und Werkzeugbau über Photovoltaik und Feinwerktechnik bis hin zum Flugzeug- und Automobilbau.

### MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK

Gemeinsam mit Partnern aus den Life Sciences erschließt das Technologiefeld Medizintechnik und Biophotonik neue Einsatzgebiete des Lasers in Therapie und Diagnostik sowie in Mikroskopie und Analytik. Mit dem Selective Laser Melting Verfahren werden generativ patientenindividuelle Implantate auf der Basis von Computertomographie-Daten gefertigt. Die Materialvielfalt reicht von Titan über Polylactid bis hin zu resorbierbarem Knochenersatz auf Kalzium-Phosphat-Basis.

Für Chirurgie, Wundbehandlung und Gewebetherapie werden in enger Kooperation mit klinischen Partnern medizinische Laser mit angepassten Wellenlängen, mikrochirurgische Systeme und neue Lasertherapieverfahren entwickelt. So werden beispielsweise die Koagulation von Gewebe oder der Präzisionsabtrag von Weich- und Hartgewebe untersucht.

Die Nanoanalytik sowie die Point-of-care Diagnostik erfordern kostengünstige Einweg-Mikrofluidikbauteile. Diese werden mit Hilfe von Laserverfahren wie Fügen, Strukturieren und Funktionalisieren mit hoher Genauigkeit bis in den Nanometerbereich gefertigt. Die klinische Diagnostik, die Bioanalytik und die Lasermikroskopie stützen sich auf das profunde Know-how in der Messtechnik. Im Themenbereich Biofabrication werden Verfahren für In-vitro-Testsysteme oder Tissue Engineering vorangetrieben. Mit der Nanostrukturierung und der photochemischen Oberflächenmodifikation leistet das Technologiefeld einen Beitrag zur Generierung biofunktionaler Oberflächen.

### LASERMESSTECHNIK UND EUV-TECHNOLOGIE

Die Schwerpunkte des Technologiefelds Lasermesstechnik und EUV-Technologie liegen in der Fertigungsmesstechnik, der Materialanalytik, der Identifikations- und Analysetechnik im Bereich Recycling und Rohstoffe, der Mess- und Prüftechnik für Umwelt und Sicherheit sowie dem Einsatz von EUV-Technik. In der Fertigungsmesstechnik werden Verfahren und Systeme für die Inline-Messung physikalischer und chemischer Größen in einer Prozesslinie entwickelt. Schnell und präzise werden Abstände, Dicken, Profile oder die chemische Zusammensetzung von Rohstoffen, Halbzeugen oder Produkten gemessen.

Im Bereich Materialanalytik wurde profundes Know-how mit spektroskopischen Messverfahren aufgebaut. Anwendungen sind die automatische Qualitätssicherung und Verwechslungsprüfung, die Überwachung von Prozessparametern oder die Online-Analyse von Abgasen, Stäuben und Abwässern. Je genauer die chemische Charakterisierung von Recyclingprodukten ist, umso höher ist der Wiederverwertungswert. Die Laser-Emissionsspektroskopie hat sich hier als besonders zuverlässige Messtechnik erwiesen. Neben der Verfahrensentwicklung werden komplette Prototypanlagen und mobile Systeme für den industriellen Einsatz gefertigt.

In der EUV-Technik entwickeln die Experten Strahlquellen für die Lithographie, die Mikroskopie, die Nanostrukturierung oder die Röntgenmikroskopie. Auch optische Systeme für Applikationen der EUV-Technik werden berechnet, konstruiert und gefertigt.

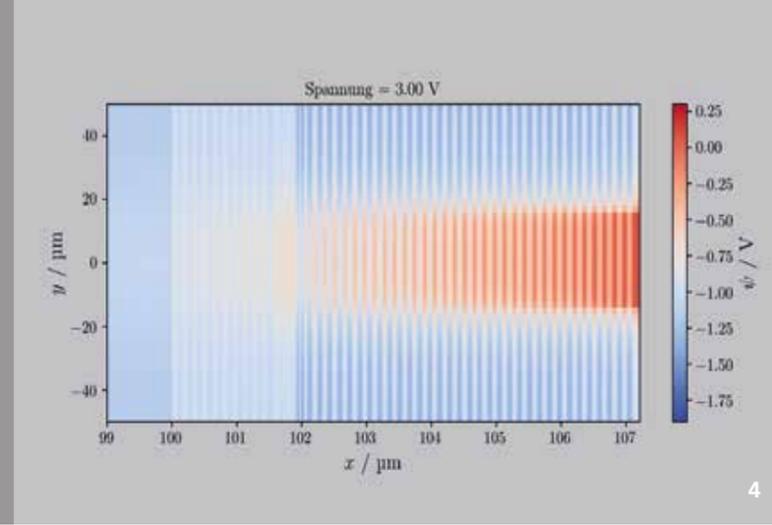
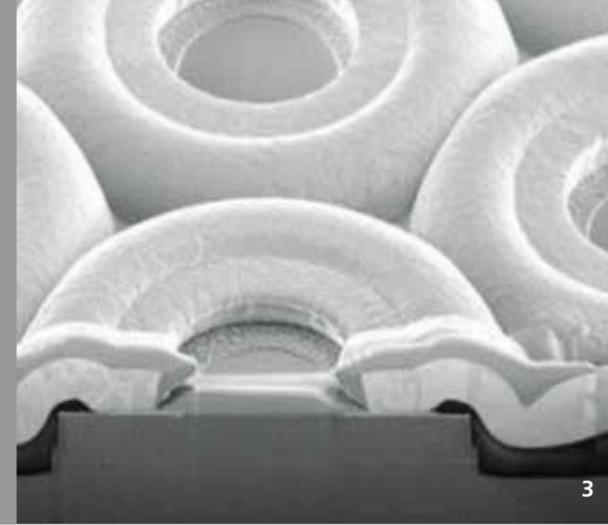
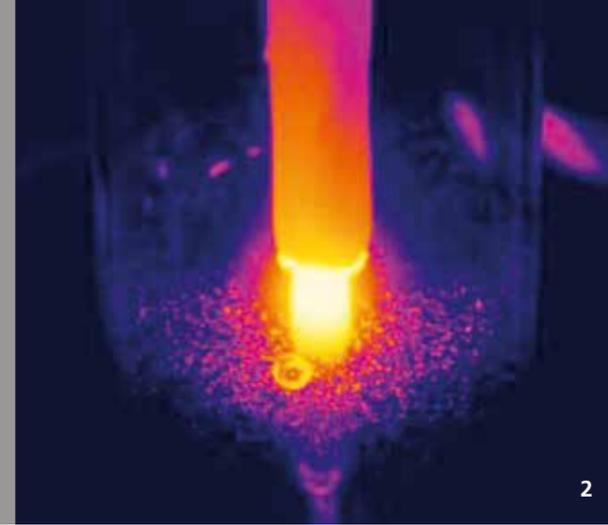
## LASER UND OPTIK



### INHALT

Entwicklung eines optischen Systems für die Züchtung von $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -Einkristallen	36
Modellierung und Simulation oberflächenemittierender Halbleiterlaser	37
Skalierbarer Ultrakurzpulslaser mit < 30 fs Pulsdauer und > 500 W Ausgangsleistung	38
Fraunhofer CAPS – User Facility für Ultrakurzpulslaser mit höchsten mittleren Leistungen	39
Verstärker für gepulste Laserstrahlung mit 2,9 $\mu\text{m}$ Emissionswellenlänge	40
Ultrakurzpuls-Laserstrahlquelle bei 3,4 $\mu\text{m}$ für die Bearbeitung von Polymeren	41
Kontinuierlich diodengepumpter Alexandrit-Laser mit 6,5 W Ausgangsleistung	42
Diodengepumpter Alexandrit-Laser für ein kompaktes LIDAR-System	43
Multimode-Faser-Bragg-Gitter als Auskoppelspiegel für XLMA-basierte Faserlaser	44
Entwicklung einer hermetisch dichten, gelöteten Faserdurchführung	45
Montagetechnik für kompakte optomechanische Baugruppen	46
Bakeout Facility zur Reinigung von optomechanischen Komponenten	47
Effiziente Frequenzkonversion für Quantenkommunikation in Glasfasernetzwerken	48
Auslegung von Freiformoptiken für teilkohärente Laserstrahlung	49
Schnelles Raytracing segmentierter Freiformlinsen	50
Variable Multistrahloptik für die Bearbeitung mit Hochleistungs-UKP-Lasern	51

*Einschreiben von Bragg-Gittern in optische Fasern.*



## ENTWICKLUNG EINES OPTISCHEN SYSTEMS FÜR DIE ZÜCHTUNG VON $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -EINKRISTALLEN

### Aufgabenstellung

$\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  ist ein Wide-Bandgap-Halbleiter, der sich durch eine besonders große Bandlücke von etwa 4,8 eV auszeichnet. Aufgrund des geringen Schmelzpunkts von ungefähr 1800 °C im Vergleich zu anderen Wide-Bandgap-Halbleitern wie SiC oder GaN lässt sich die Züchtung von  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -Einkristallen vergleichsweise effizient und kostengünstig realisieren. Hierzu werden aktuell überwiegend tiegelbasierte Verfahren wie die Czochralskimethode eingesetzt. Die erreichbare Reinheit der Kristalle ist allerdings durch Kontamination der Schmelze aufgrund der Diffusion von Tiegelmaterialelementen limitiert. Die Anwendung des tiegelfreien, laserdiodengestützten Zonenschmelzverfahrens (LDFZ) ermöglicht eine effiziente Züchtung hochreiner  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -Kristalle. Im Rahmen eines gemeinsamen Projekts mit dem japanischen National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) sollen das LDFZ-Verfahren weiterentwickelt und Kristalle mit einem Durchmesser von bis zu 51 mm gezüchtet werden.

### Vorgehensweise

Beim LDFZ-Verfahren wird das im Allgemeinen polykristalline Ausgangsmaterial radial mit Laserdioden bestrahlt und in einem definierten Bereich aufgeschmolzen. Hierzu wird am

- 1 Optischer Aufbau für das Kristallzuchtssystem.
- 2 Temperaturprofil auf dem  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -Kristall während des Zuchtprozesses.

Fraunhofer ILT ein optisches System entwickelt und aufgebaut. Als Strahlquelle wird ein fasergekoppelter Diodenlaser verwendet. Zur Erzeugung einer prozessangepassten Intensitätsverteilung wird die aus der Faser austretende Strahlung homogenisiert und auf fünf Strahlen gleicher Leistung aufgeteilt, die schließlich über Umlenkspiegel radial zur Bearbeitungsstelle geführt werden.

### Ergebnis

Der Durchmesser der am AIST mittels LDFZ gezüchteten Kristalle wurde im Laufe des Projekts von 8 mm auf aktuell 13 mm gesteigert. Des Weiteren wurde ein optisches System entwickelt, mit dem Kristalle mit einem Durchmesser von 38 sowie 51 mm gezüchtet werden können. Das Optiksysteem wird 2020 am Fraunhofer ILT aufgebaut und in Kombination mit einem Diodenlaser mit einer maximalen optischen Ausgangsleistung von 20 kW betrieben.

### Anwendungsfelder

Aktuell werden mit dem LDFZ-Verfahren  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -Kristalle sowie andere Metalloxide gezüchtet und deren Eignung für Anwendungen in der Hochleistungselektronik untersucht.

Dieses Projekt wird im Rahmen des ICON-Programms von der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert.

### Ansprechpartner

Florian Rackerseder M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8012  
florian.rackerseder@ilt.rwth-aachen.de

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Martin Traub  
Telefon +49 241 8906-342  
martin.traub@ilt.fraunhofer.de

## MODELLIERUNG UND SIMULATION OBERFLÄCHEN-EMITTIERENDER HALBLEITER-LASER

### Aufgabenstellung

Oberflächenemittierende Halbleiterlaser (VCSEL) stellen eine an Bedeutung gewinnende Alternative zu Kantenemittern dar. Trotz ihrer geringen Herstellungskosten, der beugungsbegrenzten, schmalbandigen Emission sowie der exzellenten Modularität waren die Anwendungsfelder von VCSEL lange Zeit auf die optische Datenübertragung und die Sensorik begrenzt, da sich insbesondere die gute Strahlqualität nur bei einzelnen mW pro Einzelemitter realisieren ließ. Seit einigen Jahren arbeitet das Fraunhofer ILT in enger Zusammenarbeit mit TRUMPF Photonic Components GmbH an der Verbesserung von VCSEL für den Hochleistungsbereich. Neben der Brillanzsteigerung von Hochleistungs-VCSEL durch externe Resonatoren liegt der Fokus der Fraunhofer ILT-Aktivitäten gegenwärtig auf der Erarbeitung von Chipdesigns für selektiv ansteuerbare VCSEL-Arrays hoher Pulsenergie für den Einsatz in Fahrassistenz-LIDAR-Systemen.

### Vorgehensweise

Mit Hilfe der am Fraunhofer ILT entwickelten Software SEMSIS werden verschiedene in Halbleiterlasern relevante physikalische Phänomene isoliert oder gekoppelt simuliert. Dazu zählen der elektrische Transport sowie die Wärme- und Lichtausbreitung in Halbleiternanostrukturen oder die optischen Eigenschaften lichtverstärkender Quantenfilmstrukturen. In enger Anbindung an experimentelle Arbeiten werden mittels Computersimulationen real gefertigte oder potenzielle Halbleiterlaserstrukturen im Hinblick auf die erzielbaren Laserparameter untersucht.

### Ergebnis

Die Software ermöglicht die Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses der spezifischen Laserkenngrößen und deren limitierende Effekte sowie die Auslegung neuartiger Halbleiterstrukturen, die im Hinblick auf Strahlqualität, Ausgangsleistung oder Pulsparameter optimiert werden. Dadurch können kosten- und zeitaufwendige Parameterstudien an real gefertigten Halbleiterlasern deutlich reduziert werden.

### Anwendungsfelder

Neben den klassischen Anwendungsfeldern der optischen Datenübertragung und Sensorik finden Oberflächenemitter heute auch vermehrt im Hochleistungsbereich, z. B. in der Wärmebehandlung von Werkstoffen, Verwendung. Die Möglichkeit der dynamischen Erzeugung flexibler Intensitätsprofile durch selektiv ansteuerbare VCSEL-Arrays macht diese neben dem hier untersuchten Einsatz in Fahrassistenz-LIDAR-Systemen auch zu interessanten Strahlquellen für die digitale Produktion.

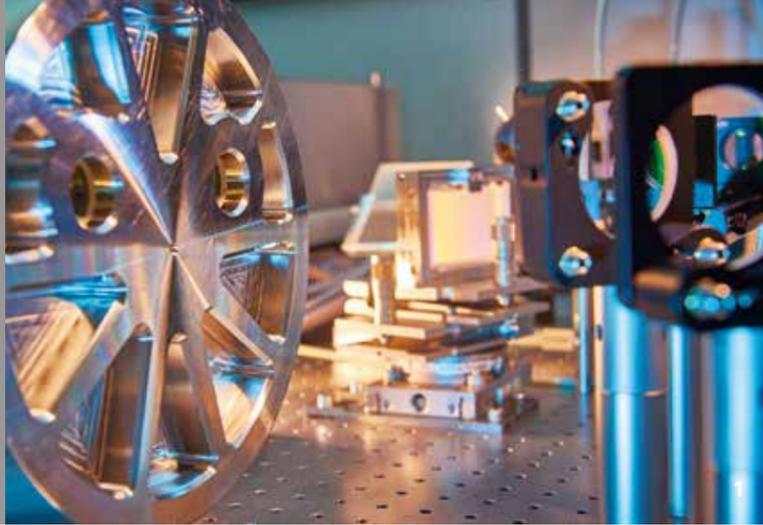
Teile der in diesem Bericht vorgestellten Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N14895 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Thomas Schwarz  
Telefon +49 241 8906-565  
thomas.schwarz@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Martin Traub  
Telefon +49 241 8906-342  
martin.traub@ilt.fraunhofer.de

- 3 REM-Aufnahme eines VCSEL-Arrays.
- 4 Simulation der räumlichen Verteilung des elektrostatischen Potentials in einer VCSEL-Halbleiterheterostruktur.



## SKALIERBARER ULTRAKURZ-PULSLASER MIT < 30 FS PULSDAUER UND > 500 W AUSGANGSLEISTUNG

### Aufgabenstellung

Ultrakurzpulslaser basierend auf Ytterbium-dotierten Lasermedien mit Pulsdauern < 1 ps haben sich in vielen wissenschaftlichen und industriellen Anwendungen etabliert. Ihre Leistungsskalierung bis in den kW-Bereich bei Repetitionsraten von einigen 100 kHz ermöglicht hohe Durchsätze und kurze Messzeiten in Industrie und Wissenschaft bei reduzierten Kosten pro Watt. Dieses Potenzial soll auch für Anwendungen erschlossen werden, die deutlich kleinere Pulsdauern unter 100 fs erfordern.

### Vorgehensweise

Pulsdauern < 100 fs können zwar durch andere Lasermaterialien wie z. B. Ti:Saphir direkt adressiert werden, allerdings ist deren Leistung auf Werte unter 100 W begrenzt. Daher ist die nichtlineare Pulskompression leistungsfähiger Ytterbium-basierter Ultrakurzpulslaser naheliegend. Diese wird durch spektrale Verbreiterung in einer gasgefüllten Multipasszelle mit anschließender Kompression durch dispersive Spiegel realisiert. Gegenüber anderen Kompressionsschemata ist dieses Verfahren aufgrund der hohen Effizienz > 90 Prozent und der Abwesenheit begrenzender Aperturen besonders gut für hohe Leistungen geeignet.

1 Pulskompressionseinheit.

### Ergebnis

Zur Demonstration der Skalierbarkeit des Ansatzes wurde ein Lasersystem basierend auf einem kommerziellen Ultrakurzpulslaser, einem 2-stufigen Yb:INNOSLAB-Verstärker und einer nichtlinearen Pulskompression realisiert. Diese besteht aus einer gasgefüllten (4 bar Argon) Multipasszelle (800 mm lang, 22 Umläufe) und einem Kompressor mit 9 dispersiven Spiegeln. Die Pulse des Lasersystems mit 590 fs Pulsdauer und 1,1 mJ Pulsenergie werden hiermit auf 30 fs bei 1,06 mJ Pulsenergie verkürzt (26 GW Pulsspitzenleistung). Bei 500 kHz Repetitionsrate beträgt die Ausgangsleistung 530 W bei nahezu unveränderter Strahlqualität  $M^2 < 1,2$ .

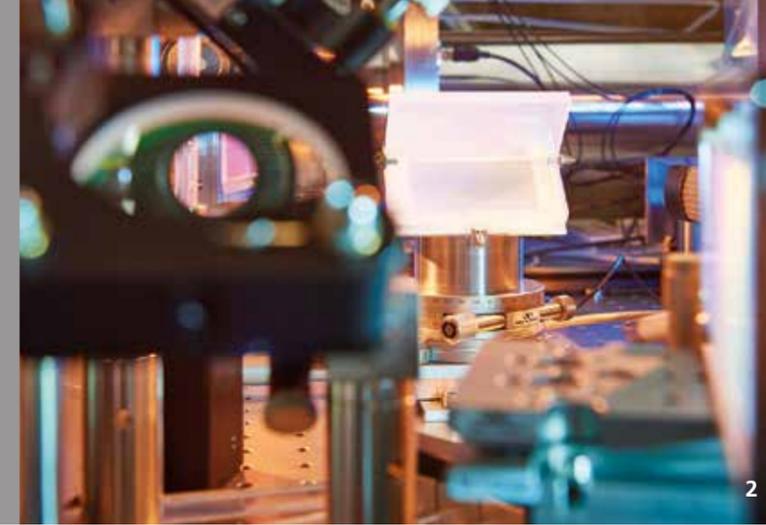
### Anwendungsfelder

Das realisierte Lasersystem kann gewinnbringend eingesetzt werden, wenn besonders kurze bzw. breitbandige Pulse mit hoher mittlerer Leistung erforderlich sind. Das gilt insbesondere für nichtlineare Prozesse wie die Frequenzkonversion in das MIR, EUV oder die Erzeugung von THz-Strahlung. Eine weitere Skalierung der mittleren Leistung auf ~ 2 kW bei ähnlichen Repetitionsraten ist geplant.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N13782 sowie durch das Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources CAPS gefördert.

### Ansprechpartner

Dr. Peter Rußbüldt  
Telefon +49 241 8906-303  
peter.russbueldt@ilt.fraunhofer.de



## FRAUNHOFER CAPS – USER FACILITY FÜR ULTRAKURZ-PULSLASER MIT HÖCHSTEN MITTLEREN LEISTUNGEN

### Aufgabenstellung

Ultrakurzpulslaser ermöglichen die Erschließung neuer Anwendungen durch eine präzise Strukturierung in der Mikromaterialbearbeitung bei minimaler Wärmeeinflusszone und die Erzeugung kohärenter Strahlung im XUV-Bereich. Durch die Skalierung der Leistung von Ultrakurzpulslasern lässt sich diese Präzision auf großflächige Anwendungen mit hohem Durchsatz sowie hochanspruchsvolle Prozesse, wie die Bearbeitung von ultraharten Keramiken und faserverstärkten Kunststoffen, übertragen. In der User Facility des Fraunhofer Clusters of Excellence Advanced Photon Sources CAPS soll Laseranwendern aus Forschung und Industrie eine neue Generation von Ultrakurzpulslasern für Applikationsuntersuchungen bereitgestellt werden.

### Vorgehensweise

Im Rahmen des Fraunhofer CAPS werden Ultrakurzpulslaser entwickelt, deren mittlere Leistung um eine Größenordnung über der von heute verfügbaren Ultrakurzpulsstrahlquellen liegt. Am 18. September 2019 wurde die CAPS User Facility am Fraunhofer ILT offiziell eröffnet mit dem Ziel, diese neuartigen Laserstrahlquellen frühzeitig für Industrie und Forschung bereitzustellen und gemeinsam mit weiteren Fraunhofer-Partnerinstituten die Entwicklung und Untersuchung zukunftsweisender Anwendungen voranzutreiben.

In den nächsten Jahren sind bis zu 10 kW mittlere Ausgangsleistung bei Pulsdauern kleiner als 50 fs geplant. Die Laserstrahlung wird variabel in drei voll ausgestattete Anwenderkabinen geführt. Diese können für die jeweiligen Applikationsuntersuchungen flexibel angepasst werden.

### Ergebnis

Die CAPS User Facility bietet eine einzigartige Gelegenheit für die Industrie und Forschung, optische Prozesse mittels einer Laserstrahlquelle mit bisher unerreichten mittleren Leistungen für Ihre Zwecke zu untersuchen. Im Zuge der Weiterentwicklung des Applikationslabors sind interessierte Personen eingeladen, sich an die unten aufgeführten Ansprechpartner zu wenden.

### Anwendungsfelder

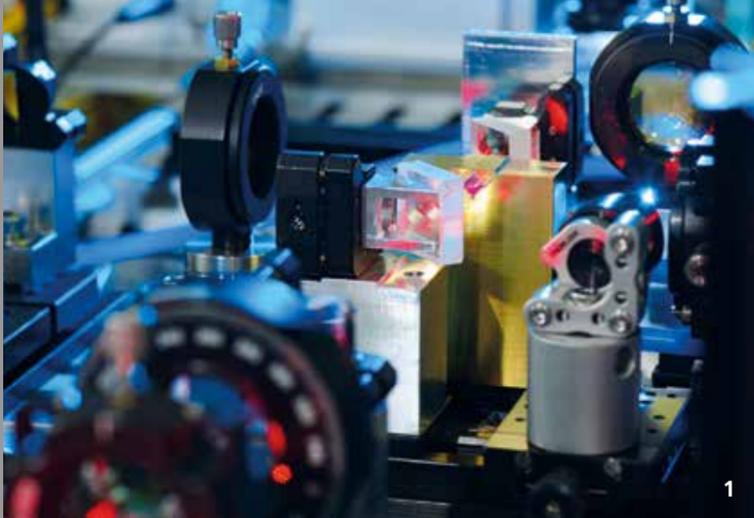
Die vorgesehenen Anwendungen decken ein breites Spektrum in den Bereichen Produktion, Bildgebung, Materialien und Grundlagenforschung ab, wie z. B. die hochpräzise Bearbeitung von Materialien mit hoher Produktivität, die Erzeugung von kohärenter EUV-Strahlung und weicher Röntgenstrahlung für Bildgebungs- und Lithographieprozesse sowie die Modifikation von Materialien für den Einsatz in der Quantentechnologie.

### Ansprechpartner

Marie-Claude Dicaire M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-615  
marie-claude.dicaire@ilt.fraunhofer.de

Dr. Peter Rußbüldt  
Telefon +49 241 8906-303  
peter.russbueldt@ilt.fraunhofer.de

2 Verstärkung der mittleren Leistung von Ultrakurzpulslasern bis 10 kW.



1

## VERSTÄRKER FÜR GEPULSTE LASERSTRAHLUNG MIT 2,9 $\mu\text{m}$ EMISSIONSWELLENLÄNGE

### Aufgabenstellung

Im Rahmen des Fraunhofer-Max-Planck-Kooperationsprojekts DIVESPOT wird die direkte Verstärkung von Laserpulsen im MIR-Bereich mit Ausgangswellenlängen um 3  $\mu\text{m}$ , Pulsdauern unter 1 ns und Repetitionsraten im kHz-Bereich untersucht. Es werden neuartige Verstärkungsmaterialien verwendet, um den Wellenlängenbereich ohne nichtlineare Prozesse adressieren zu können. Ziel ist die Entwicklung eines neuen Werkzeugs für die Chirurgie, z. B. für den Abtrag von Weichgewebe. Laserpulse mit einer Pulsdauer unter 1 ns und einer Wellenlänge um 3  $\mu\text{m}$  ermöglichen durch hohe Absorption und kurze Dauer eine besonders geringe Wärmeeinflusszone. Biologisches Gewebe kann so abgetragen werden, ohne das umliegende Gewebe zu schädigen.

### Vorgehensweise

Als Verstärkungsmedium wird das mit Chrom dotierte II-VI-Verbindungshalbleitermaterial Zinkselenid verwendet. Da die Lumineszenzlebensdauer von Cr:ZnSe im oberen Zustand bei Raumtemperatur nur etwa 5  $\mu\text{s}$  beträgt, muss die optische Leistung für ein effizientes Pumpen in hochenergetischen, kurzen Impulsen bereitgestellt werden. Daher dienen als Pumpquellen gütegeschaltete Thulium-Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 1,9  $\mu\text{m}$  und Pulslängen von wenigen 100 ns.

1 Verstärkerstufe mit Cr:ZnSe Verstärkungsmedium.

Die Laserstrahlquelle wurde als MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) realisiert, wobei eine Seedlaser-Strahlquelle mit wenigen  $\mu\text{J}$  Pulsenergie über zwei stabförmige Verstärkerstufen im zweifachen Durchgang verstärkt wurde.

### Ergebnis

Es wurde ein zweistufiges Laserverstärkersystem basierend auf dem Verstärkungsmedium Cr:ZnSe aufgebaut. Mit diesem System konnte eine maximale Verstärkung von ungefähr 10 gezeigt werden. Bei einer Repetitionsrate von 1 kHz wurde eine Pulsenergie von mehr als 300  $\mu\text{J}$  demonstriert. Die Pulsdauer der Laserstrahlung mit einer Emissionswellenlänge von 2,91  $\mu\text{m}$  betrug ungefähr 1 ns.

### Anwendungsfelder

Laserstrahlquellen im MIR sind zur Verwendung im medizinischen Bereich, z. B. als Laserskalpell für Weichgewebeanwendungen, geeignet aber auch für anderen Materialien, die eine hohe Absorption im MIR aufweisen wie z. B. Kunststoffe. Weiterhin können diese Laserstrahlquellen zur molekularen Spektroskopie verwendet werden.

Das Projekt DIVESPOT wird im Rahmen des Fraunhofer-Max-Planck-Kooperationsprogramms gefördert.

### Ansprechpartner

Benjamin Erben M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-657  
benjamin.erben@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Marco Höfer  
Telefon +49 241 8906-128  
marco.hoefer@ilt.fraunhofer.de



2

## ULTRAKURZPULS-LASERSTRAHLQUELLE BEI 3,4 $\mu\text{m}$ FÜR DIE BEARBEITUNG VON POLYMEREN

### Aufgabenstellung

Die Wellenlänge eines Lasers kann für die Effizienz und Qualität von Laserbearbeitungsprozessen entscheidend sein. Beispielsweise weisen verschiedene Polymere eine ausgeprägte Absorption bei einer Wellenlänge von 3,4  $\mu\text{m}$  auf. Dieser Wellenlängenbereich wird jedoch von kommerziell etablierten Lasern, z. B. Festkörper- und Faserlasern, nicht adressiert. Dagegen ist die Transmission von Polymeren in dem gut erschlossenen Wellenlängenbereich bei 0,5  $\mu\text{m}$  oder 1  $\mu\text{m}$  sehr groß, was das Einbringen von Energie in Material erschwert.

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts IMPULS werden INNOSLAB-basierte modulare ps-Laser hoher Leistung für eine kosten- und leistungseffiziente Ultrakurzpulslaserbearbeitung mit absorptionsangepassten Wellenlängen untersucht. Für die effiziente Bearbeitung von Polymeren wird die Ausgangswellenlänge dieser Laser mittels nichtlinearer Frequenzkonversion gezielt an das Absorptionsmaximum der Polymere angepasst.

### Vorgehensweise

Im Projekt IMPULS werden verschiedene konzeptionelle Ansätze für die parametrische Frequenzkonversion von 1  $\mu\text{m}$  nach 3,4  $\mu\text{m}$  untersucht. Diese bestehen aus einem optisch-parametrischen Generator sowie optional aus einem oder mehreren nachgeschalteten optisch-parametrischen Verstärkern, in denen PPLN-Kristalle mit großen Aperturen als nichtlineare Medien zum Einsatz kommen.

### Ergebnis

Auf Basis eines dreistufigen, parametrischen Frequenzkonverters wurde eine Strahlquelle mit einer mittleren Ausgangsleistung von 15 W bei einer Emissionswellenlänge von 3,4  $\mu\text{m}$ , einer Pulsdauer von 10 ps und Pulsfrequenzen von 300 kHz bis 1 MHz realisiert.

### Anwendungsfelder

Die hier entwickelte Strahlquelle kann zum Strukturieren und Schneiden von Polymerfolien, z. B. PE, PEN und PP, eingesetzt werden. Die Analyse von parametergleichen Schneidexperimenten bei 1  $\mu\text{m}$  und 3,4  $\mu\text{m}$  Wellenlänge zeigt, dass durch die optimierte Wellenlänge Schnitte bei 20- bis 50-fach geringerer Leistung möglich sind. Außerdem zeigen Schnittkanten bei einer Prozesswellenlänge von 1  $\mu\text{m}$  aufgrund des höheren Wärmeeintrags eine ausgeprägte Neigung zu Farbumschlägen. Dies tritt bei einer Wellenlänge von 3,4  $\mu\text{m}$  nicht oder nur in deutlich vermindertem Maße auf.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N13966 durchgeführt.

### Ansprechpartner

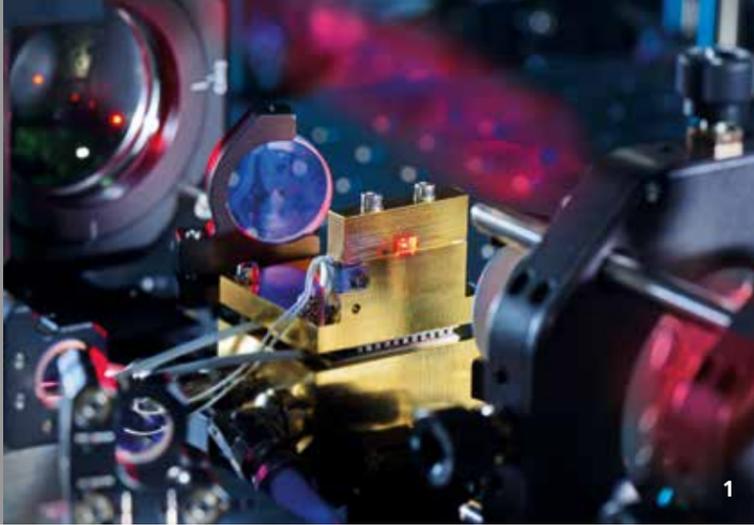
Dr. Sebastian Nyga  
Telefon +49 241 8906-123  
sebastian.nyga@ilt.fraunhofer.de

Dr. Bernd Jungbluth  
Telefon +49 241 8906-414  
bernd.jungbluth@ilt.fraunhofer.de

Schnittfuge in PEN-Folie:

2 ... nach Laserschnitt mit 3,4  $\mu\text{m}$  Wellenlänge.

3 ... nach Laserschnitt mit 1  $\mu\text{m}$  Wellenlänge.



1

## KONTINUIERLICH DIODENGEPUMPTER ALEXANDRIT-LASER MIT 6,5 W AUSGANGSLEISTUNG

### Aufgabenstellung

Kontinuierlich emittierende diodengepumpte Alexandrit-Laser sind aktuell Gegenstand der Forschung und bieten mit dem Abstimmbereich zwischen 700 - 800 nm Zugang zu Atom- und Ionen-Resonanzlinien. Das Pumpen von Alexandrit mit Laserdioden im roten Spektralbereich hat den Vorteil eines größeren Wirkungsgrads, eines verkleinerten Bauraums und kleinerer thermischer Last verglichen mit dem Pumpen mittels Blitzlampen. Zur Erweiterung des Anwendungspotenzials soll hier die Ausgangsleistung im transversalen Grundmode gegenüber dem Stand der Technik vergrößert werden.

### Vorgehensweise

Die Skalierung zu größeren Laserleistungen wird am Laboraufbau eines longitudinal diodengepumpten Alexandrit-Lasers durchgeführt. Dabei wird der Alexandrit-Kristall longitudinal mit Laserstrahlung der Wellenlänge 638 nm gepumpt. Dazu werden die Ausgangsstrahlen zweier kommerzieller Diodenmodule polarisationsgekoppelt und transversal mit einem Treppenspiegel symmetrisiert. Es wird eine Gesamtpumpleistung bis 58 W bei einer Strahlqualität von  $M_x^2 = 100$  bzw.  $M_y^2 = 110$  erreicht.

1 Kontinuierlich diodengepumpter Alexandrit-Laser.

### Ergebnis

Mit dem Alexandrit-Laser wird im Grundmodebetrieb ( $M^2 = 1,1$ ) eine Dauerstrichleistung von 6,5 W bei 25 W absorbierter Pumpleistung demonstriert und damit der aktuelle Rekordwert bei diodengepumpten Alexandrit-Lasern. Die freilaufende Wellenlänge bei maximaler Leistung beträgt 752 nm.

Das Ergebnis unterstreicht das Potenzial diodengepumpter Alexandrit-Laser zur Emission von in einem weiten Spektralbereich abstimmbarer Laserstrahlung mit mittleren Ausgangsleistungen im Watt-Bereich. Aktuelle Untersuchungen adressieren das bessere Verständnis thermischer Effekte im Kristall, um den Laser bei noch größeren Pumpleistungen effizient betreiben zu können.

### Anwendungsfelder

Aufgrund der großen Verstärkungsbandbreite von Alexandrit kann die Anordnung erweitert werden, um mittels Modenkoppeln die Erzeugung ultrakurzer Pulse zu untersuchen. Weiterhin bietet eine resonatorinterne Frequenzverdopplung die Möglichkeit, in nur einem einzigen Konversionsschritt abstimmbare Laserstrahlung im UV zu erzeugen.

### Ansprechpartner

Martin Walochnik M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-394  
martin.walochnik@ilt.rwth-aachen.de

Dr. Bernd Jungbluth  
Telefon +49 241 8906-414  
bernd.jungbluth@ilt.fraunhofer.de



2

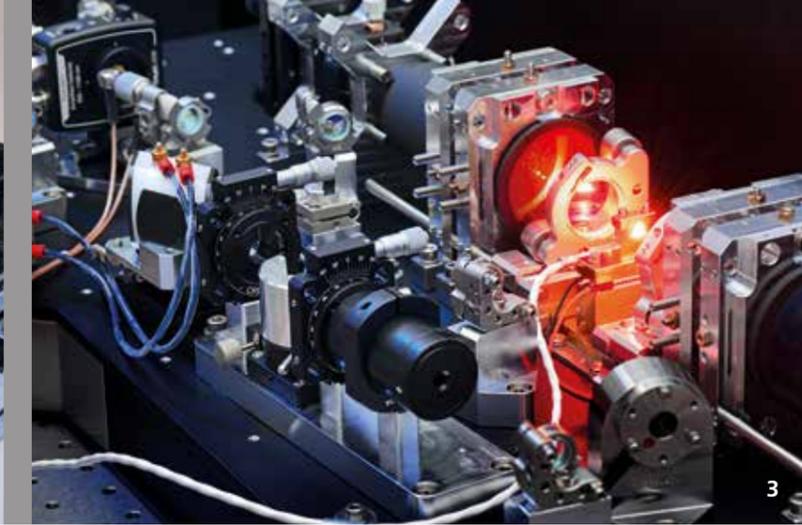
## DIODENGEPUMPTER ALEXANDRIT-LASER FÜR EIN KOMPAKTES LIDAR-SYSTEM

### Aufgabenstellung

Zur Messung von Temperaturprofilen der Atmosphäre in Höhen zwischen 80 bis 110 km werden am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP) mobile Resonanz-LIDAR-Systeme eingesetzt. Dabei wird als Maß für die Temperatur die Dopplerbreite einer Metall-Resonanzlinie spektroskopisch ermittelt. Als Laseremitter wurden lange blitzlampengepumpte Alexandrit-Ringlaser eingesetzt. Durch die erfolgreiche Entwicklung eines ersten diodengepumpten Alexandrit-Lasers konnte die Effizienz wesentlich gesteigert und der Bauraum reduziert werden. Mit Hilfe von innovativer LIDAR-Technologie wurde auf dieser Basis gemeinsam ein neuartiges kompaktes LIDAR-System ( $\sim 1\text{m}^3$ ) entwickelt, mit dem die gesamte Atmosphäre von der Troposphäre bis zur unteren Thermosphäre vermessen werden kann. Dafür wurde am Fraunhofer ILT ein verbesserter Prototyp des Lasers entwickelt und in ein erstes LIDAR-System integriert.

### Vorgehensweise

Bei dem Prototyp handelt es sich um einen gütegeschalteten Alexandrit-Ringlaser. Die Pumpquelle ist fasergekoppelt, wodurch Flexibilität und Wartbarkeit erhöht werden, und basiert auf zwei kommerziellen Diodenlasermodulen, die im kontinuierlichen Betrieb jeweils bis zu 40 W mittlere Leistung bei 638 nm emittieren. Durch »Seeding« mit einem schmalbandigen Diodenlaser und elektronischer Regelung der Resonatorlänge wird ein stabiler Einfrequenzbetrieb realisiert. Mit der Wellenlänge des Seeders lässt sich auch die Ausgangswellenlänge des Alexandrit-Lasers im Bereich der Kalium-Resonanz kontinuierlich durchstimmen.



3

Nach der Fertigstellung im Labor wurde der Laser in das System des IAP integriert, das neben den Peripheriegeräten des Lasers auch die gesamte LIDAR-Technik enthält.

### Ergebnis

Im transversalen Grundmode-Betrieb ( $M^2 < 1,1$ ) emittiert der Laser bei einer Wellenlänge von 770 nm Pulse mit einer Energie von 1,7 mJ und einer Repetitionsrate von 500 Hz. Die Pulsdauer beträgt 800 ns bei einer spektralen Bandbreite von weniger als 5 MHz. Damit konnten der Gesamtbauraum inklusive der Kühltechnik sowie der Energiebedarf jeweils um einen Faktor 100 reduziert werden im Vergleich zu dem bisherigen LIDAR-System mit blitzlampengepumptem Laser.

### Anwendungsfelder

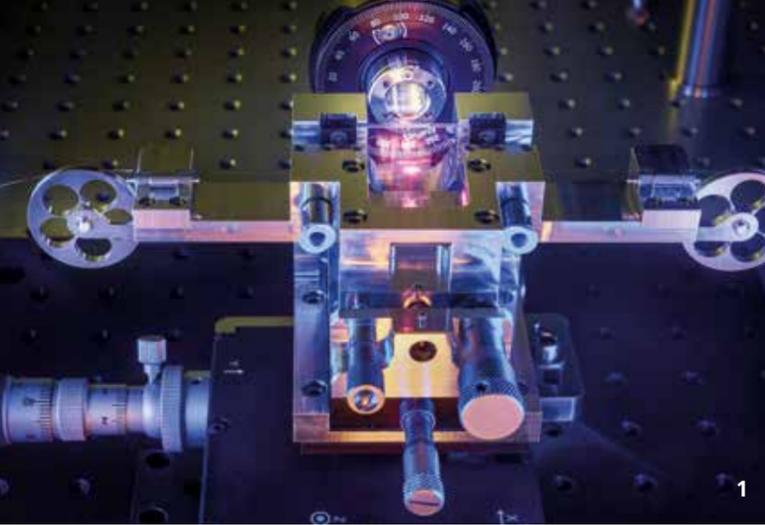
Im nächsten Schritt werden mehrere solcher Systeme gebaut und zu einem LIDAR-Array mit einer räumlichen Abdeckung über viele 100 Kilometer kombiniert. In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsvorhaben ALISE (FKZ 50RP1605) untersuchten das Fraunhofer ILT und das Leibniz IAP auch die Umsetzung der Technologie für die satellitengestützte Atmosphärenforschung.

### Ansprechpartner

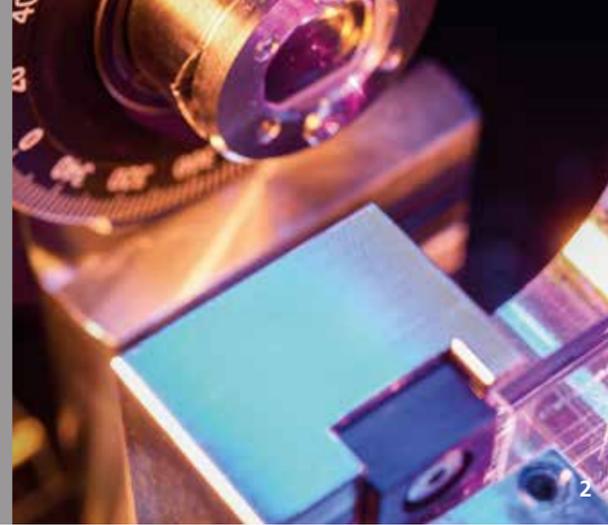
Dr. Michael Strotkamp  
Telefon +49 241 8906-132  
michael.strotkamp@ilt.fraunhofer.de

Dr. Bernd Jungbluth  
Telefon +49 241 8906-414  
bernd.jungbluth@ilt.fraunhofer.de

2 In LIDAR-System integrierter Alexandrit-Laser, © Leibniz IAP, Kühlungsborn.  
3 Diodengepumpter Alexandrit-Laser.



1



2



3

## MULTIMODE-FASER-BRAGG-GITTER ALS AUSKOPPELSPIEGEL FÜR XLMA-BASIERTE FASERLASER

### Aufgabenstellung

Multimodige Faserlaser gehören zu den preisgünstigsten und effizientesten Strahlquellen für cw-Laserapplikationen und werden deshalb für viele Anwendungen eingesetzt. Der Resonator wird dabei meist aus der aktiven Laserfaser und dichroitischen Spiegeln gebildet. Faser-Bragg-Gitter (FBG) sind in Fasern geschriebene, periodische Modulationen des Brechungsindex und fungieren als faserintegrierte, wellenlängenselektive Spiegel. FBG werden bislang in transversal monomodigen Faserlaseroszillatoren eingesetzt. Im Rahmen des BMBF-Projekts EKOLAS sollen Faser-Bragg-Gitter für transversal multimodige Faserlaser als Auskoppelspiegel entwickelt werden. Dies ermöglicht den Aufbau eines faserintegrierten Resonators, sodass die Anzahl optischer Elemente reduziert und damit die mechanische Robustheit des Systems erhöht werden kann.

### Vorgehensweise

Die periodische Modulation des Brechungsindex wird unter Verwendung eines UKP-Lasers im infraroten Emissionsbereich und Zweistrahlinterferenz in den Faserkern geschrieben. Grundlage des Einschreibeverfahrens ist die nichtlineare

1 *FBG-Workstation.*

2 *Langzeitbelichtung des FBG-Schreibprozesses mittels UKP-Laserstrahlung.*

Absorption im Glas, wodurch eine Vorbehandlung der Faser entfällt. Daher ist das Verfahren für eine Vielzahl von kommerziell verfügbaren undotierten und dotierten Fasern einsetzbar.

### Ergebnis

Mit dem im Rahmen des Projekts entwickelten Aufbau wurden FBG mit Reflexionskoeffizienten von < 10 Prozent als faserintegrierte Auskoppelspiegel in aktive »extra large mode area (XLMA)« Fasern geschrieben und in Laserresonatoren mit Ausgangsleistungen bis 800 W getestet. Durch ihre Eigenschaft als wellenlängenselektive Spiegel fungieren FBG gleichzeitig als frequenzstabilisierendes Element und können so zur Verbesserung der spektralen Brillanz des Lasersystems genutzt werden.

### Anwendungsfelder

Die Technologie bietet für fasergekoppelte Multimode-Hochleistungsfaserlaser die Möglichkeit, den Auskoppelspiegel und gleichzeitig die Frequenzstabilisierung faserintegriert zu realisieren und so auf zusätzliche optische Elemente zu verzichten.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N13914 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Sarah Klein M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8363  
sarah.klein@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Oliver Fitzau  
Telefon +49 241 8906-442  
oliver.fitzau@ilt.fraunhofer.de

## ENTWICKLUNG EINER HERMETISCH DICHTEN, GELÖTETEN FASERDURCHFÜHRUNG

### Aufgabenstellung

Optische Glasfasern zur Führung von Laserstrahlung benötigen Schnittstellen, die meist in Form von Fasersteckern und -durchführungen realisiert werden. Bei speziellen Anwendungen, z. B. bei Hochleistungselektroniken, besonderen Messsystemen und in der Raumfahrttechnik, befindet sich das optische System im Vakuum oder einer Schutzgasumgebung, sodass jede Außenschnittstelle vakuumdicht abgeschlossen werden muss. Die dafür eingesetzten Faserdurchführungen sollten das optische System ausreichend hermetisch abdichten, um Kontaminationen zu vermeiden. Das Montageverfahren darf die optischen Eigenschaften der Faser dabei nicht beeinträchtigen. Aus diesem Grund soll eine vakuumdichte Faserdurchführung mittels Löttechnologie entwickelt werden.

### Vorgehensweise

Die Faser wird in eine Faserdurchführung montiert, die speziell für die Löttechnik sowie eine hermetische Abdichtung ausgelegt ist. Mit geeigneten Loten lassen sich Fasern auf metallische und nicht metallische Substrate unter Umgebungsbedingungen montieren. Zunächst wird ein Verfahren zur Benetzung der Faser und der Faserdurchführung mit dem Lot eingesetzt. Beim Benetzungsprozess ist keine Vermittlerschicht in Form einer Metallisierung notwendig. Zur Reduzierung thermisch induzierter Spannungen ist der Einsatz von Weichloten vorteilhaft.

### Ergebnis

Optische Messungen zeigen, dass die Löttechnik bei polarisationserhaltenden Fasern kaum Einfluss auf die Strahleigenschaften nach der Faser hat. Da die Faser ohne Faserstecker montiert wird, entstehen an dieser Stelle ebenfalls keine Leistungsverluste. Die Dichtigkeit der Faserdurchführung wurde mittels Druckanstiegsprüfung ermittelt und eine Leckrate von  $Q \leq 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  nachgewiesen. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Schnittstelle können, im Gegensatz zu herkömmlichen Montageverfahren, höhere optische Leistungen übertragen werden. Die mechanische Festigkeit der Lötverbindungen wurde durch Zugprüfungen nachgewiesen.

### Anwendungsfelder

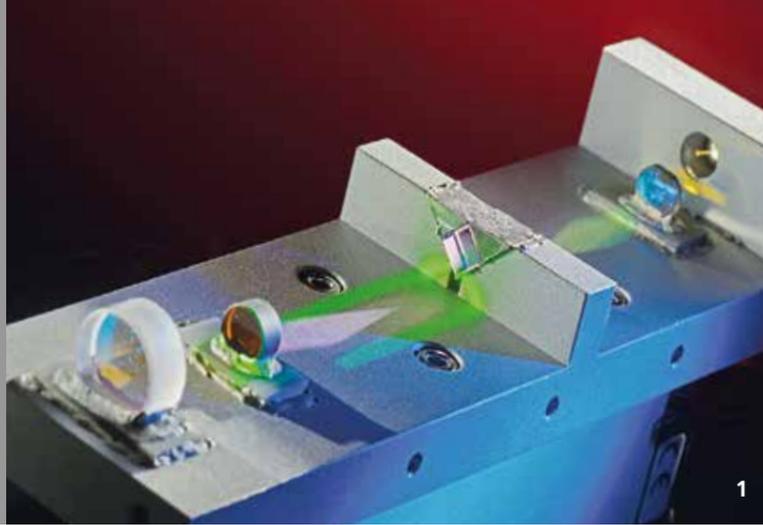
Durch das Montagekonzept mittels Lötverfahren kann der Prozess der Fasermontage wirtschaftlicher und effizienter gestaltet werden. Neben robuster, hermetisch dichter und ausgasungsfreier Fasermontage ermöglicht das Montagekonzept den Aufbau von langzeitstabilen und vakuumdichten Faserdurchführungen für den Einsatz in Industrie und Forschung.

### Ansprechpartner

Witalij Wirz M. Eng.  
Telefon +49 241 8906-8312  
witalij.wirz@ilt.fraunhofer.de

Dr. Heinrich Faidel  
Telefon +49 241 8906-592  
heinrich.faidel@ilt.fraunhofer.de

3 *Metall-Faser-Lötverbindung.*



1

## MONTAGETECHNIK FÜR KOMPACTE OPTO- MECHANISCHE BAUGRUPPEN

### Aufgabenstellung

Die Löttechnik ermöglicht den Aufbau robuster, ausgangsfreier und langzeitstabiler optischer Komponenten und Systeme. Ziel ist das flussmittelfreie Fügen schwer benetzbarer Materialien ohne eine Vermittlerschicht, sodass Arbeitsschritte wie z. B. das Metallisieren von Komponenten entfallen. Die Technik kann auch in Umgebungsluft eingesetzt werden. Dadurch können sowohl Geräte als auch Arbeitsschritte zur Herstellung einer Schutzgasatmosphäre, wie bei klassischen Löttechniken, eingespart werden. Es soll eine Montagetechnik entwickelt werden, die für den Aufbau kompakter Laserstrahlquellen eingesetzt werden kann.

### Vorgehensweise

Mit der Montagetechnik wird ein am Fraunhofer ILT entwickelter Festkörperlaser aufgebaut. Alle optischen Komponenten werden mit der o. g. Löttechnik montiert. Die aktiv zu justierenden Komponenten werden mittels Pick&Align-Justagetechnik ausgerichtet, die speziell für die Justage optomechanischer Komponenten in der Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde. Durch die induktive Wärmezufuhr und unterschiedliche Lotsysteme lassen sich optische Komponenten auf begrenztem Raum einzeln montieren und justieren. Zur Reduzierung thermisch induzierter Spannungen ist der Einsatz von Weichloten vorteilhaft.

### Ergebnis

Der Aufbau einer voll funktionsfähigen Laserstrahlquelle mittels Löttechnik wurde demonstriert. Dabei wird dieselbe Performance wie mit klassischen Optikhaltern erreicht. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Schnittstellen kann, im Gegensatz zu herkömmlichen Montageverfahren, die Wärme aus dem System optimal abgeführt werden, sodass eine schnelle Thermalisierung des Lasers erreicht wird. Die Abmaße der aufgebauten Laserstrahlquelle betragen 153 x 40 x 20 mm<sup>3</sup>. Die mechanische Festigkeit der Lötverbindungen wurde durch Zugprüfungen nachgewiesen. Im weiteren Verlauf wird der Aufbau Temperaturzyklus-, Vibrations- und Schocktests unterzogen.

### Anwendungsfelder

Durch das innovative Konzept kann der Montageprozess wirtschaftlicher und effizienter gestaltet werden. Die entwickelte Montagetechnik ermöglicht den Aufbau kompakter, robuster und langzeitstabiler Laserstrahlquellen. Diese können z. B. für die Beschriftung und Markierung, die Mess- und Medizintechnik sowie bei miniaturisierten, komplexen Systemen im Bereich der Quantentechnologien eingesetzt werden. Mit dem Montagekonzept eröffnet sich ein breites Einsatzgebiet in Industrie und Forschung.

### Ansprechpartner

Witalij Wirz M. Eng.  
Telefon +49 241 8906-8312  
witalij.wirz@ilt.fraunhofer.de

Dr. Heinrich Faidel  
Telefon +49 241 8906-592  
heinrich.faidel@ilt.fraunhofer.de

1 Gesamtansicht des Lasersystems.



2

## BAKEOUT FACILITY ZUR REINIGUNG VON OPTOMECHANISCHEN KOMPONENTEN

### Aufgabenstellung

Um die Komponenten des Lasers für das satellitengestützte Methan-LIDAR MERLIN für dessen Weltraummission zu reinigen, wird am Fraunhofer ILT in enger Zusammenarbeit mit Airbus Defence and Space (ADS) GmbH in Ottobrunn eine sogenannte »Bakeout Facility« aufgebaut. Zusätzlich zur manuellen Reinigung wird beim Bakeout in einem kontrolliert hervorgerufenen Ausgasungsprozess, welcher unter Vakuum und durch das Aufheizen der Komponenten erzeugt wird, die molekulare Kontamination des zu reinigenden Bauteils entfernt. Interessant ist dieser Prozess für hochintegrierte und komplexe Komponenten, bei denen eine manuelle Reinigung allein keine zufriedenstellende Sauberkeit des Bauteils garantiert.

### Vorgehensweise

Die Vakuumkammer der Bakeout Facility soll über ein Volumen von 750 x 750 x 750 mm<sup>3</sup> verfügen, welches durch ein Pumpensystem auf ein Vakuum von  $\leq 1E-6$  mbar evakuiert werden kann. Das Aufheizen der zu reinigenden Bauteile erfolgt über Heizwiderstände, sodass Temperaturen von bis zu 120 °C erreicht werden sollen. Zur Messung der verbleibenden Kontamination wird ein sogenannter »Thermoelectric Quartz Crystal Microbalances (TQCM)«-Sensor eingesetzt. Um eine Verfälschung des Messergebnisses des TQCM-Sensors durch hohe Anlagerung von Kontaminationen zu vermeiden, wurde am Fraunhofer ILT eine Kältefalle konzipiert und aufgebaut. Diese Kältefalle besteht aus mehrstufigen Peltierelementen und dem mechanischen System.

### Ergebnis

Mit der entwickelten Bakeout Facility können nach jetzigem Stand Drücke bis zu 4E-7 mbar und Heiztemperaturen bis zu 100 °C realisiert werden. Mit der Peltierelement-basierten Kältefalle konnten bereits -40 °C demonstriert werden. In Zukunft sollen Heiztemperaturen von 120 °C und Kältefallentemperaturen von -45 °C gezeigt werden. Zur Validierung des Bakeout-Prozesses und der Sauberkeit der Anlage werden in den nächsten Monaten Auswertungs- und Abnahmetests mit ADS Ottobrunn durchgeführt.

### Anwendungsfelder

Für die Bereitstellung kontaminationsfreier Flughardware für die Raumfahrt sind Bakeout Facilities wichtige Anlagen. Aufgrund der hohen Sauberkeitsstandards können diese Anlagen außerdem eine wichtige Rolle beim Aufbau von Festkörperlasern, Frequenzkonvertern, UV-Optiken oder Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern spielen.

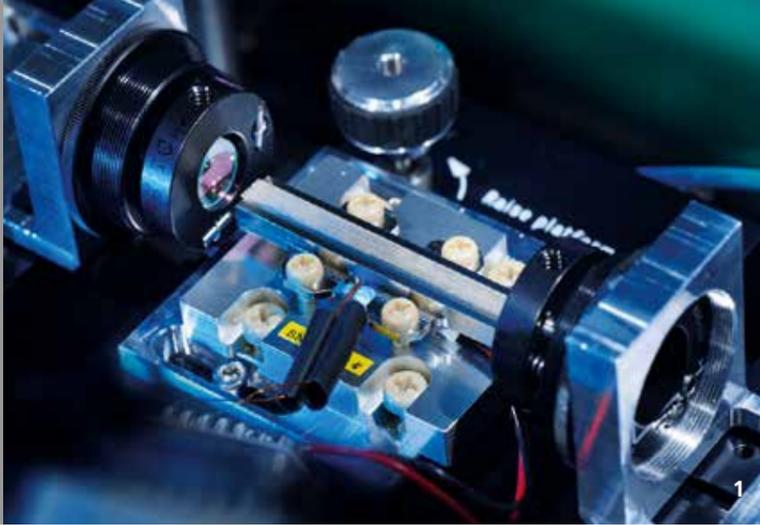
Ein besonderer Dank gilt ADS Ottobrunn für die Konzeptionierung der Anlage und die fortlaufende Unterstützung im Validierungsprozess.

### Ansprechpartner

Patricia Betz M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-623  
patricia.betz@ilt.fraunhofer.de

Dr. Heinrich Faidel  
Telefon +49 241 8906-592  
heinrich.faidel@ilt.fraunhofer.de

2 Bakeout Facility.



## EFFIZIENTE FREQUENZ-KONVERSION FÜR QUANTEN-KOMMUNIKATION IN GLASFASERNETZWERKEN

### Aufgabenstellung

Leistungsfähige Quantencomputer und Quantennetzwerke werden völlig neuartige Anwendungen ermöglichen, die mit klassischen Computern nicht realisierbar sind. Für glasfasergebundene Quantennetzwerke ist die Verwendung photonischer Quantenbits (Qubits) im Bereich des verlustarmen Telekom-C-Bands um  $1,55 \mu\text{m}$  zur Erzielung hoher Reichweiten obligatorisch. Festkörperbasierte Spin-Qubits sind eine aussichtsreiche Plattform, um skalierbare Quantencomputer zu realisieren. Diese können zur optischen Kopplung mehrerer Qubits Photonen im Wellenlängenbereich  $800 - 900 \text{ nm}$  emittieren (sog. »fliegende Qubits«). Zur Umsetzung der Wellenlängen in die Telekom-Bänder werden optische Schnittstellen in Form von Quantenfrequenzkonvertern (QFC) benötigt.

### Vorgehensweise

Bei der Quantenfrequenzkonversion (QFC) wird die Wellenlänge von Einzelphotonen, die als »fliegende« Qubits dienen, gezielt geändert, ohne dabei weitere Eigenschaften der Photonen zu verändern. Ein erster Schritt für die Entwicklung von effizienten Quantenfrequenzkonvertern ist somit die Demonstration einer hocheffizienten Frequenzkonversion von Einzelphotonen oder klassischen Eingangsfeldern mit hinreichend kleiner Leistung. Zur Konversion wird, analog

zur klassischen parametrischen Frequenzkonversion, neben den Eingangs- und Ausgangsfeldern ein leistungsstarker Laser zum Treiben des Konversionsprozesses in nichtlinearen Kristallen eingesetzt.

### Ergebnis

Auf Basis eines periodisch-gepolten Lithiumniobat (PPLN)-Wellenleiters, der mit einem kommerziellen Faserlaser bei  $1950 \text{ nm}$  gepumpt wird, wurde die Frequenzkonversion von  $856 \text{ nm}$  nach  $1526 \text{ nm}$  mit einer Effizienz von 87 Prozent nachgewiesen. Die Eingangsleistung bei  $856 \text{ nm}$  lag dazu bei  $1,8 \text{ mW}$ . In einem nächsten Schritt wird nun die Konversion von einzelnen Photonen bei  $856 \text{ nm}$  untersucht, wobei eine ähnliche Effizienz angestrebt und erwartet wird.

### Anwendungsfelder

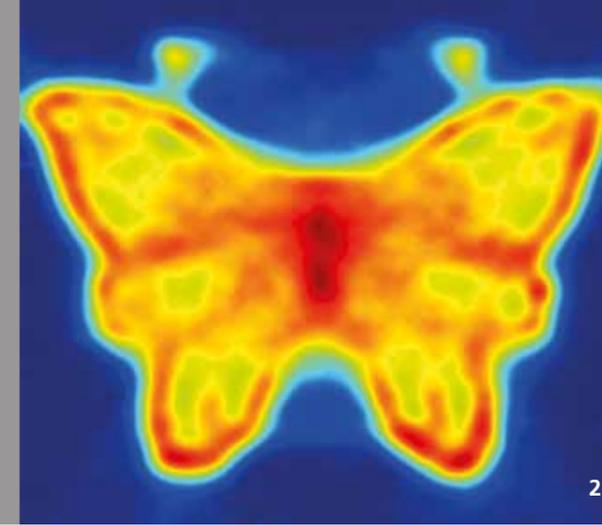
Die hier demonstrierte Konversion ist ein erster Schritt zur Umsetzung effizienter Quantenfrequenzkonverter, die eine Schlüsselkomponente für zukünftige Quantennetzwerke darstellt. Quantenfrequenzkonverter sind weiterhin eine Schlüsselkomponente für die Realisierung von Quantenrepeatern.

### Ansprechpartner

Florian Elsen M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-224  
florian.elsen@ilt.fraunhofer.de

Dr. Bernd Jungbluth  
Telefon +49 241 8906-414  
bernd.jungbluth@ilt.fraunhofer.de

1 Aufbau zur Frequenzkonversion von Einzelphotonen in Wellenleitern.



## AUSLEGUNG VON FREIFORMOPTIKEN FÜR TEILKOHÄRENTE LASERSTRAHLUNG

### Aufgabenstellung

Freiformoptiken erlauben flexible Strahlformung zur Erzeugung von angepassten Intensitätsverteilungen. Für Laserstrahlquellen sind die Methoden zur Auslegung von Freiformoptiken bisher auf entweder vollständig kohärente oder vollständig inkohärente Quellen beschränkt. Da sich Laserstrahlquellen oft teilkohärent verhalten, ist eine Anpassung der Methoden erforderlich.

### Vorgehensweise

Um die Teilkohärenz von Strahlung berücksichtigen zu können, ist eine alternative Definition für die Strahldichte implementiert worden, die den Wellencharakter und die Kohärenzeigenschaften des Lichts in ein Raytracing-Modell überträgt. Diese Implementierung ermöglicht die Modifikation von am Fraunhofer ILT bereits existierenden Auslegungsalgorithmen für inkohärente Strahlung zur Betrachtung von Quellen mit beliebigen Kohärenzeigenschaften.



### Ergebnis

Mit dem weiterentwickelten Algorithmus besteht nun die Möglichkeit, Freiformoptiken für verschiedene Anwendungen zu realisieren. Dabei können insbesondere die Zielintensitätsverteilung sowie die Laserstrahlquelle frei vorgegeben werden. Durch die effiziente Implementierung über Raytracing ist auch der Berechnungsaufwand minimiert. Weiterhin können die bei Transmission durch optische Elemente veränderten Kohärenzeigenschaften berechnet werden.

### Anwendungsfelder

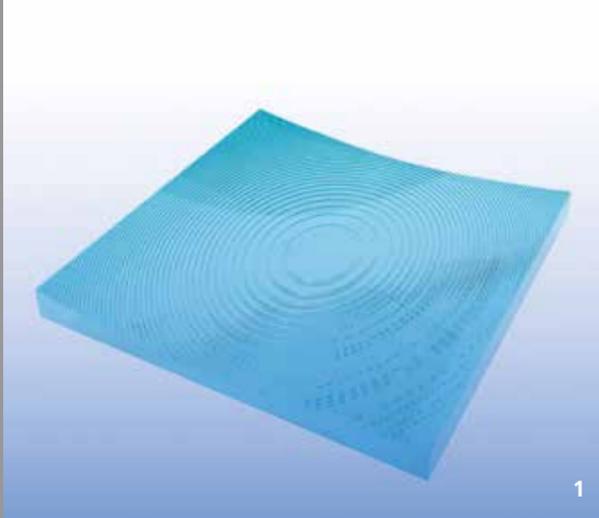
Die implementierte Methode kann für die Auslegung von Freiformoptiken zur anwendungsangepassten Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung verwendet werden. Weiteres Potenzial bietet die Analyse des Transformationsverhaltens der Kohärenzeigenschaften beliebiger Quellen nach Transmission durch optische Elemente.

### Ansprechpartner

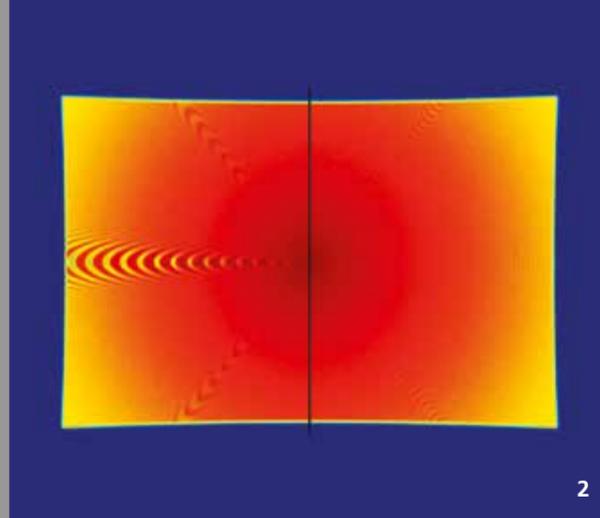
Paul Buske M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-359  
paul.buske@tos.rwth-aachen.de

Annika Völl M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8369  
annika.voell@tos.rwth-aachen.de

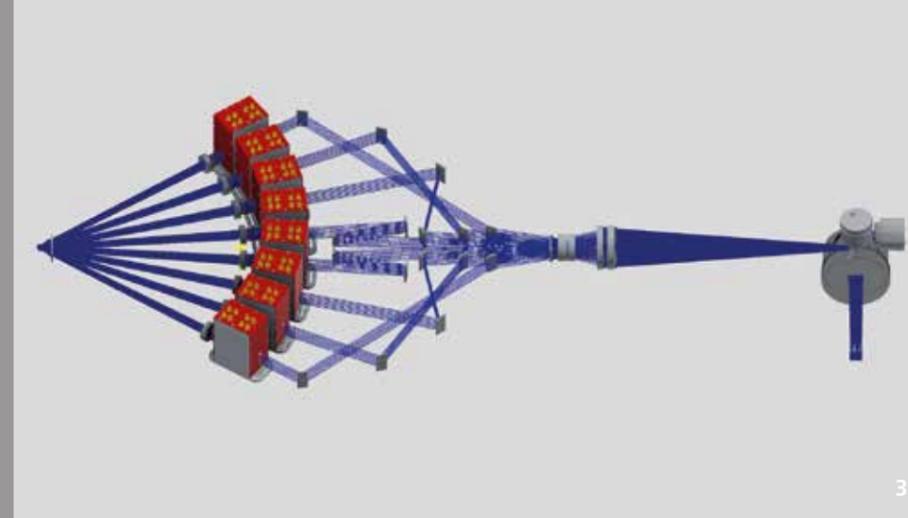
2 Mit einer Freiformoptik simulierte Beleuchtungsstärkeverteilung für eine teilkohärente Laserstrahlquelle.  
3 Berechnete Oberfläche zur Erzeugung der Beleuchtungsstärkeverteilung.



1



2



3

## SCHNELLES RAYTRACING SEGMENTIERTER FREIFORM-LINSEN

### Aufgabenstellung

Nicht-rotationssymmetrische Freiformoptiken werden zunehmend in Consumer-Produkten eingesetzt. Um das Gewicht und den Materialverbrauch sowie die Produktionszeit und damit die Kosten zu reduzieren, kann die Bauteilgröße der Optik durch Fresnelisierung minimiert werden. Da ein Teil des Lichts an den Segmentgrenzen gebrochen wird, nimmt die Qualität der Abbildung ab. Durch Anpassung der Segmentgrenzen an die Optik sowie die Lichtquelle kann der Effekt reduziert werden. Dies gilt besonders für Freiformoptiken, da durch die hohe Anzahl an Freiheitsgraden die Höhenlinien in der Regel keine Rotationssymmetrie aufweisen. Grundlage für die Auslegung einer individuellen Fresnelisierung ist eine wiederholte Abbildung der segmentierten Freiformlinse mittels Raytracing, welches aufgrund der hohen Anzahl an Freiheitsgraden der Freiformoptik sowie der zusätzlichen Fresnelisierung rechenintensiv ist.

### Vorgehensweise

Zur Auslegung von fresnelisierten Freiformoptiken wurde ein problemangepasster Algorithmus implementiert, der ein effizientes Raytracing ermöglicht. Aus der Freiformoberfläche wird dabei die Segmentierung automatisch berechnet

1 Design einer segmentierten Freiformoptik.

2 Simulierte Intensitätsverteilung einer segmentierten Freiformoptik vor (l.) und nach (r.) der Reduktion des Moiré-Effekts.

und kann so als Grundlage eines Multi-Zielfunktions-Optimierungsverfahrens genutzt werden. Hierbei werden nicht nur die Abbildungsqualität der Segmentierung, sondern auch Fertigungsrandbedingungen sowie die Dicke der Linse berücksichtigt. Das entwickelte Programm kann dabei auf einem herkömmlichen PC ausgeführt werden.

### Ergebnis

Für unterschiedliche Anwendungen können verschiedene Fresnelisierungsstrategien, wie die Segmentierung der gekrümmten oder planen Seite der Linse sowie die Segmentierung entlang geometrischer Kurven oder Höhenlinien, berücksichtigt werden.

### Anwendungsfelder

Die implementierte Methode kann für verschiedene Consumer-Produkte, z. B. Kameras von Mobiltelefonen oder Scheinwerfer in Kfz, verwendet werden. Der Schwerpunkt der aktuellen Arbeiten zur Fresnelisierung von Freiformoptiken liegt auf der Reduzierung des Moiré-Effekts bei Head-up-Displays.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wird im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N14707 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Jacqueline Dahlmanns M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-503  
jacqueline.dahlmanns@tos.rwth-aachen.de

Dr. Rolf Wester  
Telefon +49 241 8906-401  
rolf.wester@ilt.fraunhofer.de

## VARIABLE MULTISTRALH-OPTIK FÜR DIE BEARBEITUNG MIT HOCHLEISTUNGS-UKP-LASERN

### Aufgabenstellung

Ultrakurzpulslaserbearbeitung ist derzeit für viele industrielle Anwendungen unwirtschaftlich, da es bei zu hoher Pulsenergie zu Plasmabildung oder thermischer Akkumulation auf dem Werkstück kommt. Durch den Ansatz eines leistungsstarken »Punkt-Matrix-Druckers« soll die Laserleistung in 64 Teilstrahlen aufgeteilt werden, die individuell an- bzw. ausgeschaltet werden können.

### Vorgehensweise

Um den Rohstrahl einer 1-kW-UKP-Laserstrahlquelle in 64 Teilstrahlen aufzuteilen, wird ein zweidimensionales diffraktives optisches Element (DOE) verwendet. Das An- und Ausschalten der Einzelstrahlen erfolgt mittels akusto-optischer Modulatoren (AOM), mit denen die nicht benötigten Strahlen in eine Strahlfalle abgelenkt werden. Alle weiteren Strahlen werden in einen Galvanometerscanner eingekoppelt und auf das Werkstück fokussiert. Komponentenbedingt müssen die Durchmesser der Laserstrahlen mehrmals variiert werden. Hierzu werden zwei Teleskope ausgelegt. Darüber hinaus sind die Spotabstände auf dem Werkstück sowie die Abstände der einzelnen AOM vorgegeben. Dazu wird die Position der Einzelstrahlen mit Hilfe von Prismen und Spiegeln angepasst. Da die Optik in einen industrietauglichen Demonstrator integriert werden soll, sind weitere Einschränkungen durch die Abmaße gegeben.

### Ergebnis

Das Optikdesign ist in zwei Bereiche gegliedert. Durch die Eigenschaft, dass die AOM-Module jeweils acht Strahlen gleichzeitig schalten können, wird die gesamte Optik in acht parallel verlaufende, unabhängige Optiken unterteilt. Hierfür ist am Fraunhofer ILT ein Optikdesign entwickelt worden, welches für jede Teiloptik die Randbedingungen für den Strahlverlauf und die Spoteigenschaften erfüllt.

### Anwendungsfelder

Die wichtigsten Anwendungsfelder finden sich in der Oberflächenstrukturierung von funktionalen Strukturen sowie zur Herstellung von Form-, Präge- und Druckwerkzeugen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende EU-Projekt MultiFlex wird im Rahmen des »European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Program« unter dem Förderkennzeichen 825201 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Mario Hesker M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-617  
mario.hesker@tos.rwth-aachen.de

Dr. Jochen Stollenwerk  
Telefon +49 241 8906-411  
jochen.stollenwerk@ilt.fraunhofer.de

3 Entwurf des Strahlengangs.

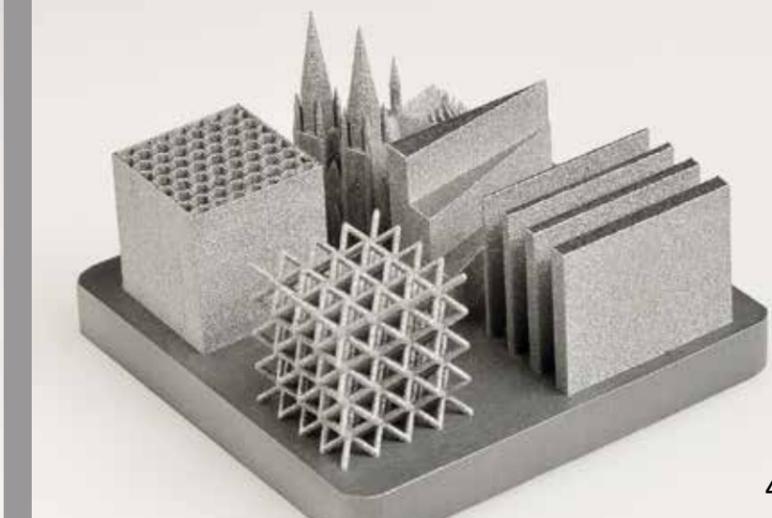
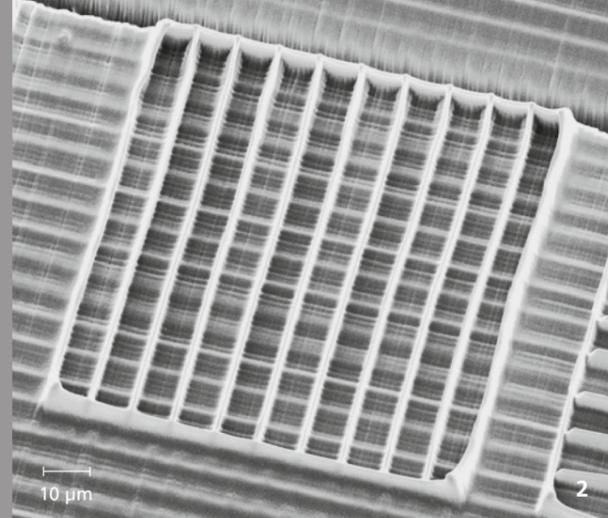
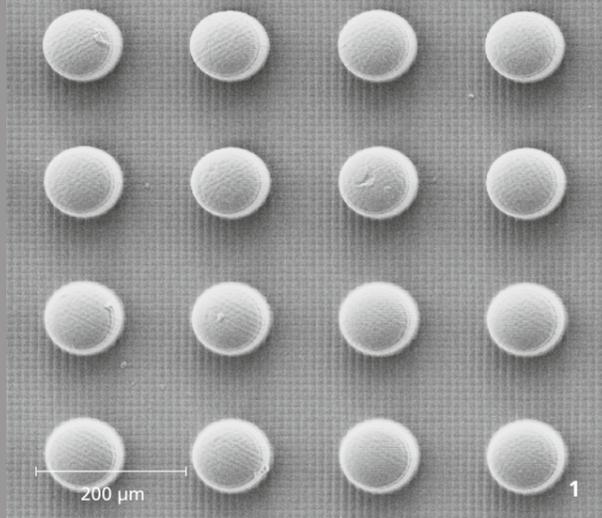
# LASERMATERIALBEARBEITUNG



## INHALT

Kombination von UV- und Multiphotonen-Polymerisation für den 3D-Druck	54	Lichtabsorbierende Strukturen in gedruckten Optiken mittels Lasermodifikation	76
Geometrieangepasste Prozessführung beim LPBF	55	Thermographie zur Optimierung des Wärmeeintrags bei der Ultrakurzpulsbearbeitung	77
LPBF-Prozessüberwachung mittels Ultraschall	56	Nanostrukturierung im sub 50-nm-Bereich	78
Direkte Pulverbettvorwärmung mittels NIR-Modul beim LPBF	57	»SCANPLEX« - Scanner-Array für die parallelisierte Lasermaterialbearbeitung	79
Multi-Scanner-Bearbeitungskopf für das Laser Powder Bed Fusion (LPBF)	58	SLE zur Herstellung von Quarzglas-Mikroresonatoren	80
Integration von Printed Electronics in LPBF-Bauteile	59	Innovatives Filtermodul für die Abscheidung von Mikroplastik aus Abwasser	81
Stützdesign für die nass-chemische Stützenentfernung von LPBF-Bauteilen	60	Robotergeführtes Laserstrahlbohren von CFK-Preforms	82
Entwicklung einer hoch(warm)festen Al-Legierung für die Additive Fertigung	61	Residual Neural Networks zur schnellen Vorhersage der Konizität einer Bohrung	83
Koaxiale Pulverzufuhrdüse »COAX-HighNo«	62	Kostengünstige Produktion organischer Photovoltaik im Rolle-zu-Rolle-Verfahren	84
Laserauftragschweißen mit koaxialer Drahtzufuhr	63	Laserdurchstrahlschweißen von Multilayer-Polymerfolien im Rolle-zu-Rolle-Verfahren	85
EHLA/TS-Zweischichtsystem für den Korrosions- und Verschleißschutz	64	Alterungsverhalten thermisch gefügter Kunststoff-Metall-Hybridverbindungen	86
Additive Fertigung eines Demonstrators für eine Raketenbrennkammer durch LMD	65	Laserstrahlmikroschweißen mit Strahlquellen im sichtbaren Wellenlängenbereich	87
Intelligente Prozessüberwachung für das Laserauftragschweißen	66	Mikroschweißen mit Kurzpuls Laserstrahlquellen	88
Digitaler Prozessschatten für das Laser Material Deposition	67	Laserschweißanlage zur Fertigung großer Lithium-Ionen-Batterierundzellen	89
Metallisierung von Keramik durch prozessangepasstes Werkstoffdesign	68	KI-basierte Qualitätssicherung beim Batterieschweißen	90
Selektive Laserkristallisation amorpher Siliziumdickschichten auf temperaturempfindlichen Substraten	69	Artungleiches Schweißen ultrahochfester und supraduktiler Stähle	91
Laserkristallisation gedruckter piezoelektrischer Aktuatorschichten	70	Rissbildungsanalyse in Schweißungen von Nimonic 75 und Stellite 31	92
Laserinduzierte Stabilisierung und Karbonisierung von PAN-Faservliesen	71	Multifunktionale Laserwerkzeuge für Leichtbau und Elektromobilität	93
Reibungsreduktion in tribologisch beanspruchten Komponenten durch Einstellung der Oberflächentopographie mittels Laserschmelzen	72	Schneiden keramischer Faserverbundwerkstoffe (CMC)	94
Laserbasierte Ausheilung von Tiefenschädigungen in Glas	73	Convolutional Neural Networks zur Vorhersage des Schnittflankenprofils	95
Polieren mit Ultrakurzpuls Laserstrahlung	74		
Laserpolieren von Mikrooptiken aus Kunststoff	75		

*Ultrakurzpuls Laser zur Oberflächenstrukturierung:  
Leistungsstarke Werkzeuge für die Präzisionsfertigung.*



## KOMBINATION VON UV- UND MULTIPHOTONEN-POLYMERISATION FÜR DEN 3D-DRUCK

### Aufgabenstellung

Präzise Bauteile aus Kunststoff können im 3D-Druck durch UV-Photovernetzung aus Photoharzen hergestellt werden. Die erzielbare Auflösung liegt dabei oberhalb von etwa 20 µm für laterale Strukturen, die Tiefenauflösung ist ähnlich. Wesentlich präzisere Geometrien können durch Multiphotonen-Polymerisation (MPP) mit langwelliger Strahlung erzielt werden, wobei die Aufbaurrate aber um 2 bis 3 Größenordnungen kleiner ist. So können zwar äußerst präzise Bauteile gefertigt werden, allerdings kaum unter wirtschaftlichen Bedingungen.

### Vorgehensweise

Die Realisierung von hohen Aufbauraten und gleichzeitig hoher Präzision soll durch ein Kombinationsverfahren ermöglicht werden, bei dem der Großteil des Volumens durch UV-Polymerisation aufgebaut und nur die feinsten Strukturen durch einen MPP-Prozess ergänzt werden. Das geplante Vorgehen erfordert die Kombination von zwei Belichtungsmodulen für UV- und MPP-Prozesse in einer Anlage mit der Möglichkeit der wahlweisen Verwendung.

1 MPP-Druck von Säulen auf einer UV-polymerisierten Basis.

2 Schreiben von Linien mit 10 µm Abstand und 2 µm Breite auf einer UV-vernetzten Basis.

### Ergebnis

In der ersten Projektphase wurde das Kombinationsverfahren zur Erprobung der einzelnen Module exemplarisch realisiert und ein Anlagenkonzept erstellt. Beide Module konnten für die Herstellung eines Bauteils im selben Harzbad nacheinander eingesetzt werden, ohne das Bauteil entnehmen zu müssen.

### Anwendungsfelder

Das Kombinationsverfahren kann vorteilhaft zur Fabrikation von Bauteilen eingesetzt werden, die nur in kleinen oder mittleren Stückzahlen hergestellt werden und bei denen die Anfertigung von Spritzgusswerkzeugen unwirtschaftlich wäre. Der größte Volumenanteil kann mit der relativ schnellen UV-Polymerisation vernetzt werden, wobei nur Geometrie-elemente mit einer Auflösung < 10 µm mit dem langsameren und präziseren MPP-Prozess geschrieben werden. Typische Anwendungen sind z. B. mikrofluidische Analysechips, die mit den makroskopischen Anschlüssen der Analysegeräte verbunden werden müssen, aber Funktionselemente mit Abmessungen im Mikrometerbereich zum Mischen und Filtern von Bestandteilen erfordern.

Dieses Vorhaben wird im Rahmen des NRW-geförderten Projekts HoPro-3D mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Förderkennzeichen EFRE-0801252 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Andreas Hoffmann M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-447  
andreas.hoffmann@ilt.fraunhofer.de

Dr. Martin Wehner  
Telefon +49 241 8906-202  
martin.wehner@ilt.fraunhofer.de

## GEOMETRIEANGEPASSTE PROZESSFÜHRUNG BEIM LPBF

### Aufgabenstellung

Beim Laser Powder Bed Fusion (LPBF) werden hochkomplexe Bauteile durch schichtweises Umschmelzen von pulverförmigem Ausgangsmaterial gefertigt. Nach dem Auftragen einer Pulverschicht wird der Laser mit einer im Vorfeld festgelegten Bearbeitungsstrategie bestehend aus Scanreihenfolge und Prozessparametern über die umzuschmelzenden Bereiche der Pulverschicht bewegt. Bei der Auswahl einer Bearbeitungsstrategie werden die geometrischen Charakteristika des Bauteils derzeit nur in geringfügigem Maße berücksichtigt. Die Strategie wird für das gesamte Bauteil festgelegt, sodass zum Beispiel filigrane und massive Bereiche auf die gleiche Weise bearbeitet werden. Das Resultat sind Formabweichungen, Bauteilverzug sowie Einschränkungen in Oberflächengüte und Produktivität.

### Vorgehensweise

Im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts futureAM wird die Anpassung der LPBF-Bearbeitungsstrategie an die zu fertigende Bauteilgeometrie untersucht. Um eine Einstellung der LPBF-Prozessparameter bis auf die Ebene einzelner Scanvektoren zu ermöglichen, werden entsprechende Modifikationen an der Anlagen- und Steuerungstechnik durchgeführt. Des Weiteren erfolgt die Entwicklung von Software zur Bauteilanalyse, um eine geometriespezifische Zuweisung der Prozessparameter zu realisieren. Die Entwicklung der neuartigen Bearbeitungsstrategien erfolgt durch die Fertigung und Auswertung von Probekörpern, die repräsentativ für kritische Bauteilbereiche

sind. Dazu zählen zum Beispiel Überhänge oder filigrane Strukturen. Der Prozess wird in relevanten Bauteilbereichen mit Hilfe einer Thermographiekamera überwacht, um die Temperaturverteilung und das Abkühlverhalten der Probekörper zu untersuchen.

### Ergebnis

Durch die neuartigen Bearbeitungsstrategien können beim Werkstoff Ti6Al4V die Maßabweichungen innerhalb einer Bauteilschicht um über 30 Prozent reduziert werden. Darüber hinaus ist es möglich, Bauteile mit einem Überhangwinkel von bis zu 80° zu fertigen, was einer Steigerung von 35° im Vergleich zum Stand der Technik entspricht und die Menge der benötigten Stützstrukturen signifikant reduziert. Die entwickelten Softwaretools ermöglichen eine automatische Parametrierung der zu fertigenden Bauteile und eine gezielte Steuerung der LPBF-Anlage während des Belichtungsprozesses.

### Anwendungsfelder

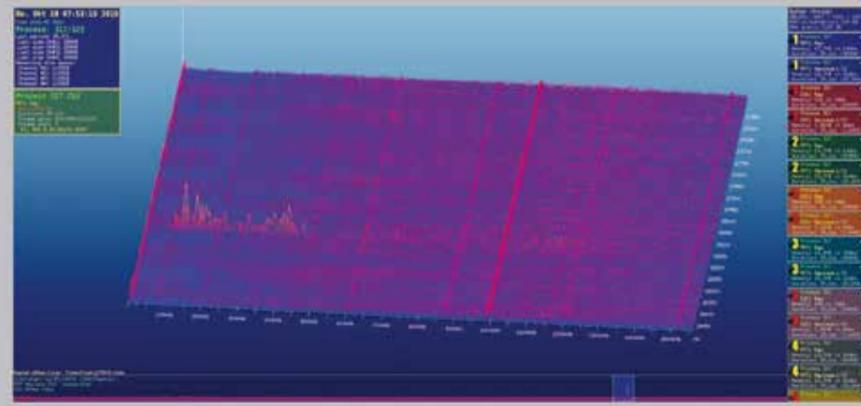
Die Ergebnisse des Projekts können branchenübergreifend zur Fertigung beliebiger Bauteile mittels LPBF angewandt und auf weitere Werkstoffe übertragen werden. Durch die Erweiterung der Prozessgrenzen können außerdem neue Applikationen für das LPBF-Verfahren erschlossen werden.

### Ansprechpartner

Tobias Pichler M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8360  
tobias.pichler@ilt.fraunhofer.de

3 LPBF-gefertigte Überhangstrukturen aus Ti6Al4V.

4 Mittels gesteuertem Energieeintrag gefertigte Bauteile aus Ti6Al4V.



1

## LPBF-PROZESS- ÜBERWACHUNG MITTELS ULTRASCHALL

### Aufgabenstellung

Im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts futureAM werden Schallsensoren zur Überwachung des Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Prozesses eingesetzt. Das Ziel ist die frühzeitige und zuverlässige Detektion von typischen Defekten, wie beispielsweise Risse und Delaminationen. Zur Detektion werden drei Piezosensoren und ein Lasermikrofon verwendet. Luft- und Körperschall werden bis in den MHz-Bereich erfasst. Bei den ersten Experimenten stellte sich heraus, dass die eindeutige Zuordnung der Ultraschallsignale zu Prozessereignissen eine Herausforderung darstellt.

### Vorgehensweise

Eine LPBF-Maschine wurde so umgerüstet, dass die drei Piezosensoren an der Unterseite der Substratplatte angebracht werden können. Das Lasermikrofon zur Luftschallmessung wurde in die Prozesskammer eingebaut. Die vom Prozess emittierten Schallwellen werden von den vier Sensoren erfasst und einer Fourier-Transformation unterzogen. Die so erhaltenen Zeit- und Frequenzsignale werden im Hinblick auf relevante statistische Merkmale analysiert. Um eine Zuordnung der Ultraschallsignale zu Prozessdefekten und -ereignissen zu ermöglichen, werden diese gezielt induziert und durch weitere Sensoren wie Laserleistungsmesser, Pyrometer und Thermographiekamera aufgezeichnet.

1 Detektion einer Prozessabweichung.

### Ergebnis

Die Experimente und Datenanalysen haben gezeigt, dass die untersuchten Prozessereignisse und -defekte eindeutige Signalmerkmale besitzen und somit zugeordnet werden können. Mit den Piezosensoren und dem Lasermikrofon ist es daher möglich, Risse, Delaminationen, Laserleistungsänderungen und Überhangbelichtungen im LPBF-Prozess eindeutig zu detektieren.

### Anwendungsfelder

Das Sensorkonzept wird in diesem Forschungsvorhaben bereits erfolgreich für das LPBF angewendet, um Bauteildefekte frühzeitig zu detektieren. Darüber hinaus kann das Konzept aber auch bei anderen Lasermaterialbearbeitungsprozessen wie dem Laserstrahlschweißen oder Laser Material Deposition (LMD) sinnvoll eingesetzt werden. Von Vorteil ist, dass die Sensoren unaufwendig in industrielle Laserbearbeitungsmaschinen und auch leicht nachträglich in bestehende Anlagen integriert werden können.

### Ansprechpartner

Emil Duong M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8341  
emil.duong@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Peter Abels  
Telefon +49 241 8906-428  
peter.abels@ilt.fraunhofer.de



2

## DIREKTE PULVERBETT- VORWÄRMUNG MITTELS NIR-MODUL BEIM LPBF

### Aufgabenstellung

Durch den Einsatz von Vorwärmesystemen können thermisch bedingte Eigenspannungen im Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Prozess reduziert und so Bauteile mit geringerem Verzug oder auch rissanfällige Werkstoffe verarbeitet werden. Konventionelle Vorwärmesysteme erwärmen die Bauplattform. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus und dem so wachsenden Abstand zwischen Bauplattform und Bearbeitungsebene nimmt die Temperatur in der Bearbeitungsebene im Laufe des Fertigungsprozesses ab. Daher sind Systeme zur direkten Vorwärmung der Bearbeitungsebene Gegenstand der aktuellen Forschung. Im Rahmen eines bilateralen Industrieprojekts mit der Firma AdPhos Innovative Technologies GmbH hat das Fraunhofer ILT ein solches Vorwärmesystem basierend auf der adphosNIR®-Technologie entwickelt.

### Vorgehensweise

Kernstück des entwickelten Vorwärmesystems sind Emitter, welche ein Wellenlängenspektrum im nahinfraroten (NIR) Bereich mit einem Maximum bei 800 nm emittieren. Das verwendete adphosNIR®-Modul kann sechs solcher Emitter mit einer Gesamtleistung von bis zu 12 kW fassen. Durch die Montage des Moduls an die Pulverauftragseinheit einer LPBF-Anlage kann eine Vorwärmung direkt oberhalb des Pulverbettes realisiert werden. Im Vergleich zu anderen Ansätzen zur direkten Vorwärmung der Bearbeitungsebene kann so die Streustrahlung minimiert und die Vorwärmung auf das Pulverbett konzentriert werden. Allerdings wird das Pulverbett nur zyklisch während des Pulverauftragsvorgangs vorgewärmt.

### Ergebnis

Mit der zyklischen Vorwärmung kann bei der Verarbeitung von Inconel® 718 unabhängig von der Bauhöhe eine nahezu konstante Temperatur von 500 °C vor dem Umschmelzen eingestellt werden. Die so erzeugte Reduzierung von prozessinduzierten Eigenspannungen wird anhand von Verzugmessungen an Cantilevern bestätigt. Versuche mit dem Schnellarbeitsstahl HS6-5-3-8 zeigen, dass mit dieser Vorwärmung Probekörper mit einer Bauhöhe von 50 mm rissfrei aufgebaut werden können. Dies ist bei Verwendung einer kommerziellen Vorwärmung der Bauplattform nicht möglich. Weiterhin erlaubt die Verwendung der NIR-Vorwärmung die Einstellung eines wesentlich homogeneren Gefüges.

### Anwendungsfelder

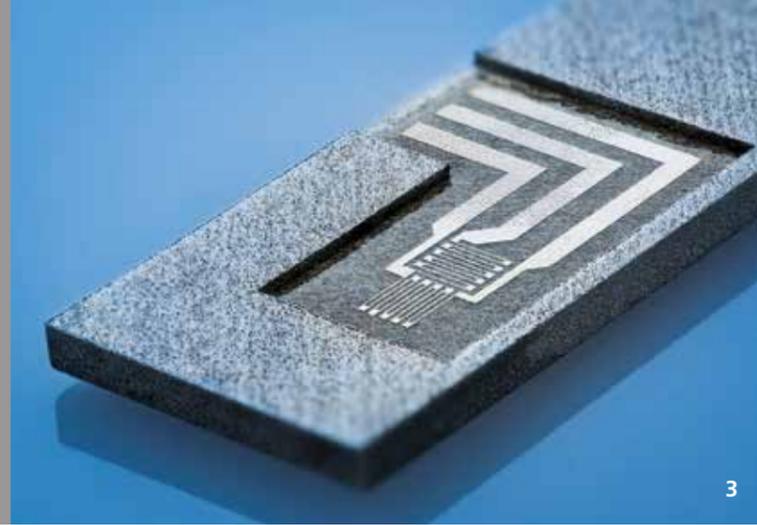
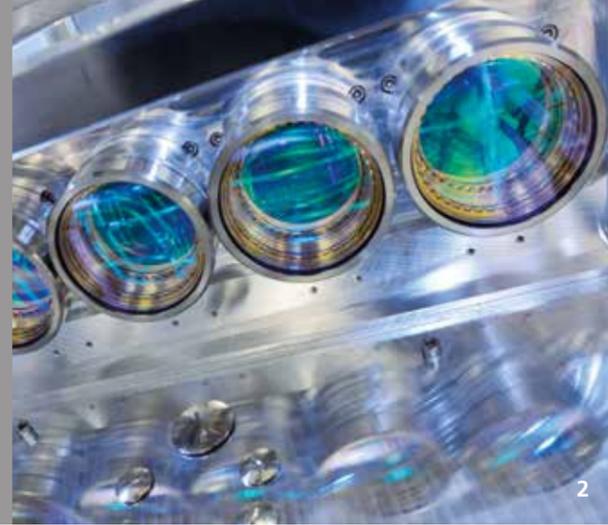
Mit der entwickelten Vorwärmung ist es möglich, im LPBF-Prozess unabhängig von der Bauhöhe nahezu konstante Temperaturen in der Bearbeitungsebene zu erreichen. Besonders bei der Verarbeitung von schwer schweißbaren Werkstoffen, wie Schnellarbeitsstählen oder Hartstoffen, bieten sich diverse Anwendungsmöglichkeiten. So wird die Verarbeitung von WC-Co mittels LPBF und NIR-Vorwärmung im Projekt »AM von WC-Co« zusammen mit dem Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau IWM und dem Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University untersucht.

### Ansprechpartner

Andreas Vogelpoth M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-365  
andreas.vogelpoth@ilt.fraunhofer.de

2 Signifikante Reduzierung des Verzugs bei Verwendung der NIR-Vorwärmung.

3 Vorwärmung der Bearbeitungsebene durch adphos®-NIR-Modul.



## MULTI-SCANNER-BEARBEITUNGSKOPF FÜR DAS LASER POWDER BED FUSION (LPBF)

### Aufgabenstellung

Für die Fertigung großer Metallbauteile mittels LPBF wurde am Fraunhofer ILT ein skalierbares Maschinenkonzept mit verfahrbarem Bearbeitungskopf (Optiksystem und lokale Schutzgasführung) entwickelt. Der bisherige Prototyp verfügt lediglich über eine einzelne Laser-Scanner-Einheit, wodurch die Aufbaurrate stark begrenzt ist. Insbesondere bei den angestrebten großen Bauteilen führt dies zu langen Fertigungszeiten. Im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts futureAM soll deshalb ein Bearbeitungskopf mit fünf Laser-Scanner-Einheiten entwickelt und erprobt werden.

### Vorgehensweise

Die Auslegung des optischen Systems, insbesondere die Anordnung der 2D-Galvanometereinheiten, und des Schutzgassystems sind zentraler Bestandteil der Forschungsarbeit. Zur Steigerung der Produktivität wird ein hoher Überlapp zwischen den benachbarten Scanfeldern angestrebt. Gleichzeitig muss eine möglichst homogene Schutzgasströmung im Bearbeitungskopf sichergestellt werden. Hinsichtlich der erzielbaren Bauteilgenauigkeiten muss das Optiksystem so kalibriert werden, dass in den Übergängen zwischen den Scanbereichen keine Defekte entstehen. Ferner bedarf es geeigneter Bearbeitungsstrategien, mit denen eine gegenseitige Beeinträchtigung der simultanen Umschmelzprozesse vermieden wird.

1 LPBF-Prozess mit fünf simultanen Schmelzprozessen.  
2 Optiksystem des Bearbeitungskopfs.

### Ergebnis

Der Prototyp des Bearbeitungskopfs verfügt über fünf kompakt gebaute Galvanometereinheiten, die in einer Reihe angeordnet wurden und eine Grundfläche von 200 x 500 mm<sup>2</sup> abdecken. Als Strahlquellen dienen fünf Faserlaser mit einer maximalen Leistung von 400 W. Durch simulationsgestützte Anpassung der Strömungskomponenten konnte eine homogene Schutzgasströmung über die gesamte Breite des Bearbeitungskopfs erzielt werden. Hinsichtlich der Scanner-genauigkeiten wurde eine neuartige Methode zur Kalibrierung und Ausrichtung der Scanfelder erarbeitet. Zur Steigerung der Produktivität wurde ein CAM-System entwickelt, mit dem die Auslastung der Scanner im Prozess optimiert und die Fertigungszeit minimiert werden. Anhand von Fertigungsversuchen wurden geeignete Bearbeitungsstrategien identifiziert, die eine hohe Produktivität bei gleichzeitig hoher Prozessrobustheit und Bauteilqualität ermöglichen.

### Anwendungsfelder

Mit Hilfe der entwickelten Maschinen- und Prozesstechnik können LPBF-Bauteile mit einer Größe von bis zu 1000 x 800 x 400 mm<sup>3</sup> prozesssicher und produktiv gefertigt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich in die Entwicklung neuartiger, kommerzieller Systeme überführen.

Dieses Projekt wird finanziell durch die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt.

### Ansprechpartner

Christian Tenbrock M. Sc., M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8350  
christian.tenbrock@ilt.fraunhofer.de

## INTEGRATION VON PRINTED ELECTRONICS IN LPBF-BAUTEILE

### Aufgabenstellung

Intelligente Bauteile, die Daten über ihren Produktionsstatus und ihren Zustand liefern, sind ein zentraler Bestandteil aktueller Entwicklungen von »Industrie 4.0«. Durch die Kombination von Thin Film Processing (TFP) mit der Additiven Fertigung können neue Wege zur Herstellung von sogenannten »smart parts« beschritten werden. Sensoren können dadurch nicht nur frei im Bauteil positioniert, sondern wie das Bauteil selbst auch additiv gefertigt werden.

### Vorgehensweise

Das Fraunhofer ILT entwickelt Prozessketten zur Integration von additiv gefertigten Sensoren (Dehnungsmessstreifen) in additiv gefertigte Bauteile. Die Additive Fertigung des Bauteils mittels Laser Powder Bed Fusion (LPBF) wird für die Integration des Sensors unterbrochen. Die Additive Fertigung des Sensors erfolgt mit Hilfe der TFP-Technologie. Die unterschiedlichen Materialien und Strukturen werden dabei Schicht für Schicht direkt auf das Bauteil aufgedruckt und anschließend mittels Laserstrahlung funktionalisiert (gesintert, geschmolzen, gehärtet etc.). Für die Fertigung von Dehnungsmessstreifen werden die Isolationsschicht, das Messgitter und die Verkapselung nacheinander appliziert. Anschließend wird der LPBF-Bauprozess fortgesetzt, wodurch die Kavität geschlossen und der Sensor somit vollständig in das Bauteil integriert wird.

### Ergebnis

Mittels der entwickelten innovativen Prozesskette können gedruckte Multimaterialschichtsysteme direkt in komplexe, additiv gefertigte Bauteile integriert werden. Die aufwendige Vorbereitung diskreter Sensoren entfällt.

### Anwendungsfelder

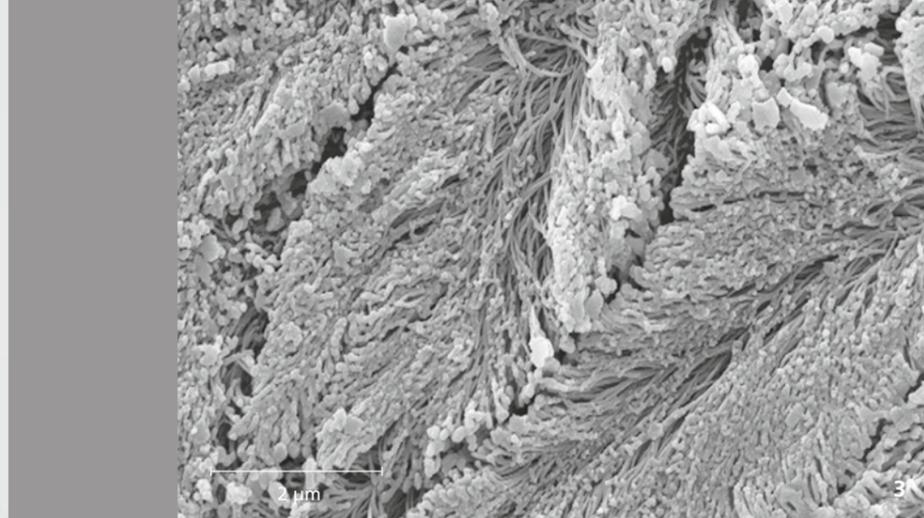
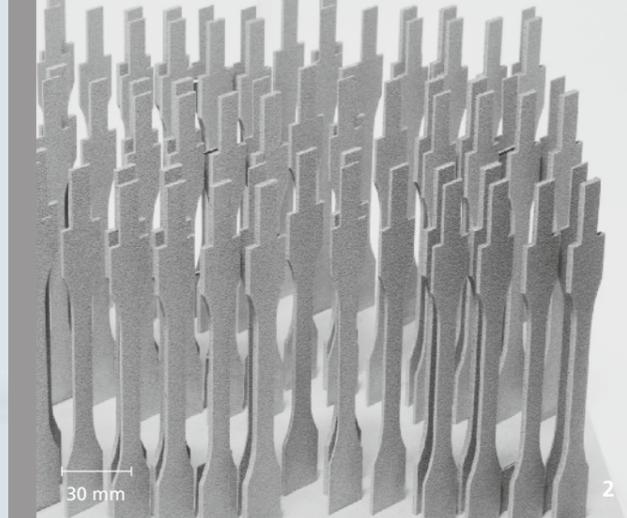
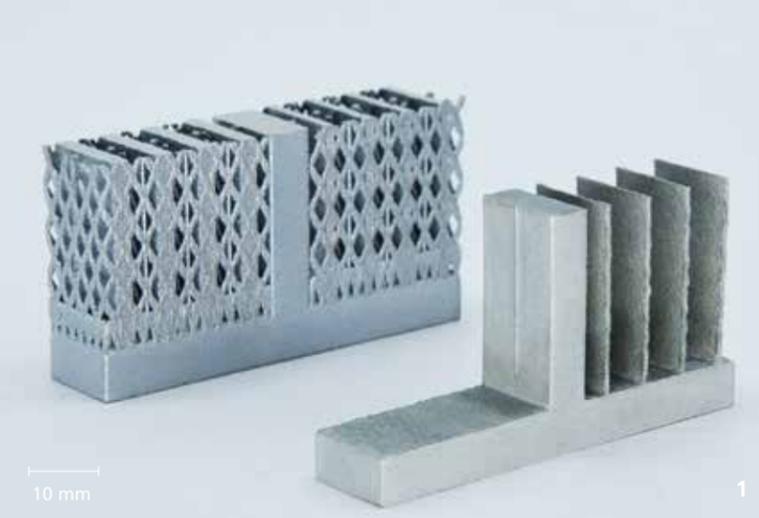
Die Integration von Dehnungsmessstreifen ist für eine Vielzahl hochwertiger, mechanisch beanspruchter Bauteile, z. B. im Werkzeugbau, in Turbomaschinen oder in Verbrennungsmotoren, interessant. Das Potenzial der Prozesskette beschränkt sich dabei nicht nur auf die Fertigung von Dehnungsmessstreifen. Insgesamt stellt die demonstrierte Kombination aus »printed electronics« und additiver Bauteilfertigung eine Schlüsseltechnologie in der Fertigung intelligenter Bauteile dar.

### Ansprechpartner

Matthias Rehberger M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8300  
matthias.rehberger@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Simon Vervoort  
Telefon +49 241 8906-602  
simon.vervoort@ilt.fraunhofer.de

3 Additiv gefertigtes Bauteil mit aufgedrucktem DMS.



## STÜTZENDESIGN FÜR DIE NASS-CHEMISCHE STÜTZENENTFERNUNG VON LPBF-BAUTEILEN

### Aufgabenstellung

Ein wesentliches Hindernis für die breite Nutzung des LPBF-Verfahrens in der Serienfertigung ist der hohe manuelle Aufwand bei der Stützenentfernung. Ein automatisierbarer Ansatz zur Entfernung ist das nass-chemische Abtragen, bei dem die Stützstrukturen mittels eines chemischen Ätzmittels aufgelöst werden. Voraussetzung für die vollständige Entfernung ist die Adaption des Stützdesigns. Nach heutigem Stand der Technik sind die Stützstrukturen im Wesentlichen auf den LPBF-Prozess und nicht auf potenzielle Nachbearbeitungsschritte adaptiert. Während sich Vektorstützen (single scans) vollständig und schnell chemisch auflösen lassen, sind Volumenstützen, die für eine fehlerfreie Fertigung unerlässlich sind, nur verzögert auflösbar. Ein Lösungsansatz sind poröse Volumenstützen, die genauso belastbar wie herkömmliche Volumenstützen sind und sich ähnlich schnell auflösen lassen wie Vektorstützen.

1 Nass-chemisch entstützter Twincantilever (li. Vektor- und poröse Volumenstützen, re. Vektor- und herkömmliche Volumenstützen).  
2 Gefertigte poröse Flachzugproben.

### Vorgehensweise

Im Rahmen eines laufenden Forschungsprojekts wurde der Einfluss verschiedener LPBF-Prozessparameter auf die Porosität und Festigkeit der Volumenstützen sowie den chemischen Materialabtrag am Beispiel des Werkstoffs AlSi10Mg untersucht. Die Ergebnisse wurden anschließend auf ein verstütztes Bauteil (Twincantilever) übertragen.

### Ergebnis

Aus den Ergebnissen konnten LPBF-Prozessparameter identifiziert werden, mit denen die LPBF-Fertigung von porösen Volumenstützen möglich ist, welche sich bei nahezu gleicher Festigkeit wie herkömmliche Volumenstützen deutlich schneller auflösen lassen. Durch die Anwendung der Ergebnisse auf einen gestützten Twincantilever konnte außerdem die Übertragbarkeit auf verstützte Bauteile demonstriert werden.

### Anwendungsfelder

Aufgrund der einfachen Anlagentechnik kann das nass-chemische Verfahren sowohl im kleinen Maßstab als auch für die industrielle Serienfertigung angewendet werden. Durch die Adaption des Stützdesigns ist die nass-chemische Stützenentfernung auf viele Anwendungsfälle übertragbar und kann somit einer breiten industriellen Anwendung zugänglich gemacht werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wird im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N15080 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Tobias Schmithüsen M. Eng.  
Telefon +49 241 8906-568  
tobias.schmithuesen@ilt.fraunhofer.de

## ENTWICKLUNG EINER HOCH(WARM)FESTEN AL-LEGIERUNG FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG

### Aufgabenstellung

Der Markt der Al-Basislegierungen für die Additive Fertigung wird heute von kommerziell verfügbaren AlSi-Legierungen und Scalmalloy® bestimmt. Insbesondere bei erhöhten Temperaturen (bis 300 °C) weisen AlSi-Legierungen jedoch unzureichende mechanische Eigenschaften auf. Scalmalloy® weist signifikant bessere mechanische Eigenschaften auf, ist jedoch aufgrund der Verwendung von Scandium als Metall der Seltenen Erden teuer und daher nur für Sonderanwendungen interessant. Konventionelle Al-Knetlegierungen stellen wegen ihrer fehlenden Verarbeitbarkeit mittels additiver Fertigungsverfahren (Heißbrissbildung) keine Alternative dar. Ziel ist daher die Entwicklung einer wirtschaftlichen Legierung mit vergleichbaren Eigenschaften wie Scalmalloy®.

### Vorgehensweise

Eutektische AlNi-Legierungen wurden als vielversprechende Kandidaten zur Untersuchung mittels laserbasierter additiver Fertigungsverfahren identifiziert. Ausgehend von der binären Zusammensetzung werden Legierungszusätze hinzugegeben, um eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften durch Ausscheidungshärtung zu ermöglichen. Die Auswahl erfolgt auf Basis simulierter Phasendiagramme. Die rasche experimentelle Validierung erfolgt mittels LMD (Laser Metal Deposition). Ein gradierter Aufbau erlaubt hierbei eine Variation der chemischen Zusammensetzung über die Aufbauhöhe, sodass ein Intervall chemischer Zusammensetzungen innerhalb einer Probe analysiert werden kann.

### Ergebnis

Für die binäre Al-Ni-Basislegierung (7.5 Gew.-% Ni) kann die Verarbeitbarkeit mittels laserbasierter Additiver Fertigung (LMD und LPBF – Laser Powder Bed Fusion) bereits bestätigt werden (Rissfreiheit, Bauteildichte > 99,9 Prozent). Die ermittelten Härtewerte (~ 160 HV) im prozessierten Zustand sind größer als vergleichbare Werte der Legierung AlSi10Mg (~ 125 HV). Die Ermittlung mechanischer Kenngrößen sowie die Untersuchung der Zugabe von festigkeitssteigernden Legierungszusätzen sind Bestandteil aktueller Arbeiten.

### Anwendungsfelder

Im Zuge von Emissions- und Gewichtseinsparungen ist eine breite Anwendung von Leichtbaukomponenten besonders im Automobil- und Luftfahrtsektor von Interesse. Steigende Anforderungen, z. B. durch Downsizing von Komponenten, erfordern zudem höher(warm)feste Werkstoffe.

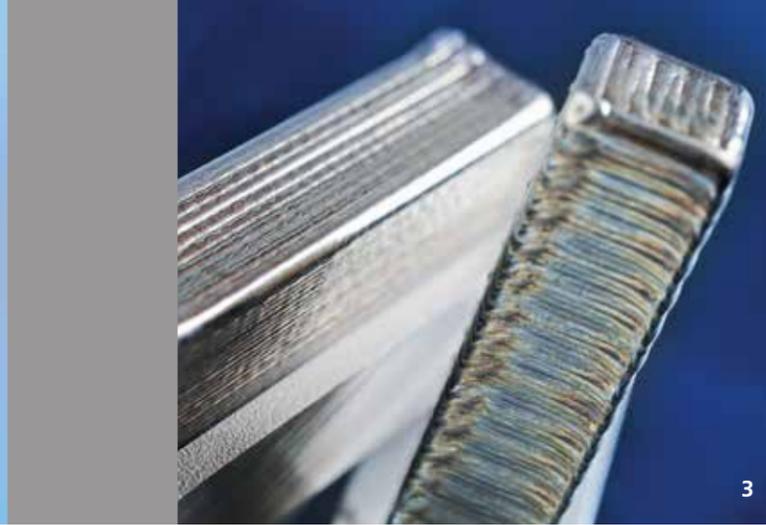
Das Vorhaben HAIUr wird im Rahmen der internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft MAVO gefördert und gemeinsam mit den Fraunhofer-Instituten IWM und IGCV durchgeführt.

### Ansprechpartner

Georg Rödler M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-633  
georg.roedler@ilt.fraunhofer.de

Dr. Andreas Weisheit  
Telefon +49 241 8906-403  
andreas.weisheit@ilt.fraunhofer.de

3 REM-Aufnahme eutektischer Al-Ni-Fasern.



## KOAXIALE PULVERZUFUHR- DÜSE »COAX-HighNo«

### Aufgabenstellung

Die bisher für das Laserauftragschweißen (LA) eingesetzten Koaxial-Pulverzufuhrdüsen haben den Nachteil, dass sie bei einer mechanischen Beschädigung oder auch bei Verschleiß durch das Pulver komplett ausgetauscht oder aufwendig überarbeitet werden müssen. Diese Düsen weisen im unteren Bereich einen Außen- und einen Innenkonus auf, welche zueinander ausgerichtet werden und so einen Spalt für die koaxiale Pulverzufuhr erzeugen.

### Vorgehensweise

Um den Wartungsaufwand zu verringern, wurde ein neuer Pulverdüsensystem entwickelt, der das Auswechseln der beschädigten Düsenspitze signifikant erleichtert. Diese besteht aus einem Innen- und einem Außenkonus und kann als monolithische Einheit gewechselt werden. Die Düsenspitzen werden mit einem variablen Spaltmaß auf den Pulvermassenstrom und die Korngrößenverteilung des geförderten Pulvers eingestellt, sodass eine zusätzliche Justage der Düsen entfällt.

1 Koaxiale Pulverzufuhrdüse COAX-HighNo.

2 Wechselspitze für die koaxiale COAX-HighNo-Pulverdüse.

### Ergebnis

Durch den Einsatz von auswechselbaren, monolithischen Pulverdüsenspitzen (Innen- und Außenkonus) wird der Reparaturaufwand minimiert, da die Düsenspitze schnell und ohne Nachjustage ausgetauscht werden kann. Hierdurch werden Stillstandszeiten bei der Produktion merklich reduziert. Der Austausch der Düsenspitzen kann vom Anwender selbst durchgeführt werden.

Durch speziell beschichtete Düsenspitzen wird die Verschleißbeständigkeit erhöht, sodass der Anwendungsbereich sowohl für große Pulvermassenströme, wie sie für das Extreme Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) charakteristisch sind, als auch für abrasive Pulver, wie z. B. Karbide, signifikant erweitert wird.

### Anwendungsfelder

Die neu entwickelte Pulverzufuhrdüse mit wechselbaren Düsenspitzen als monolithische Einheit kann in allen Anwendungsfeldern sowohl des konventionellen als auch des Extremen Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißens eingesetzt werden.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Gerhard Backes  
Telefon +49 241 8906-410  
gerhard.backes@dap.rwth-aachen.de

Dr. Andres Gasser  
Telefon +49 241 8906-209  
andres.gasser@ilt.fraunhofer.de

## LASERAUFTRAG- SCHWEISSEN MIT KOAXIALER DRAHTZUFUHR

### Aufgabenstellung

Am Fraunhofer ILT wurde für das Laserauftragschweißen (LA) ein kompakter Bearbeitungskopf mit einem Gewicht von 5 kg entwickelt, der mit einer koaxialen Drahtzufuhr eine richtungsunabhängige 3D-Bearbeitung ermöglicht. Dieser Bearbeitungskopf wird in diversen Projekten für das Auftragen von Eisen-, Aluminium-, Nickel- und Titan-Basislegierungen qualifiziert. Im Rahmen des »International Center for Turbomachinery Manufacturing (ICTM Aachen)« wird die Prozessentwicklung für die im Turbomaschinenbau relevante Nickelbasislegierung IN 718 durchgeführt. Übergeordnetes Ziel ist dabei die Ermittlung der geometrischen, mechanischen und Mikrostruktur/Makrostruktur-Eigenschaften von mittels Draht-LA hergestellten Volumina. In einem ersten Schritt werden Materialprüfproben aus IN 718 hergestellt und analysiert.

### Vorgehensweise

Zunächst werden geeignete Verfahrensparameter ermittelt, Aufbaustrategien entwickelt und anschließend Volumina hergestellt, aus denen Zugproben gefertigt werden. Diese Proben werden dann einer Wärmebehandlung unterzogen und analysiert. Besonders betrachtet werden dabei die mechanischen Eigenschaften der generierten Volumina. Im Anschluss erfolgt eine Übertragung der Verfahrensparameter auf eine 3D-Geometrie.

### Ergebnis

Für den Werkstoff IN 718 konnten geeignete Verfahrensparameter und Aufbaustrategien ermittelt werden, um Volumenkörper mit einer Maßgenauigkeit < 0,2 mm herzustellen (Bild 3). Die maximal eingesetzte Laserleistung beträgt 1 kW. Durch eine koaxiale Schutzgasführung konnten nahezu oxidfreie Volumina hergestellt werden. Die metallographische Analyse zeigt außerdem eine extrem niedrige Porosität von  $\leq 0,1$  Prozent und eine gute metallurgische Anbindung der Schichten. In den Zugversuchen konnten die erforderlichen Werte nach DIN EN 10302 erreicht werden. Die Übertragung der Verfahrensparameter auf eine 3D-Geometrie konnte mit der Herstellung eines Bauteils (Bild 4) demonstriert werden.

### Anwendungsfelder

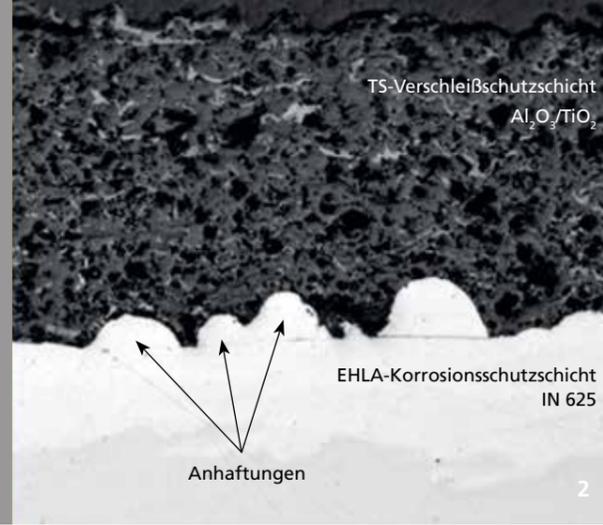
Der entwickelte Bearbeitungskopf kann zum LA mit drahtförmigen Zusatzwerkstoffen für das Beschichten, Reparieren sowie die Additive Fertigung eingesetzt werden. Das Systemgewicht und die Baugröße ermöglichen den Einsatz an Anlagen mit geringer Tragkraft und/oder hoher Dynamik. Der gezeigte Demonstrator wurde im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Programm »Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen« geförderten ProLMD Projekts erstellt.

### Ansprechpartner

Jana Kelbassa M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8331  
jana.kelbassa@ilt.fraunhofer.de

3 Volumina (144 x 14 x 60 mm<sup>3</sup>, horizontal und vertikal) aus IN 718 hergestellt mit Draht-LA.

4 Boroskopflansch aus IN 718 hergestellt mit Draht-LA.



## EHLA/TS-ZWEISCHICHTSYSTEM FÜR DEN KORROSIONS- UND VERSCHLEISSCHUTZ

### Aufgabenstellung

Statt Bauteile komplett aus einem Hochleistungswerkstoff zu fertigen, stellt das Beschichten nur der Randzone eine kostengünstige Alternative dar. Das vom Fraunhofer ILT entwickelte Extreme Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) eignet sich u. a. zur Herstellung von Korrosionsschutzschichten im Dickenbereich von 50–250 µm mit einer schmelzmetallurgischen Anbindung. Das Thermische Spritzen (TS) ist u. a. für das Verarbeiten von harten Spritzzusatzwerkstoffen, wie Keramiken für den Verschleißschutz, geeignet. Das Zweischichtsystem, bestehend aus einer EHLA- und einer TS-Schicht, vereint die Vorteile beider Verfahren und bietet so einen effektiven Korrosions- und Verschleißschutz. Im Rahmen des vom Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS) geförderten Projekts KERAMIK sollen geeignete Prozessstrategien entwickelt werden, um eine möglichst große Haftung der TS-Verschleißschuttschicht auf der EHLA-Korrosionsschutzschicht zu erreichen. Die Arbeiten werden in Kooperation mit dem Institut für Oberflächentechnik (IOT) der RWTH Aachen University durchgeführt.

### Vorgehensweise

Untersucht werden unterschiedliche Prozessstrategien zur Herstellung möglichst dünner, korrosionsbeständiger EHLA-Schichten mit einer rauen Oberfläche (Fraunhofer ILT).

1 EHLA-Prozess.

2 Querschliff des EHLA/TS-Schichtsystems,

© IOT, RWTH Aachen University.

Anschließend soll ohne weitere Nachbearbeitung eine TS-Schicht auf der EHLA-Schicht appliziert werden (IOT). Für die EHLA-Schicht werden die Pulverwerkstoffe 316 L und IN 625 und für die TS-Schicht die Werkstoffe  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  und  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$  untersucht. Der EHLA/TS-Schichtverbund wird im Salzsprühnebeltest (DIN EN ISO 9227) auf Korrosionsbeständigkeit getestet. Die Haftzugfestigkeit der TS-Lage auf der EHLA-Schicht wird mittels Haftzugprüfung PAT (DIN EN 582) getestet.

### Ergebnis

Durch die Entwicklung geeigneter Prozessstrategien konnten EHLA-Schichten aus 316 L und IN 625 mit 50–250 µm Schichtdicke auf S355 Substrat erzeugt werden, die den Korrosionstest bestehen. Die Rauheit konnte durch schmelzmetallurgisch angebundene Anhaftungen von Pulverpartikeln bzw. Pulverpartikelagglomeraten auf der EHLA-Schichtoberfläche im Bereich von  $R_z = 40\text{--}80\text{ µm}$  eingestellt und die Haftzugfestigkeit der TS-Schicht  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  dadurch um 70–80 Prozent gesteigert werden. TS-Schichten aus  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$  weisen sehr hohe Haftzugfestigkeiten auf, die zum Versagen der Messmittel führten.

### Anwendungsfelder

Das Zweischichtsystem EHLA/TS eignet sich insbesondere für den Korrosions- und Verschleißschutz von rotationssymmetrischen, stark belasteten Bauteilen wie z. B. Hydraulikzylinder für den Offshore-Bereich.

### Ansprechpartner

Matthias Brucki M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-314  
matthias.brucki@ilt.fraunhofer.de

## ADDITIVE FERTIGUNG EINES DEMONSTRATORS FÜR EINE RAKETENBRENNKAMMER DURCH LMD

### Aufgabenstellung

Die zunehmende Anzahl innovativer Raumfahrtunternehmen erhöht die Konkurrenz und erfordert die Notwendigkeit zur Kostensenkung bei der Produktion von Spezialbauteilen. Als Alternative zur konventionellen Herstellung (z. B. Schmieden, mechanische Bearbeitung) werden deshalb additive Verfahren wie das Laserauftragschweißen (LMD) untersucht. Hintergrund sind u. a. die erheblichen Kosten für Schmiederohlinge und für Elektronenstrahlschweißungen bei Komponenten aus Nickelbasis-Superlegierungen. Die Additive Fertigung bietet signifikante Vorteile: es wird kein Schmiederohling mehr benötigt und gleichzeitig wird der Rohmaterialbedarf reduziert. Außerdem können durch den flexiblen, integralen Ansatz Einzelteile zusammengefasst und so die Anzahl der Schweißnähte reduziert werden. Ziel des Projekts ist die Herstellung einer rotationssymmetrischen Schalenstruktur mit Anschlussflansch als monolithische Komponente aus Inconel 625 durch LMD für eine Raketenbrennkammer der Ariane Group (Bild 3).

### Vorgehensweise

Bei der zu fertigenden Komponente handelt es sich um die Upper Shell (US) inklusive Anschlussflansch der Oberschale des Verteilerrings einer Demonstrator-Raketenbrennkammer. Auf Basis der Entwicklung von geeigneten Prozessparametern und Aufbaustrategien wird die Upper Shell als durchgehende Torusschale ohne Flansch anhand eines CAD-Modells aufgebaut.

Im nachfolgenden Schritt wird der Anschlussflansch integral direkt auf der Schale gefertigt. Die Umsetzung erfolgt an einem Knickarmroboter mit Dreh-Kippmodul, einem 4 kW-Scheibenlaser und einer coaxialen Fraunhofer ILT-Pulverzufuhrdüse. Zur Kontrolle des Aufbauergebnisses, des Verzugs und des Aufmaßes für die mechanische Nachbearbeitung wird das Bauteil mit einem optischen System gescannt und digitalisiert.

### Ergebnis

Der Upper-Shell-Demonstrator ( $D_a$  400 mm) mit integriertem Anschlussflansch wurde vollständig und erfolgreich aus Inconel 625 aufgebaut (Bild 4). Das Gewicht des LMD-Volumens beträgt 12,5 kg bei einer Prozesszeit von ca. 24 h. Durch die Digitalisierung konnte ein ausreichendes Aufmaß für die Nachbearbeitung nachgewiesen werden.

### Anwendungsfelder

Die gewonnenen Erkenntnisse des LMD-Raumfahrt-demonstrators lassen sich auch auf andere Branchen übertragen. Sie bieten Potenzial insbesondere für Bauteile, die kostenintensive Rohlinge erfordern und/oder ein hohes Zerspanungsvolumen aufweisen, wie z. B. Integral- und Triebwerksbauteile für den Luftfahrtsektor oder Turbinen aus Hochleistungswerkstoffen zur Energiegewinnung. Für den Werkzeug- und Formenbau ergeben sich effektive und flexible Möglichkeiten, z. B. zur Bauteilmodifikation.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Jochen Kittel  
Telefon +49 241 8906-136  
jochen.kittel@ilt.fraunhofer.de

3 CAD-Modell Upper Shell inklusive Flansch.

4 Demonstratorkomponente nach LMD-Aufbau.



1



2



3



4

## INTELLIGENTE PROZESS- ÜBERWACHUNG FÜR DAS LASERAUFTRAGSCHWEISSEN

### Aufgabenstellung

Das Laserauftragschweißen hat sich als Verfahren zur Funktionalisierung von Oberflächen, zur Reparatur und Modifikation von Bauteilen sowie zur Herstellung von Neuteilen etabliert. Die industrielle Fertigung von hochwertigen Komponenten oder Bauteilen mit langen Bearbeitungszeiten erfordert eine lückenlose Dokumentation der Prozesse. Für die vielfältigen Anwendungen und die große Anzahl von Prozessparametern bedarf es applikationsspezifischer Überwachungsstrategien zur Gewährleistung der Produktqualität.

### Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT kommen Verfahren aus dem Bereich des Machine-Learning zum Einsatz, um Prozessüberwachungssysteme auf spezifische Applikationen anzupassen. In einer Trainingsphase werden Prozessvideos der thermischen Emissionen des Bearbeitungsprozesses mit Qualitätsmerkmalen des Prozessergebnisses korreliert. Auf Basis dieser Daten kann eine Vielzahl von Bildmerkmalen in Bezug auf ihre Relevanz für den jeweiligen Prozess analysiert werden. Die Klassifizierung erfolgt mit unterschiedlichen Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens und ermöglicht eine zuverlässige Bewertung der Bauteilqualität. Mit der Implementierung dieser

Auswahl in die Produktion kann nicht nur die Qualität dokumentiert, sondern auch die Fehlerklasse zugeordnet werden, um auftretende Störungen gezielt zu beseitigen. Das System kann während der Produktion weiter trainiert werden, um die Qualität zu optimieren oder sich an verändernde Randbedingungen anzupassen.

### Ergebnis

Mit dieser Vorgehensweise wird die kamerabasierte Prozessüberwachung effektiv an verschiedene Applikationen angepasst. Diese Funktionalität wird in ein anlagenintegriertes System implementiert, welches zusätzlich bei der Prozesseinrichtung unterstützt und die Vermessung des Werkzeugs »Pulvergasstrahl« ermöglicht. Damit stehen umfangreiche Funktionen zur Qualitätssicherung beim Laserauftragschweißen zur Verfügung.

### Anwendungsfelder

Zu den Anwendungsgebieten zählen alle Bereiche des Auftragschweißens mit Laserstrahlung, bei denen die Überwachung der Prozessführung erforderlich ist. Die wichtigsten Anwendungsgebiete umfassen den Maschinen- und Werkzeugbau sowie den Triebwerks- und Motorenbau.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Stefan Mann  
Telefon +49 241 8906-321  
stefan.mann@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Peter Abels  
Telefon +49 241 8906-428  
peter.abels@ilt.fraunhofer.de

1 Sensormodul des Prozessüberwachungssystems.

2 Thermische Emissionen des Schmelzbaus.

## DIGITALER PROZESS- SCHATTEN FÜR DAS LASER MATERIAL DEPOSITION

### Aufgabenstellung

Im Fraunhofer-Leistungszentrum »Vernetzte, adaptive Produktion« verfolgt das Fraunhofer ILT das Ziel, einen digitalen Prozessschatten für den Laser-Material-Deposition (LMD)-Prozess zu entwickeln. Der Prozessschatten soll messdatenbasiert eine Auswertungsbasis zur Überwachung und Verbesserung des LMD-Prozesses bereitstellen. Dazu wird eine systematische Vorgehensweise zur Aufnahme, Verarbeitung und Verwertung von Messdaten aus Prozessüberwachungssensoren und der Maschinensteuerung betrachtet.

### Vorgehensweise

In einem ersten Schritt werden geeignete Messdatenquellen ausgewählt. Für den LMD-Prozess sind dies einerseits Messdaten aus der Maschinensteuerung, der Werkstoffzufuhr, der Laserstrahlquelle und der Peripherie sowie andererseits Sensordaten aus der Wechselwirkungszone Laserstrahl/Schmelzbad (z. B. emittierte Wärmestrahlung). In einem zweiten Schritt werden diese Daten zusammengeführt. Konkret wird mit einem Pyrometer die emittierte Wärmestrahlung in Abhängigkeit der LMD-Prozessführung gemessen. Die Daten der Maschinensteuerung werden mittels Standard-Maschinen-Kommunikationsprotokoll OPC UA erfasst.

### Ergebnis

Durch die Zusammenführung von online erfassten Tool-Center-Point(TCP)-Koordinaten und Pyrometermessdaten wird neben der zeitlichen auch die geographische Darstellung von

Messdaten möglich. Somit werden die Messdaten nicht mehr nur zeitaufgelöst interpretiert, sondern auch orts aufgelöst im Bauteil durch Zuordnung der tatsächlich abgefahrenen TCP-Koordinaten exakt nachverfolgt. Dadurch können Prozessunregelmäßigkeiten bzw. -defekte orts aufgelöst nachgewiesen werden. Auch weitere Signale der Steuerung und mittels Bus-Schnittstellen angebundener Systeme (Laserstrahlquelle, Pulverförderer etc.) können so verwertet werden. Mit Hilfe dieses Konzepts wird ein praxisgerechtes digitales Abbild eines Prozesses geschaffen, mit dem verlässliche Informationen zur Überwachung und Verbesserung des LMD-Prozesses bereitgestellt werden.

### Anwendungsfelder

In der Pilotlinie »Gasturbinenschaufel-Reparatur« des Leistungszentrums wird das vorgestellte Konzept für die Reparatur von Turbinenschaufelspitzen (Tip Repair) mittels LMD angewandt. In einem nächsten Schritt wird erforscht, welche Prozess- und Bauteildefekte mit Hilfe der gewonnenen Messdaten nachverfolgt werden können. Durch die Nutzung des offenen Kommunikationsstandards OPC UA kann das Konzept maschinen-, steuerungs- und applikationsunabhängig angewandt werden.

### Ansprechpartner

Talu Ünal-Saewe M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-335  
talu.uenal-saewe@ilt.fraunhofer.de

Dr. Andres Gasser  
Telefon +49 241 8906-209  
andres.gasser@ilt.fraunhofer.de

3+4 Digitaler Prozessschatten für einen Tip-Repair-Prozess.



1

## METALLISIERUNG VON KERAMIK DURCH PROZESSANGEPASSTES WERKSTOFFDESIGN

### Aufgabenstellung

Werkstoffseitige Innovation gelingt oftmals durch intelligente Verbindung artfremder Materialien. Hinsichtlich der Kombination von metallischen und keramischen Werkstoffen, wie beispielsweise in Elektronik- und Optikanwendungen, stellen die sehr unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften besondere Herausforderungen dar. Die derzeit eingesetzte Löttechnik erfährt Grenzen durch den Temperaturbereich, in dem ohne Schädigung des keramischen Materials bei gleichzeitigem Schmelzen des metallischen Lötpartners gefügt werden kann, sowie durch den Aufwand der notwendigen Vakuumtechnologie. In dem Vorhaben LaMeta sollen gemeinsam mit dem Partner Euromat GmbH neue Lötwerkstoffe entwickelt werden, die speziell für die Metallisierung mittels Laserstrahlung ausgelegt sind. Hierdurch soll der Temperatureinfluss auf die eingesetzte Keramik um bis zu 200 °C verringert und die Vakuumofenbehandlung durch selektives Umschmelzen mit Laserstrahlung ersetzt werden.

### Vorgehensweise

Zur Herstellung festhaftender metallischer Schichten mit einer Dicke von mehreren 10 µm auf Si- oder W-basierter Keramik werden sowohl die Zusammensetzung des Lots, die Applikationstechnik als auch der Laserprozess betrachtet. Aktivloten auf Ag-Basis werden verschiedene Mikro- und Nanoadditive

1 Silberschicht auf Wolframkarbid.

für chemische Reaktionen mit der Keramik zugegeben. Die Applikation erfolgt durch Drucken oder Sprühen in Form von Pasten oder Tinten. In einem iterativen Prozess werden Werkstoffdesign und Laserprozessparameter aufeinander angepasst. Die Funktionsfähigkeit der Metallisierung wird durch Auflöten von LEDs und Fügen von Honwerkzeugen auf die hergestellte Beschichtung erprobt.

### Ergebnis

Erste Silberschichten mit Nanoadditiven können auf Wolframkarbid mit Dicken von  $11 \pm 2$  µm rissfrei durch Umschmelzen der aufgerakelten Silberschicht aufgebracht werden. Aktuelle Herausforderungen stellen die Homogenität des Schichtauftrags und das Erreichen von geforderten Werten in Bezug auf dessen Leitfähig- und Haftfestigkeit sowie auf die thermische Belastbarkeit dar.

### Anwendungsfelder

Neben den genannten Anwendungen ergeben sich weitere Möglichkeiten für die Bereiche Sensorik, Elektronik und Optik.

Das Vorhaben wird mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Förderkennzeichen EFRE-0801115 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Silja-Katharina Rittinghaus M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8138  
siljakatharina.rittinghaus@ilt.fraunhofer.de

Dr. Andreas Weisheit  
Telefon +49 241 8906-403  
andreas.weisheit@ilt.fraunhofer.de



2

## SELEKTIVE LASER- KRISTALLISATION AMORPHER SILIZIUMDICKSCHICHTEN AUF TEMPERATUREMPFIND- LICHEN SUBSTRATEN

### Aufgabenstellung

MEMS-Sensoren (micro-electro-mechanical systems) bilden das Herzstück heutiger Inertialsensoren, die z. B. als Beschleunigungsmesser in mobilen Endgeräten in Automobilen etc. in großen Stückzahlen eingesetzt werden. Um dem fortschreitenden Trend nach Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Miniaturisierung nachzukommen, soll anstelle von draht- und lotbehafteten ein laserbasiertes Verfahren entwickelt werden, um Sensorstrukturen monolithisch auf der Auswerteelektronik herzustellen. Notwendig ist dafür die Einhaltung von Prozesstemperaturen  $< 420$  °C im Bereich der integrierten elektrischen Schaltkreise.

### Vorgehensweise

Zur Herstellung der Sensorstruktur werden bei Temperaturen bis 400 °C mittels CVD- bzw. PVD-Verfahren amorphe Siliziumschichten mit Dicken im Bereich von 10 µm auf den schaltkreistragenden Wafern abgeschieden. Die Kristallisation und damit Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit wird durch die Laserbearbeitung erreicht. Aufgrund der mittels Laserverfahren erreichbaren örtlichen Selektivität und hohen Heiz- und Kühlraten wird der thermische Impact auf die Schaltkreise im Vergleich zu den Alternativverfahren reduziert. Mithilfe des angepassten Thermomanagements werden mechanische Spannungen im Wafer verringert. Anschließend werden aus den funktionalisierten Schichten mittels klassischer mikroelektronischer Fertigungsverfahren Sensoreinheiten freigestellt.



3

### Ergebnis

Mit dem neu entwickelten Laserverfahren ist es möglich, die Schichtwiderstände um mehr als vier Größenordnungen auf  $< 0,05$  Ω\*cm (50 Ω/sq bei 10 µm Schichtdicke) zu reduzieren. Dabei können die thermisch induzierten Spannungen im Wafer erfolgreich reduziert werden, was zu einer Vermeidung von Rissbildung im Schichtmaterial und einer Reduzierung der Verformung der freigestellten Strukturen führt. Derzeit werden Flächenraten von 6 mm<sup>2</sup>/s erreicht.

### Anwendungsfelder

Das entwickelte Verfahren kann in der Halbleiterindustrie zur Leistungssteigerung und Miniaturisierung mechanischer und optischer Sensoreinheiten eingesetzt werden.

Das Projekt MUSIC wird im Rahmen der Internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft MAVO gefördert.

### Ansprechpartner

Florian Fuchs M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-676  
florian.fuchs@ilt.fraunhofer.de

Dr. Christian Vedder  
Telefon +49 241 8906-378  
christian.vedder@ilt.fraunhofer.de

2 Nahaufnahme der  
laserkristallisierten Felder.  
3 8"-Siliziumwafer mit selektiv  
laserkristallisierten Feldern.



## LASERKRISTALLISATION GEDRUCKTER PIEZOELEKTRISCHER AKTUATORSCHICHTEN

### Aufgabenstellung

Im Zuge der Miniaturisierung und der zunehmenden Integration von elektrischen Schaltungen gewinnen mikroelektromechanische Systeme (MEMS) zunehmend an Bedeutung. Für Mikroaktuatoren, wie sie beispielsweise in Mikrolautsprechern oder Mikropumpen zum Einsatz kommen, werden piezoelektrische Dünnschichten verwendet, die sich bei Anlegen eines elektrischen Felds mechanisch verformen. Nach aktuellem Stand der Technik stellt PZT (Blei-Zirkonat-Titanat) die derzeit leistungsfähigste piezoelektrische Funktionskeramik dar. Mit konventionellen, meist vakuum- und maskenbasierten Verfahren wäre die Herstellung solcher piezoelektrischer Dünnschichten äußerst zeit- und kostenintensiv. Durch die Kombination von Tintenstrahldruck- und laserbasierten Funktionalisierungsverfahren ist es möglich, mit verhältnismäßig geringem Zeit- und Kostenaufwand hochfunktionale Dünnschicht-MEMS im industriellen Maßstab herzustellen.

### Vorgehensweise

Speziell angepasste PZT-Tinten werden mit Hilfe von Tintenstrahldruckverfahren auf 8"-Wafer appliziert und anschließend mittels Laserstrahlung bei lokalen Temperaturen von ca. 700 °C kristallisiert. Durch die Applikation mehrerer je 10–20 nm dicker PZT-Schichten werden Aktuatoren mit Gesamtschichtdicken von 2–3 µm realisiert.

1 Si-Wafer mit tintenstrahldruckten, laserkristallisierten PZT-Schichten.

### Ergebnis

Das Tintenstrahldruckverfahren erlaubt die definierte Deposition der Tinten mit minimal erreichbaren Strukturbreiten von ca. 100 µm. Die piezoelektrischen Eigenschaften von PZT-Schichten, die mittels Laserstrahlung hergestellt werden, sind im Vergleich zu konventionellen Verfahren (z. B. Ofenkristallisation) nahezu identisch. Die thermische Belastung des laserbearbeiteten Wafers ist jedoch geringer. Typische Auslenkungen einer ca. 1 µm dicken kristallisierten PZT-Schicht betragen ca. 100 pm pro Volt angelegter Spannung. Die erforderliche Bearbeitungszeit kann von konventionell mehreren Minuten je Schicht auf wenige Sekunden reduziert werden. Die Laserkristallisation erfolgt temperaturgeregt mit der Laserleistung als Stellgröße, sodass Temperaturschwankungen auf max. +10 °C begrenzt werden.

### Anwendungsfelder

Die Anwendungsfelder von piezoelektrischen Schichten liegen in der Sensorik, z. B. zur Messung von Körperschall, oder in der Aktorik in Mikropumpen und -relais über Tintenstrahldrucker bis hin zum Einsatz in der Kommunikationstechnik.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wird gemeinsam mit dem IWE2 der RWTH Aachen University und dem Fraunhofer ISIT im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03VPP02223 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Samuel Fink M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-624  
samuel.fink@ilt.fraunhofer.de

Dr. Christian Vedder  
Telefon +49 241 8906-378  
christian.vedder@ilt.fraunhofer.de



## LASERINDUZIERTE STABILISIERUNG UND KARBONISIERUNG VON PAN-FASERVLISEN

### Aufgabenstellung

Die Herstellung von Karbon-Nanofaservliesen erfolgt heutzutage fast ausschließlich durch die Weiterverarbeitung elektro- oder rotationsversponnener PAN-Lösungen. Zur Herstellung von Karbonfaservliesen werden die PAN-Vliese konventionell in zeit- und energieintensiven Ofenverfahren zuerst bei 200–400 °C für ca. 2 Stunden an Luft stabilisiert und anschließend unter Schutzgas für ca. 30 Minuten bei Temperaturen um 1300 °C karbonisiert. Schmelzgesponnene Faservliese, die im Hinblick auf die Vermeidung von Lösemitteln bevorzugt verwendet werden sollten, können zur Zeit nicht mittels Ofenverfahren stabilisiert und karbonisiert werden.

### Vorgehensweise

Gemeinsam mit den Projektpartnern Leibniz-Institut für Interaktive Materialien DWI und Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP wird ein laserbasiertes Verfahren entwickelt, das eine Stabilisierung und Karbonisierung der rotationsgesponnenen Faservliese ermöglicht. Darüber hinaus sollen die PAN-Lösungen chemisch so modifiziert werden, dass diese in einem Schmelzspinnprozess verarbeitet und mittels laserbasierten Verfahren stabilisiert und karbonisiert werden können. Weiterhin sollen bei der laserbasierten Karbonisierung Faservliese mit gradierter Porosität und spezifischen Oberflächen im Bereich von einigen 100 m<sup>2</sup>/g entstehen.

### Ergebnis

Sowohl mit kontinuierlich emittierenden als auch mit gepulsten Laserstrahlquellen können derzeit, in Abhängigkeit von den chemischen Modifikationen der Faservliese, die Teilprozesse Stabilisierung und Karbonisierung der Faservliese realisiert werden. Ein Aufschmelzen der Fasern wird vermieden, sodass die Faserstruktur erhalten bleibt. Die Einstrahldauer für die Stabilisierung von 2,5 cm<sup>2</sup> Faservlies liegt derzeit bei ca. 20 s und die Einstrahldauer für die Karbonisierung bei ca. 40 ms. Die weitere Reduzierung der Zeiten für die Stabilisierung und Einstellung der Faserporosität ist Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten.

### Anwendungsfelder

Die karbonisierten, hochporösen Vliese finden Anwendung in elektronischen High-Performance-Bauteilen als Elektrodenmaterial (Superkondensatoren, Batterien, Brennstoffzelle), Filtermedien (Heiß-Gasfiltration, regenerierbare HEPA-Filter) und Adsorbentien (Körpergeruchsneutralisation).

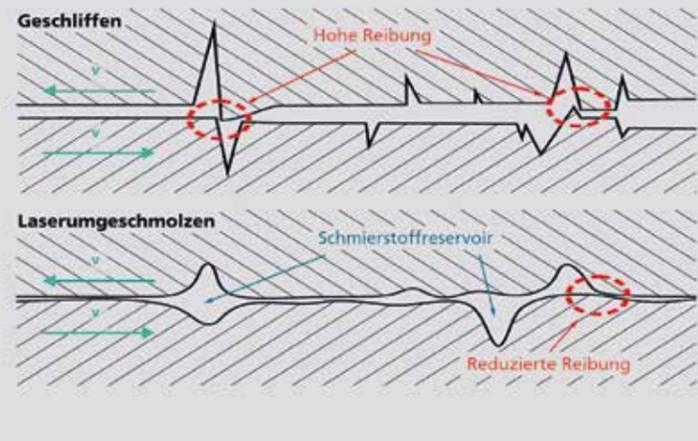
Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wird im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung unter dem Förderkennzeichen 19616 BG durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Carsten Johnigk  
Telefon +49 241 8906-672  
carsten.johnigk@ilt.fraunhofer.de

Dr. Christian Vedder  
Telefon +49 241 8906-378  
christian.vedder@ilt.fraunhofer.de

2 Laserstabilisiertes PAN-Vlies, © DWI.



## REIBUNGSREDUKTION IN TRIBOLOGISCH BEANSPRUCHTEN KOMPONENTEN DURCH EINSTELLUNG DER OBERFLÄCHENTOPOGRAPHIE MITTELS LASERSCHMELZEN

### Aufgabenstellung

Über ein Drittel des Primärenergieverbrauchs wird durch die Umsetzung von mechanischer Energie in der Antriebstechnik, insbesondere im Verkehrswesen, verursacht. Die Effizienz in der Antriebstechnik wird in hohem Maße durch Reibungsverluste in tribologisch beanspruchten Komponenten, wie Wälzlagern, Verzahnungen oder Ventiltrieben, beeinflusst. Eine geeignete Maßnahme zur Reibungsreduzierung ist der Einsatz von niedrigviskosen Ölen in Verbindung mit einer gezielt eingestellten Rauheit bzw. Oberflächentopographie. Zur Einstellung definierter Oberflächentopographien bei Bauteilen mit komplexen Geometrien sind zusätzliche, zeitaufwendige und kostenintensive Fertigungsverfahren erforderlich.

### Vorgehensweise

Ein alternatives Fertigungsverfahren stellt das Laserschmelzen dar ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ). Beim Laserschmelzen wird im Gegensatz zum Laserstrukturieren kein Material abgetragen, sondern in der schmelzflüssigen Phase unter Nutzung der Oberflächenspannung umverteilt. Durch lokales Aufschmelzen werden bei diesem Verfahren lediglich die Rauheitsspitzen abgerundet,

1 Schematische Darstellung des Oberflächenkontakts zweier relativ zueinander bewegter Flächen.

sodass die Schleifriefen, welche als Schmierstoffreservoirs dienen, erhalten bleiben. Dadurch soll ein verbesserter Schmierfilmaufbau erzielt und gleichzeitig die Reibung durch die Verrundung der Rauheitsspitzen verringert werden. Dazu werden geschliffene Scheiben (Werkstoff: 100Cr6) mittels gepulster Laserstrahlung (Pulsdauer  $t = 400 \text{ ns}$ ) umgeschmolzen und anschließend an einem Kugel/Scheibe-Tribometer vermessen. Dabei befindet sich die Kugel bis zur Hälfte im Ölbad, sodass Schmierstoff durch Rotation in den tribologischen Kontakt zwischen Kugel und Scheibe befördert wird. Die Reibwerte werden mit denen von geschliffenen Oberflächen verglichen, die den Normalfall einer Verzahnung abbilden.

### Ergebnis

Der Reibwert wird durch das Laserschmelzen im Bereich der Mischreibung um 40 Prozent im Vergleich zu geschliffenen Oberflächen reduziert. Der Reibwert liegt damit im Bereich konventionell polierter Oberflächen.

### Anwendungsfelder

Insbesondere im Automobilbau, aber z. B. auch im Bereich der Windenergie ist der zielgerichtete Einsatz des Laserschmelzens als Fertigungsverfahren für tribologisch beanspruchte Komponenten denkbar. Die Tribometertests wurden am Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung MSE der RWTH Aachen University durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Judith Kumstel  
Telefon +49 241 8906-8026  
judith.kumstel@ilt.fraunhofer.de

Dr. Edgar Willenborg  
Telefon +49 241 8906-213  
edgar.willenborg@ilt.fraunhofer.de

## LASERBASIERTE AUSHEILUNG VON TIEFENSCHÄDIGUNGEN IN GLAS

### Aufgabenstellung

Bei der konventionellen Fertigung von optischen Komponenten aus Glas werden während der Schleif- und Polierschritte Tiefenschädigungen (z. B. Mikrorisse) unter der bearbeiteten Randschicht (sogenannte »subsurface damages SSD«) induziert. Diese Tiefenschäden müssen durch eine zeitaufwendige Prozesskette von immer feiner werdenden Schleif- und Polierschritten entfernt werden. Dabei wird in jedem Prozessschritt Material bis zur tiefsten Schädigung des Vorschlitts abgetragen, wobei erneut kleinere Schäden induziert werden. Dieser iterative Prozess führt dazu, dass die Fertigung von Optiken höchster Qualität mit hohen Durchlaufzeiten und Kosten verbunden ist. Alternative Prozesse wie das Heißpressen sind hingegen auf hohe Stückzahlen, pressbare Geometrien und eingeschränkte Genauigkeiten limitiert.

### Vorgehensweise

Ein alternativer Ansatz besteht in der Verwendung von  $\text{CO}_2$ -Laserstrahlung ( $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ). Diese wird mit typischen Eindringtiefen von wenigen zehn Mikrometern oberflächennah absorbiert und führt durch das Aufschmelzen einer dünnen Randschicht beim Laserpolieren von feingeschliffenem Glas aufgrund der Oberflächenspannung zu einer Glättung/Politur der Oberfläche. Das lokal begrenzte Aufschmelzen der Oberfläche bietet jedoch auch potenziell die Möglichkeit, Tiefenschädigungen in Form von SSD auszuheilen. Zur Überprüfung dieser Hypothese werden grobgeschliffene Flachproben aus Quarzglas und N-BK7 mit einem Laserpoliturprozess vollflächig bearbeitet und auf verbleibende SSD untersucht.

### Ergebnis

An den Flachproben mit einem Durchmesser von 30 mm aus Quarzglas und N-BK7 konnte gezeigt werden, dass die ursprünglich vorhandenen SSD von bis zu  $80 \mu\text{m}$  Tiefe nach der Laserbearbeitung vollständig beseitigt sind. Die Ausheilung kann bereits mit bis zu einem Faktor 4 größeren Geschwindigkeiten als der herkömmliche Laserpolierprozess durchgeführt werden. Die reine Prozesszeit der laserbasierten SSD-Ausheilung beträgt somit z. B. für eine N BK7-Linse mit 30 mm Durchmesser weniger als 2 Sekunden.

### Anwendungsfelder

Die Laserpolitur zur Ausheilung von Tiefenschädigungen in Glasbauteilen kann eingesetzt werden, um die Komplexität von Prozessketten in der Optikkfertigung zu reduzieren und so Durchlaufzeiten und Stückkosten zu senken. Dies betrifft insbesondere die Fertigung von Asphären und Freiformflächen.

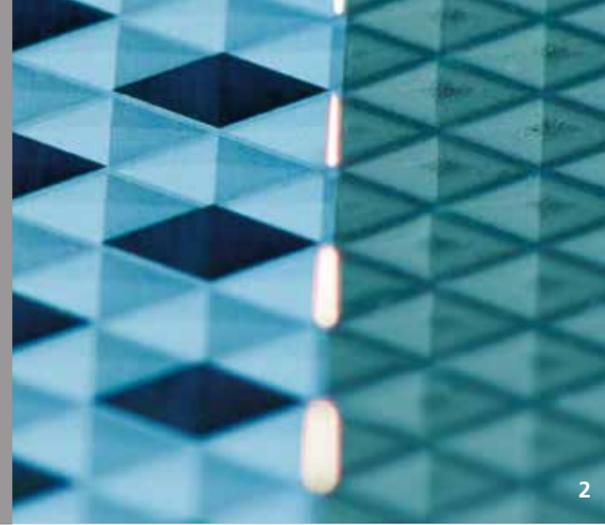
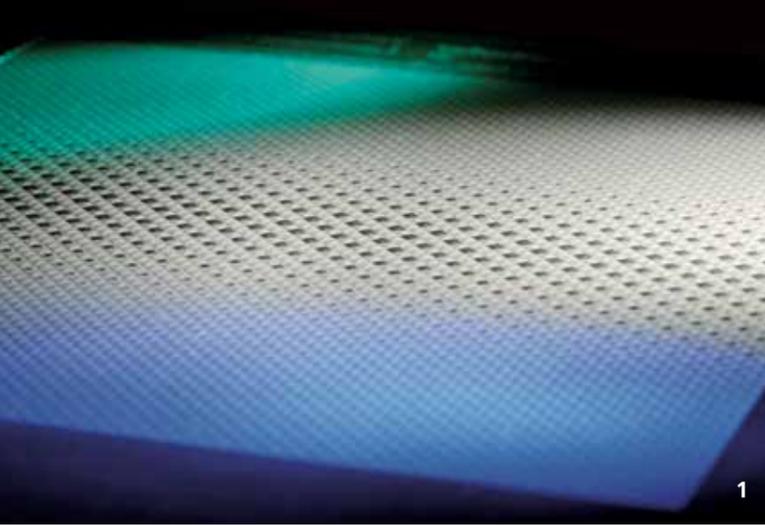
Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen IGF-20308 N durchgeführt.

### Ansprechpartner

Manuel Jung M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-669  
manuel.jung@ilt.fraunhofer.de

Dr. Edgar Willenborg  
Telefon +49 241 8906-213  
edgar.willenborg@ilt.fraunhofer.de

2 Geschliffene Quarzglasoberfläche mit Kalottenschliff ( $\varnothing \sim 3 \text{ mm}$ ). Tiefen: Kalotte ca.  $150 \mu\text{m}$ , Oberflächenschäden ca.  $70 \mu\text{m}$ .  
3 Laserpolierte Quarzglasoberfläche mit Kalottenschliff ( $\varnothing \sim 3 \text{ mm}$ ).



## POLIEREN MIT ULTRAKURZ-PULSLASERSTRAHLUNG

### Aufgabenstellung

Ultrakurz gepulste (UKP-)Laserstrahlquellen erschließen immer mehr Anwendungsgebiete, da sie Flexibilität im Design von Bauteilen und eine Miniaturisierung bis hin zu Strukturgrößen  $< 10 \mu\text{m}$  ermöglichen. Nach der UKP-Laserablation weisen 3D-Strukturen eine Oberflächenrauheit von  $0,4 \mu\text{m}$  bis  $2 \mu\text{m}$  in Abhängigkeit der verwendeten Prozessparameter auf. Insbesondere bei der Abformung transparenter Kunststoffe werden höchste Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit des formgebenden Werkzeugs gestellt. Da die Strukturgrößen im Bereich einiger Mikrometer liegen, kommt eine manuelle Politur für den nachfolgenden Prozessschritt nicht in Frage. Maschinenunterstützte Polierverfahren sind ebenfalls nicht geeignet für die zum Teil sehr komplexen und kleinen Strukturgrößen.

### Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT ist ein Verfahren mittels UKP-Laserstrahlung entwickelt worden, um nach der UKP-Laserablation die dreidimensionalen Mikrostrukturen in derselben Anlage zu polieren. Eigentlich besteht der Vorteil der UKP-Bearbeitung in einem verdampfungsdominierten Abtragsprozess ohne Schmelzbildung. Zur Glättung von Rauheitsspitzen und zum Polieren von Werkstücken wird allerdings eine schmelzflüssige Phase benötigt. Durch die extrem hohe Pulswiederholrate

- 1 Metallwerkzeug mit dreidimensionalen UKP-Strukturen und selektiver UKP-Politur.
- 2 Prozess zum selektiven UKP-Polieren nach der UKP-Strukturherzeugung und Laserreinigung.

von mehreren 10 MHz und einem Pulspicker, der einzelne Pulsgruppen zeitlich mit geregelter Frequenz im kHz-Bereich separiert, kann auch mit UKP-Laserstrahlung ein lokal begrenzter Schmelzfilm erzeugt werden.

### Ergebnis

Aufgrund der räumlichen und zeitlichen Energiedeposition können Umschmelztiefen im Bereich weniger 100 nm bis hin zu  $10 \mu\text{m}$  je nach Anwendungsfall erzielt werden. Durch das UKP-Polieren kann vor allem eine signifikante Reduzierung der Mikrorauheit erreicht werden, die zu einer Verringerung der Oberflächenrauheit von bis zu einem Faktor 4 führt. Die Flächenrate beträgt dabei  $12,2 \text{ cm}^2/\text{min}$ . In Kombination mit der UKP-basierten Herstellung von dreidimensionalen Mikrostrukturen können neben der Qualitätssteigerung auch selektiv Glanzgradeffekte generiert werden.

### Anwendungsfelder

Neben dem formgebenden Werkzeugbau ist das Polieren mit UKP-Laserstrahlung auch für die Automobil-, Konsumgüter- und Elektronikindustrie interessant.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen des Projekts eVerest unter dem Förderkennzeichen 02P14A145 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Andreas Brenner M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8365  
andreas.brenner@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Martin Reininghaus  
Telefon +49 241 8906-627  
martin.reininghaus@ilt.fraunhofer.de

## LASERPOLIEREN VON MIKROOPTIKEN AUS KUNSTSTOFF

### Aufgabenstellung

Optiken aus Kunststoff werden oft im Spritzgussverfahren oder seltener durch mechanisches Drehen oder Fräsen hergestellt. Für die Fertigung von Einzelstücken bzw. individuellen Optiken sind diese Verfahren jedoch nicht geeignet. Für eine individualisierte Fertigung von Mikrooptiken aus Kunststoff ist ein flexibles Fertigungsverfahren notwendig. Insbesondere in der Medizintechnik, z. B. für Intraokularlinsen oder Kontaktlinsen, ist dies interessant, um patientenspezifische Produkte herzustellen. Laserbasierte Formgebungsverfahren, z. B. das Abtragen durch Ultrakurzpulstrahlung (UKP-Strahlung), können durch weitgehend geometrieunabhängige Bearbeitung und hohe Präzision überzeugen. Um dieses Fertigungsverfahren jedoch für die Mikrooptikfertigung nutzen zu können, bedarf es einer anschließenden Politur der Oberflächentopographie.

### Vorgehensweise

Thermoplastische Kunststoffe können mit dem Laserpolierverfahren durch oberflächennahes Umschmelzen des Materials poliert werden. Da UKP-bearbeitete Oberflächen üblicherweise eine sehr gute Formgenauigkeit, aber eine hohe Mikrorauheit aufweisen, ist eine Politur ohne Änderung der Geometrie notwendig. Die Oberfläche wird dazu vollflächig mittels  $\text{CO}_2$ -Laserstrahlung bis knapp über den Erweichungspunkt aufgeheizt. Hochfrequente Rauheiten werden dabei durch die Oberflächenspannung geglättet. Durch kurze Wechselwir-

kungszeiten wird die thermische Belastung der Gesamtoptik möglichst gering gehalten, um einen Verzug der Geometrie zu vermeiden. Die Wechselwirkungszeit liegt üblicherweise im Bereich unter einer Sekunde. Dies wird mehrfach wiederholt, wobei in jedem Iterationsschritt die Mikrorauheit reduziert wird. Dies wird so lange wiederholt, bis die Rauheit optischer Qualität entspricht.

### Ergebnis

Die Geometrie einer Kunststoffoptik mit einigen Millimetern Durchmesser kann durch Abtragen mit UKP-Strahlung mit einer vertikalen Auflösung von unter  $1 \mu\text{m}$  gefertigt werden. Die Oberflächenrauheit in einem  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  großen Messfeld ist danach etwa  $S_a \approx 0,4 \mu\text{m}$ , was einer trüben Oberfläche entspricht. Durch das Laserpolieren kann diese Rauheit auf  $S_a < 10 \text{ nm}$  reduziert werden.

### Anwendungsfelder

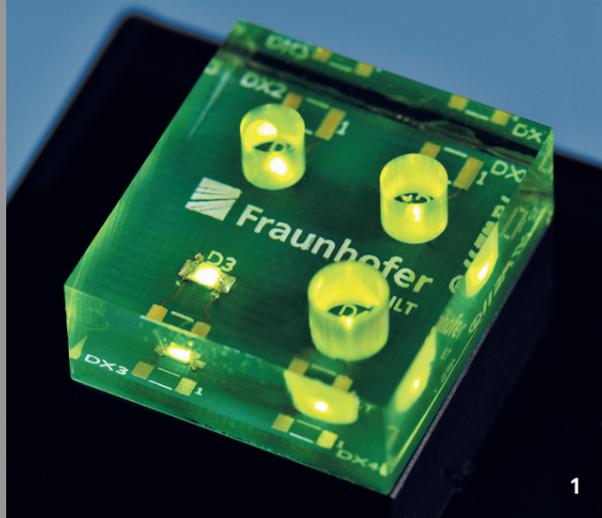
Insbesondere in der Medizintechnik steigt die Nachfrage nach patientenindividualisierten Produkten. Das Verfahren kann z. B. zur Fertigung von Intraokularlinsen oder Kontaktlinsen verwendet werden.

### Ansprechpartner

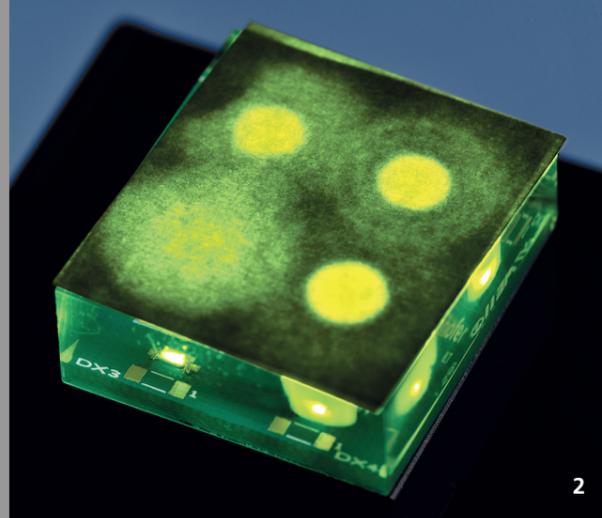
Karsten Braun M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-645  
karsten.braun@ilt.fraunhofer.de

Dr. Edgar Willenborg  
Telefon +49 241 8906-213  
edgar.willenborg@ilt.fraunhofer.de

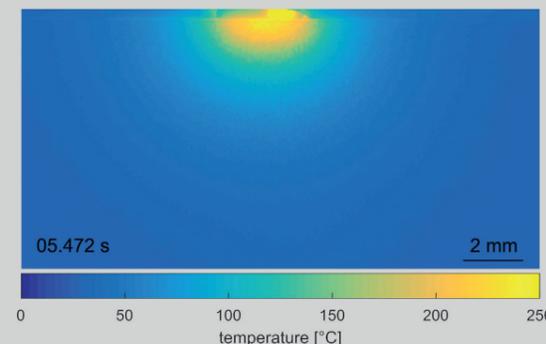
3 Mikrostrukturierte (links) und laserpolierte (rechts) Intraokularlinse.



1



2



3



4

## LICHTABSORBIERENDE STRUKTUREN IN GEDRUCKTEN OPTIKEN MITTELS LASERMODIFIKATION

### Aufgabenstellung

Optische Systeme werden bisher aus diversen optischen Elementen wie Linsen, Spiegel, Blenden etc. zusammengesetzt, um eine definierte Funktion zu erreichen. Eine erhebliche Verringerung der Komplexität von optischen Systemen kann durch den Einsatz von Freiformoberflächen erreicht werden. Ein 3D-Druck von Polymer-Freiformoptiken ist mittels Inkjet- oder SLA-Technologie (Stereolithographie) möglich. Zur weiteren Steigerung des Integrationsgrads von Funktionen lassen sich lichtabsorbierende Strukturen, sogenannte Baffles, mittels fokussierter Laserstrahlung in den 3D-gedruckten Optiken erzeugen.

### Vorgehensweise

Mit ultrakurzen Laserstrahlungspulsen werden die polymerbasierten Werkstoffe modifiziert und dadurch die optischen Absorptions- und Streueigenschaften gezielt lokal verändert. Das Verfahren ist so ausgelegt, dass die Modifikation während des Drucks aber auch nachträglich im Volumen, d. h. in der fertig gedruckten Optik, eingebracht werden kann. Dazu werden auf Basis eines dreidimensionalen digitalen Modells selektiv Bereiche bearbeitet bis die gewünschte Struktur, beispielsweise Blenden oder Diffusoren, in der Optik erzeugt ist.

- 1 *Optische Baffles mit unterschiedlichen Absorptionsgraden.*  
 2 *Lichtformung im Vergleich zur nicht abgeschatteten LED.*

Ein bedeutender Vorteil besteht in der großen Gestaltungsfreiheit des digitalen Modells und der Möglichkeit zur Erzeugung nahezu beliebig komplexer Strukturen mit einer Auflösung von wenigen Mikrometern.

### Ergebnis

Mittels des innovativen Laserverfahrens konnten in 3D-gedruckten refraktiven Optiken lichtabsorbierende Strukturen mehrere Millimeter unter der Oberfläche erzeugt werden. Die Bearbeitung sowohl lateral als auch in der Tiefe ermöglicht eine große Designfreiheit bei der Auslegung von Baffles. Über die Anpassung von Verfahrensparametern und Stapelung von Strukturen lässt sich außerdem der Grad an Resttransmission der Strukturen einstellen. Ein Demonstrator mit zylindrischen Baffles unterschiedlicher Stapeldichte (1, 4 und 8) zur Einstellung der Abstrahlcharakteristik von LEDs wurde umgesetzt. Die Abschattungsfunktion ist in Bild 2 dargestellt.

### Anwendungsfelder

Sowohl im Bereich Automotive als auch in der Luftfahrt verspricht die Technologie neue Möglichkeiten für die Entwicklung von Beleuchtungskonzepten mit erweiterten Gestaltungsmöglichkeiten bei gleichzeitig hohem Leichtbaupotenzial. Der hohe Integrationsgrad eröffnet außerdem neue Möglichkeiten in der Medizintechnik und für messtechnische Lösungen.

Die Arbeiten werden im Rahmen der Internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft, Leitprojekt »Go Beyond 4.0« gefördert.

### Ansprechpartner

Matthias Rehberger M. Sc.  
 Telefon +49 241 8906-8300  
 matthias.rehberger@ilt.fraunhofer.de

## THERMOGRAPHIE ZUR OPTIMIERUNG DES WÄRME-EINTRAGS BEI DER ULTRAKURZPULSBEARBEITUNG

### Aufgabenstellung

Bei der für die Produktivitätssteigerung von Ultrakurzpuls (UKP)-Prozessen erforderlichen Leistungsskalierung kommt es trotz der kurzen Pulsdauern zu einer Qualitätsminderung durch thermische Effekte wie Schmelze, Veränderungen im Werkstoffgefüge oder Verzug. Gerade für die Bearbeitung von thermisch sensiblen Materialien wie Kunststoffen oder dünnen Metallfolien begrenzt der Wärmeeintrag die umsetzbare Leistung.

### Vorgehensweise

Durch den Einsatz von Thermographie während der Bearbeitungsprozesse und dem Abgleich mit mathematischen Modellen wird ein detailliertes Verständnis des Wärmeeintrags erarbeitet. Für die untersuchten Prozesse wird die Wärmeverteilung an der Oberfläche der bearbeiteten Werkstoffe über die Prozesszeit bei unterschiedlichen Prozessparametern erfasst. Die zeitliche Temperaturentwicklung wird ausgewertet und anschließend mit einer Simulation, basierend auf einem physikalischen Restwärmemodell, verglichen.

### Ergebnis

Bei der Akkumulierung von Restwärme bei UKP-Prozessen herrschen sehr komplexe Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern vor, die mit reduzierten physikalischen Modellen nicht gänzlich zu erfassen sind. So können beispiels-

weise Temperaturunterschiede um einen Faktor 3 durch eine Variation der Repetitionsrate bei gleichbleibender mittlerer Leistung entstehen. Außerdem können durch Oberflächeneffekte Änderungen während des Prozesses hervorgerufen werden, die in den statischen Modellen für einen Wärmeeintrag nicht abgedeckt sind. Durch Kenntnis und Verständnis dieser Effekte können Prozesse hinsichtlich minimiertem Wärmeeintrag bei maximaler Produktivität optimiert werden.

### Anwendungsfelder

Das erarbeitete Verständnis hilft bei der Umsetzung hoher mittlerer Leistungen zur Strukturierung von metallischen Werkstücken sowie bei der Bearbeitung von thermisch sensiblen Werkstoffen, z. B. aus den Bereichen Verpackungsindustrie (Kunststoff) und Filtertechnik (Metallfolien).

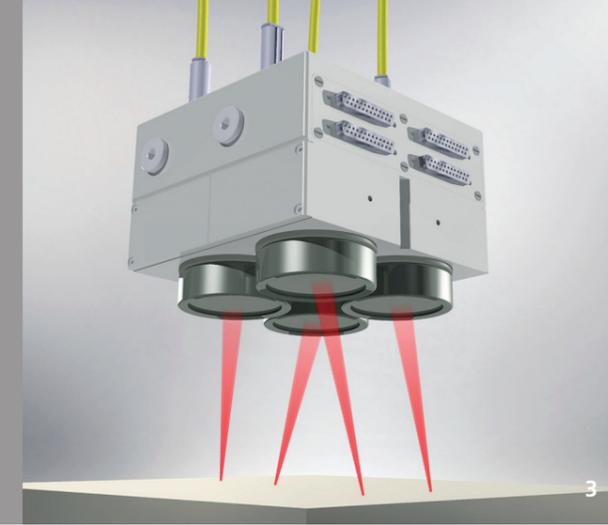
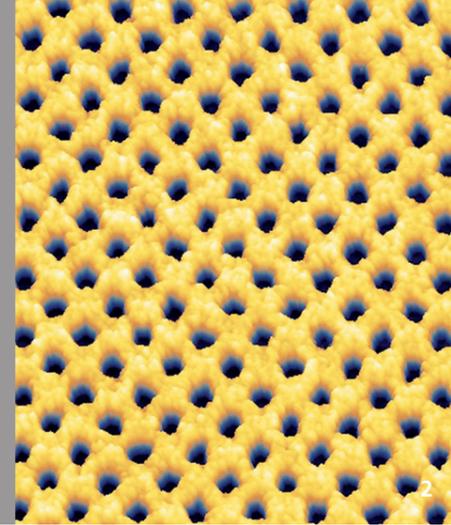
Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Förderkennzeichen PO 591/41-1 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Benedikt Bornschlegel M. Sc.  
 Telefon +49 241 8906-588  
 benedikt.bornschlegel@ilt.rwth-aachen.de

Dipl.-Phys. Martin Reininghaus  
 Telefon +49 241 8906-627  
 martin.reininghaus@ilt.fraunhofer.de

- 3 *Falschfarbenbild der Temperaturverteilung während der UKP-Bearbeitung von Edelstahl.*  
 4 *Kupferstruktur erzeugt mittels UKP-Prozess mit 300 W mittlerer Leistung.*



## NANOSTRUKTURIERUNG IM SUB 50 NM-BEREICH

### Aufgabenstellung

Die Weiterentwicklung der Nanotechnologie erfordert Methoden der Strukturierung mit einer Auflösung unterhalb von 100 nm bei skalierbarer Strukturfläche. Besonders optische Lithographieverfahren mit drastisch reduzierter Wellenlänge eignen sich, um die angestrebten geringen Strukturgrößen zu realisieren. Lithographie mit extrem ultravioletter Strahlung (EUV; 13,5 nm) wird daher derzeit als Strukturierungstechnologie für die nächsten Chip-Generationen in der industriellen Massenfertigung eingeführt. Solche industriellen EUV-Großanlagen sind mit hohen Kosten verbunden und daher für Herstellungsprozesse von kleinen und mittleren Stückzahlen nicht geeignet. Für Anwendungen, die periodische Strukturen erfordern, können Interferenzeffekte eingesetzt werden, welche die Komplexität des optischen Systems verringern und damit die Kosten solcher Systeme deutlich reduzieren.

### Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT wurde eine EUV-Nanostrukturierungsanlage entwickelt, die aus einer EUV-Gasentladungsquelle und einer maßgeschneiderten Interferenz-Transmissionsmaske besteht. Reproduzierbare Belichtungsbedingungen werden durch einen präzisen Dosismonitor und einem ausgereiften Maske-Wafer-Abstandssystem gewährleistet. Durch die

1 Maske-Wafer-Positionierungssystem.

2 Nanostrukturen mit 35 nm Lochdurchmesser (AFM-Aufnahme).

Positionierung des Wafers in einem sub 100 µm-Abstand zur Maske können verschiedene Interferenzeffekte, unter anderem der achromatische Talbotteneffekt, zur Ausbildung einer Intensitätsverteilung genutzt werden. In einem Abstandsbereich von 20 µm bildet sich eine stationäre Intensitätsverteilung aus, die für die nanoskalige Strukturierung genutzt wird. Der Kontrast der Intensitätsmodulation wird unter Verwendung von hocheffizienten Phasenmasken weiter gesteigert, mit dem Ziel die theoretische Auflösungsgrenze zu erreichen.

### Ergebnis

Mit der entwickelten Strukturierungsanlage lassen sich periodische Nanostrukturen bis zu einer Größe von 35 nm realisieren. Somit wird das Angebot an Strukturgrößen, welche durch die Direktstrukturierung erzeugt werden können, um Strukturgrößen einiger 10 nm erweitert. Die neue Technologie wird jetzt einem breiteren Anwenderkreis zur Verfügung gestellt.

### Anwendungsfelder

Periodische Nanostrukturen auf quadratzentimetergroßen Flächen können in der optischen Industrie als breitbandige Antireflexionsbeschichtungen oder Polarisatoren, in der Medizin und Biotechnologie als nanoskalige Partikelfilter oder in der Elektronik und Messtechnik als neuartige sensorische Elemente eingesetzt werden.

### Ansprechpartner

Dr. Serhiy Danylyuk  
Telefon +49 241 8906-525  
serhiy.danylyuk@ilt.fraunhofer.de

Dr. Arnold Gillner  
Telefon +49 241 8906-148  
arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de

## »SCANPLEX« – SCANNER-ARRAY FÜR DIE PARALLELISIERTE LASER-MATERIALBEARBEITUNG

### Aufgabenstellung

Zur Steigerung der Produktivität in der Lasermaterialbearbeitung werden derzeit verschiedene Ansätze verfolgt. Dort wo aufgrund von Prozesslimitierungen durch erhöhte Laserleistung keine weitere Produktivitätssteigerung möglich ist, wird ein Multilaseransatz verfolgt. Durch Erhöhung der Anzahl der verwendeten Laserstrahlquellen ist es möglich, die Prozessgeschwindigkeit nahezu proportional zur Zahl der eingesetzten Strahlquellen zu steigern. Dies erfordert ein Scannersystem, das in der Lage ist, die individuellen Strahlen unabhängig voneinander präzise und schnell über das Bearbeitungsfeld zu führen. Die konventionellen Galvanometerscanner sind aufgrund ihres großen Bauraums für einen Multilaseransatz stark limitiert in Bezug auf die pro Fläche einsetzbaren Laserstrahlen.

### Vorgehensweise

Um die Leistungsfähigkeit einer unabhängigen Multistrahlbearbeitung deutlich zu erhöhen, wurde am Fraunhofer ILT das »Scanplex« Scanner-Array entwickelt, welches in einem Gehäuse von der Größe eines konventionellen 2D-Bearbeitungskopfs vier 2D-Ablenkeinheiten für die parallelisierte Lasermaterialbearbeitung vereint. Der Scankopf basiert auf der am Fraunhofer ILT entwickelten Miniscannertechnologie, die ein geringes Bauvolumen mit einer großen Apertur kombiniert. Durch Verwendung kompakter F-Theta-Objektive ist es möglich, eine Fläche von 120 x 120 mm<sup>2</sup> mit vier separaten Laserstrahlen parallel zu bearbeiten.

### Ergebnis

Ein Demonstrator des Scannerarrays mit 2 x 2 2D-Ablenkeinheiten wurde im Labor aufgebaut und befindet sich derzeit in der Charakterisierungsphase. Das Potenzial dieser Scannertechnologie wird am Beispiel der Mikrostrukturierung mit einem grünen Laser demonstriert. Spezifikationen des Scannerarrays sind:

Bauvolumen L x B x H	140 x 140 x 90 mm <sup>3</sup>
Brennweite f	160 mm
Scanfeldgröße A	120 x 120 mm <sup>2</sup>
Scangeschwindigkeit v <sub>s</sub>	≤ 8 m/s
Apertur D	7 mm
Bestrahlungsstärke E	≤ 500 W/cm <sup>2</sup>
Schnittstelle	XY2-100

### Anwendungsfelder

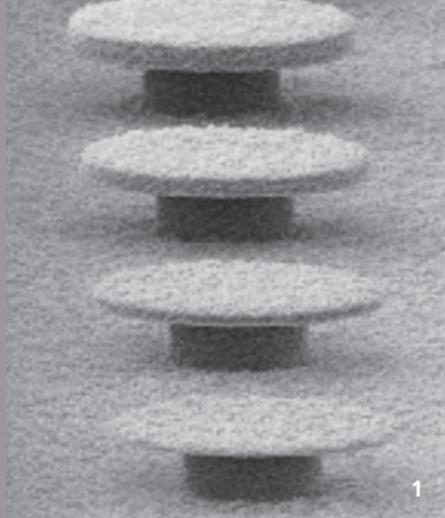
- Laserbeschriften und -gravieren
- Additive Fertigung
- Mikrobearbeitung
- Laserreinigung

### Ansprechpartner

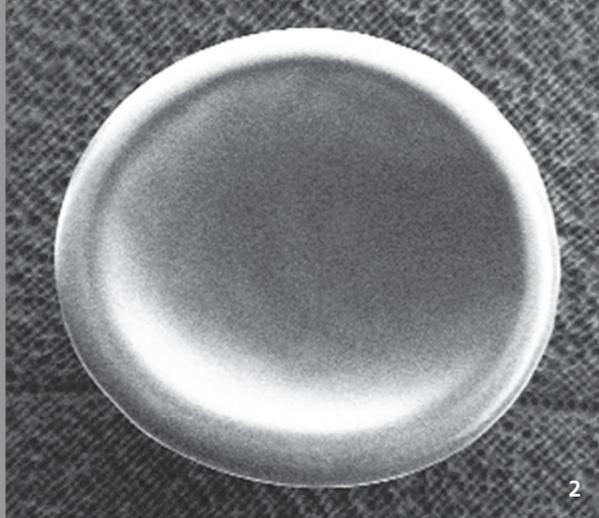
Lazar Bochvarov M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-431  
lazar.bochvarov@ilt.fraunhofer.de

Dr. Achim Lenenbach  
Telefon +49 241 8906-124  
achim.lenenbach@ilt.fraunhofer.de

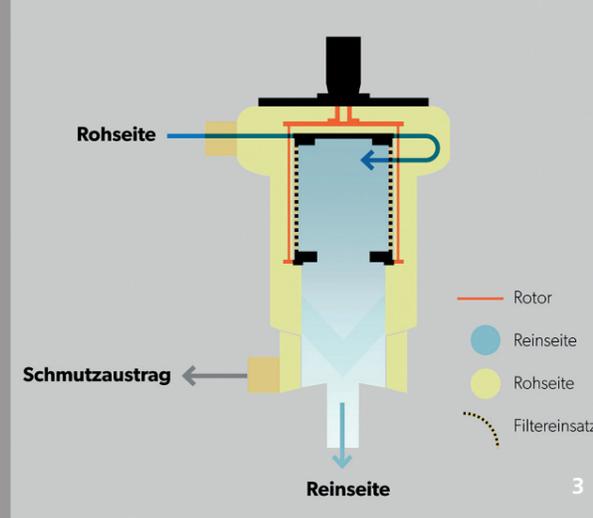
3 »Scanplex« 2x2 Scanner-Array.  
4 2D-Miniscanner.



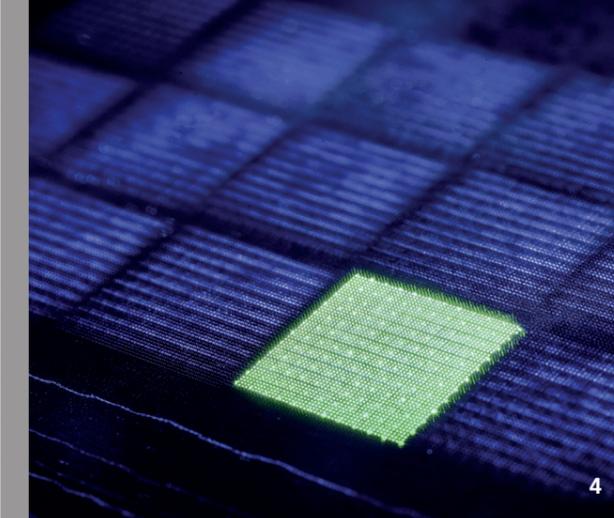
1



2



3



4

## SLE ZUR HERSTELLUNG VON QUARZGLAS-MIKRORESONATOREN

### Aufgabenstellung

Die weltweit stark wachsende Vernetzung im Industrie- und Privatsektor erfordert hochleistungsfähige optische Netzwerktechnologien. Diese basieren auf dem Wavelength-Division-Multiplexing (WDM)-Verfahren. Dabei wird Licht unterschiedlicher Wellenlängen gemischt, um zeitgleich mehrere Informationen übertragen zu können. Das Licht jeder Wellenlänge wird aktuell mit einer eigenen Laserstrahlquelle erzeugt. Die dabei verbrauchte Energie entwickelt sich zunehmend zu einem Umweltfaktor und Kostentreiber. Daher steht die Entwicklung neuartiger, energieeffizienter und kompakter Lichtquellen in verschiedenen Materialien im Fokus. Optische Mikroresonatoren sind eine vielversprechende Möglichkeit, diese Lichtquellen zu realisieren.

### Vorgehensweise

Als innovatives Herstellungsverfahren für Mikroresonatoren aus Quarzglas soll das selektive laser-induzierte Ätzen (SLE) verwendet werden, das nahezu beliebige Geometriefreiheit bietet. Dazu werden die zu realisierenden Resonatorgeometrien in einer CAD/CAM-Prozesskette erstellt, mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung in das Substrat strukturiert und anschließend durch nasschemisches Ätzen freigelegt.

1 Scheibenresonatoren mit 100 µm Durchmesser (REM).

2 Mikroresonator nach Laserpolitur (REM, Draufsicht).

### Ergebnis

Die hergestellten scheibenförmigen Mikroresonatoren besitzen einen Durchmesser von 50–200 µm und eine Scheibenhöhe von 2–10 µm. Die Rauheit auf der Scheibenoberseite wird mit Hilfe von Laserpolieren auf  $R_a \sim 50$  nm reduziert. Die Scheibenunterseite hat abhängig von Strukturierung und Ätzung vor dem Polieren eine Rauheit im Bereich von  $R_a \sim 0,5-1,0$  µm. Die Geometrie der Scheibe kann individuell durch das Anpassen von Strukturierung und Ätzung eingestellt werden.

### Anwendungsfelder

Mikroresonatoren können als Frequenzkämme in optischen Netzwerktechnologien genutzt werden und somit eine Alternative zu den aktuell verwendeten Lichtquellen darstellen. Mikroresonatoren in optisch nichtlinearen Materialien ermöglichen durch entsprechende Phasenanpassung eine einstellbare Frequenzkonversion, die im Bereich optischer Quantensensoren zur Erzeugung verschränkter Photonen benötigt wird.

### Ansprechpartner

Sebastian Simeth M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-358  
sebastian.simeth@ilt.fraunhofer.de

Dr. Christian Kalupka  
Telefon +49 241 8906-276  
christian.kalupka@ilt.fraunhofer.de

## INNOVATIVES FILTERMODUL FÜR DIE ABSCHIEDUNG VON MIKROPLASTIK AUS ABWASSER

### Aufgabenstellung

Als Mikroplastik werden kleinste Kunststoffpartikel mit einem Durchmesser  $< 5$  mm bezeichnet. Mikroplastik wird z. B. bewusst kosmetischen Produkten wie Peelings oder Seifen zugesetzt oder entsteht durch natürlichen Abrieb und Erosion, wie z. B. Reifenabrieb. Solche Mikroplastikpartikel gelangen in unser Abwasser und sind bei der Abwasseraufbereitung in regulären Klärwerken nicht vollständig abscheidbar. Die Entwicklung neuer innovativer Wasserfilter ist daher dringend erforderlich, um die Umwelt zu entlasten.

### Vorgehensweise

Als Ausgangspunkt dient das Konzept eines Zyklonfilters welches im Projekt SimConDrill so modifiziert wird, dass Mikroplastik bis zu 10 µm Durchmesser aus dem Abwasser separiert werden kann. Zur Herstellung dieses Filters wird ein Laserprozess mittels Ultrakurzpulslaser zum Mikrobohren der Filterelemente mit 10 µm Porendurchmesser in Edelstahl entwickelt. Die Simulation des Bohrprozesses im Vorfeld beschleunigt die Entwicklung. Zur fehlerfreien Herstellung der Filter wird eine Prozessüberwachungsstrategie entwickelt und eingesetzt. Diese gewährleistet vor allem, dass alle Bohrlöcher des Filterelements vollständig durchgebohrt sind was für die Funktionalität des Filters in Bezug auf Durchsatz und Effizienz essenziell ist.

### Ergebnis

Mithilfe des erfolgreich angepassten UKP-Laserbohrprozesses ist es möglich, geeignete Bohrlöcher auch in Materialien bis 500 µm Dicke herzustellen.

### Anwendungsfelder

Im Anwendungsgebiet Abwassertechnik sind Metallfilter nicht nur zur Filterung von kleinen Partikeln geeignet, sondern auch zur Probenentnahme in der Analytik. Mit der entwickelten Technologie können bisherige Kunststofffilter durch lasergebohrte Metallfilter ersetzt werden. Darüber hinaus ist das Mikrobohren von Metallfolien auch für viele andere Anwendungsgebiete von Bedeutung. Metallsiebe und Metallfilter werden z. B. in der Biotechnologie, Medizintechnik oder Pharmazie verwendet. Wenn das Verfahren bei fortschreitender Entwicklung immer kleinere Lochgrößen ermöglicht, sind auch Sterilisationsfilter herstellbar.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben SimConDrill wird im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WQ1479E durchgeführt.

### Ansprechpartner

Andrea Lanfermann M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-366  
andrea.lanfermann@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Peter Abels  
Telefon +49 241 8906-428  
peter.abels@ilt.fraunhofer.de

3 Schema des Zyklonfilters,  
© KLASS-Filter GmbH.

4 Bearbeitung einer Metallfolie  
mittels UKP-Laserbohren.



2

## ROBOTERGEFÜHRTES LASERSTRAHLBOHREN VON CFK-PREFORMS

### Aufgabenstellung

Das Bohren von CFK-Bauteilen zur Integration von metallischen Krafteinleitungselementen für lösbare Verbindungen stellt besondere Anforderungen an die Fertigungstechnik. Defekte wie thermische Schädigungen und Delaminationen müssen aufgrund der bisher noch kostenintensiven Carbonfasern und der aufwendigen Prozesskette zur Herstellung von CFK-Bauteilen unbedingt vermieden werden. Zur hochqualitativen und präzisen Herstellung der Bohrungen ist das UKP-Laserbohren bereits am trockenen Preform geeignet. Die prozesssichere Materialbearbeitung scheiterte bisher an einem geeigneten Abtragprozess für 3D-geformte CFK-Halbzeuge.

### Vorgehensweise

Im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts CarboLase wurde eine Technologie entwickelt, um die UKP-Laserstrahlung von der Strahlquelle über eine Hohlkernfaser zu einem Galvo-Scanner zu führen. Der Scanner ist als Bearbeitungskopf auf einem Knickarmroboter montiert. Durch die integrierte Strahlstabilisierung eignet sich die spiegellose Strahlführung für eine dynamische Bewegung des Scanners über einem CFK-Preform. Mittels Scannerbearbeitung können beliebige, an den späteren Belastungsfall angepasste 2,5D-Konturen in den Preform eingebracht werden. Im anschließenden Prozessschritt kann

1 Flexibler und automatisierter UKP-Laserabtrag für CFK-Preforms, © ITA – RWTH Aachen University.

2 Kleberlos befestigte Inserts in einem

CFK-B-Säulendemonstrator, © ITA – RWTH Aachen University.

der funktionalisierte Preform mit Krafteinleitungselementen versehen sowie dem Matrixwerkstoff infundiert werden und aushärten.

### Ergebnis

Durch den defektfreien und präzisen Laserabtrag werden passgenaue Bohrungen gefertigt. Durch die anschließende Matrixinfusion wird eine Multimaterialverbindung ohne zusätzlichen Klebstoff hergestellt. Die direkt mit dem Matrixwerkstoff verbundenen Inserts erzielen eine um bis zu 50 Prozent höhere maximale Auszugkraft gegenüber konventionell gefertigten Bauteilen mit eingeklebten Inserts.

### Anwendungsfelder

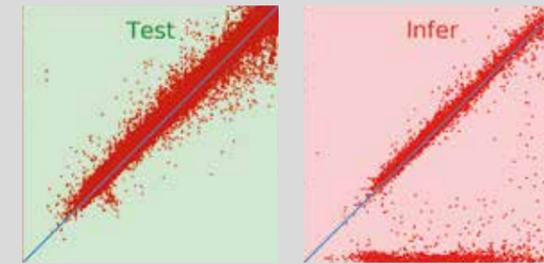
Das dynamische UKP-Laserbohrverfahren ist insbesondere für Leichtbauteile aus dem Luftfahrtbereich als auch für den Automobilbau interessant. Durch die größere Festigkeit der Verbindungselemente kann das sehr gut automatisierbare Verfahren zusätzlich einen Beitrag zu Material- und Kosteneinsparungen bei der Herstellung von CFK-Bauteilen leisten.

Dieses Vorhaben wurde mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Förderkennzeichen EFRE-0800793 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dr. Stefan Janssen  
Telefon +49 241 8906-8076  
stefan.janssen@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Martin Reininghaus  
Telefon +49 241 8906-627  
martin.reininghaus@ilt.fraunhofer.de



3

## RESIDUAL NEURAL NETWORKS ZUR SCHNELLEN VORHERSAGE DER KONIZITÄT EINER BOHRUNG

### Aufgabenstellung

Künstliche neuronale Netze und insbesondere tiefe künstliche neuronale Netze werden in der Bildverarbeitung schon länger erfolgreich eingesetzt. Die Eigenschaft, starke Nichtlinearitäten abbilden zu können, macht diese Netze auch für Vorhersagen in der Produktionstechnik interessant. Eine Hürde, die es dabei zu überwinden gilt, stellen die oftmals nur spärlich vorhandenen Daten dar. Eine mögliche Lösung dieses Problems kann die Anreicherung experimenteller mit simulierten Daten sein. Um die künstlichen neuronalen Netze als ein Werkzeug anzuwenden, müssen die Vorhersagequalität gesichert und die Berechnungszeit verkleinert werden.

### Vorgehensweise

Mit dem existierenden Bohrmodell AsymptoticDrill werden genügend Daten in ausreichender Qualität erstellt. Auf Basis dieser Simulationsdaten kann ein neuronales Netzwerk trainiert und evaluiert werden, welches das Bohrmodell approximiert. Anschließend werden numerische Fehler bestimmt und Laufzeitexperimente durchgeführt.

### Ergebnis

Das trainierte Netzwerk approximiert das Bohrmodell in ausreichender Qualität. Die Berechnungszeit ist im Vergleich mit dem Modell um den Faktor 140 kürzer. Eine Analyse des Zusammenhangs von Trainingsdaten und Approximationsgüte gibt Hinweise auf Kriterien zur Auswahl von Trainingsdaten.

### Anwendungsfelder

Die Methodik kann auf andere Fertigungsverfahren übertragen werden, für die genügend viele Daten mit ausreichender Qualität vorliegen. Die Approximation der Daten ist eine Regressionsaufgabe, die durch das Trainieren des künstlichen neuronalen Netzes zu lösen ist.

Die Arbeiten wurden im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder »EXC 2023 Internet of Production« an der RWTH Aachen University durchgeführt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) e.V. gefördert.

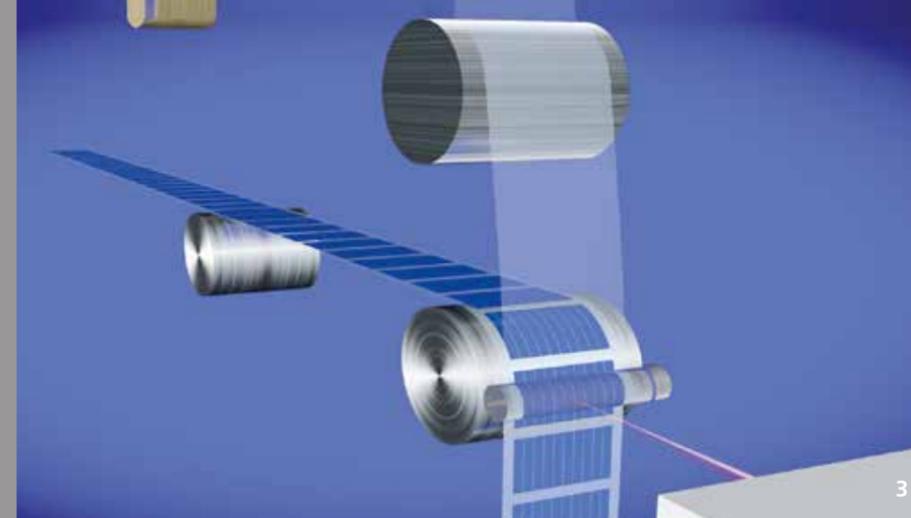
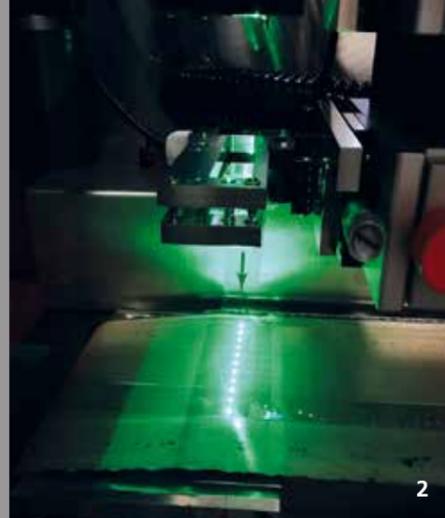
### Ansprechpartner

Christian Heinigk M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-610  
christian.heinigk@nld.rwth-aachen.de

Prof. Wolfgang Schulz  
Telefon +49 241 8906-204  
wolfgang.schulz@ilt.fraunhofer.de

3 Konizität und Vorhersage des neuronalen Netzwerks.

4 Simulationstool AsymptoticDrill.



## KOSTENGÜNSTIGE PRODUKTION ORGANISCHER PHOTOVOLTAIK IM ROLLE-ZU-ROLLE-VERFAHREN

### Aufgabenstellung

Die Photovoltaik zählt zu den tragenden Säulen der regenerativen Energien. Neben der klassischen Siliziumphotovoltaik bietet die organische Photovoltaik neue Möglichkeiten, wie z. B. einen ressourcenschonenden Einsatz von Materialien. Mit wenigen Gramm organischen Materials können quadrategroße Photovoltaikflächen produziert werden, die sich durch Flexibilität und Transparenz auszeichnen. Eine Vielzahl von Oberflächen kann zukünftig durch dekorativ gestaltete organische Solarzellen zur Energiegewinnung beitragen, sodass die industrielle Produktion von organischer Photovoltaik in den Fokus der Forschung und Entwicklung gerückt ist. Die Produktion in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess ohne aufwendige Vakuumtechnologien stellt dabei eine kostengünstige Schlüsseltechnologie dar.

### Vorgehensweise

Aktuelle Erkenntnisse aus dem Labor zum Schichtaufbau einer organischen Solarzelle werden auf den Rolle-zu-Rolle-Prozess übertragen und dabei mit innovativen Prozesstechnologien kombiniert. Alle Teilprozesse, von der Beschichtung über die Zellenseparierung mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung bis

- 1 Rolle-zu-Rolle-Anlage zur Produktion von organischen Solarzellen.  
 2 Scribing/Separierung mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung.

hin zur Verkapselung der fertigen Solarzelle, werden optimiert, um den effizientesten Herstellungsprozess umzusetzen. Inline-Prozessanalytik und eine ganzheitliche Prozesssteuerung vervollständigen die umgesetzte Anlagentechnik.

### Ergebnis

Mit Bandgeschwindigkeiten bis zu 5 m/min werden Dünnschichten mit Dicken zwischen 10 nm und 250 nm auf leitfähig beschichtetem PET-Substrat aufgetragen. Hochpräzise und innovative Laserverfahren aus dem Kurzpuls- und Ultrakurzpulsbereich werden in den Teilschritten Trocknung, Scribing/Separation, Entschichtung und Verkapselung angewendet. Durch die eingebaute Sensorik werden die einzelnen Prozesse überwacht und eine Prozessregelung realisiert.

### Anwendungsfelder

Organische Solarzellen können aufgrund ihrer Flexibilität und Transparenz in verschiedenen Bereichen angewendet werden. Einige Anwendungsbeispiele aus dem breiten Spektrum sind das Einarbeiten in Kleidung, das Aufbringen auf gekrümmte Flächen und Installationen im Innenraum.

Dieses Vorhaben wurde mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Förderkennzeichen EFRE-0801547 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Ludwig Pongratz M. Sc.  
 Telefon +49 241 8906-8044  
 ludwig.pongratz@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Martin Reininghaus  
 Telefon +49 241 8906-627  
 martin.reininghaus@ilt.fraunhofer.de

## LASERDURCHSTRAHLSCHWEISSEN VON MULTILAYER-POLYMERFOLIEN IM ROLLE-ZU-ROLLE-VERFAHREN

### Aufgabenstellung

Rolle-zu-Rolle-Fertigungsprozesse gewinnen in vielen Anwendungsfeldern zunehmend an Bedeutung. Sie stellen eine Schlüsselkomponente für eine effiziente industrielle Produktion dar. Dies gilt insbesondere bei mehrstufigen Produktionsketten, bei denen z. B. auch Beschichtungsverfahren zum Einsatz kommen. Ein Beispiel hierfür ist die photonische Produktion von organischen Solarzellen. Hierbei werden in mehreren kombinierten Beschichtungs- und Laserabtragverfahren auf einem flexiblen polymerbasierten Grundsubstrat funktionstüchtige Solarzellen produziert. Aufgrund der enthaltenen organischen Stoffe sind diese Solarzellen nach ihrer Produktion hochsensitiv gegen Wasser und Sauerstoff. Um einen Schutz gegen Degradation und damit eine ausreichende Lebensdauer in der späteren Anwendung zu gewährleisten, ist eine Verkapselung zwingend notwendig. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad beizubehalten, erfolgt diese mit sogenannten transparenten Ultra-Hohen-Barrierfolien (UBF). Die thermoplastische Polymergrundfolie dieser Multilayer-Polymerfolien ermöglicht dabei ein direktes Verschweißen mit einer entsprechenden wellenlängenangepassten Laserstrahlquelle.

### Vorgehensweise

Die besondere Herausforderung beim Einsatz des Laserdurchstrahlschweißens im Rolle-zu-Rolle-Verfahren liegt darin, trotz bewegter Polymerfolienbahnen den notwendigen Fügedruck lokal einzubringen. Hierfür wird wahlweise eine Globo-Optik

eingesetzt, die mittels Achssystem bewegt werden kann und einen lokalen Andruck mittels Glaskugel ermöglicht, oder alternativ ein galvanometrisches Scannersystem in Kombination mit einer Glaswalze.

### Ergebnis

In beiden Fällen können belastbare und reproduzierbare Schweißnähte erzeugt werden. Während die Konfiguration mit Globo-Optik sich eher für Schweißnähte in Vorschubrichtung und bei geringeren Bahngeschwindigkeiten eignet, können mit dem aufwendigeren, scannerbasierten Ansatz auch Quernähte bei höheren Bahngeschwindigkeiten realisiert werden. Je nach Anforderungen kann somit der passende Verfahrensansatz genutzt werden.

### Anwendungsfelder

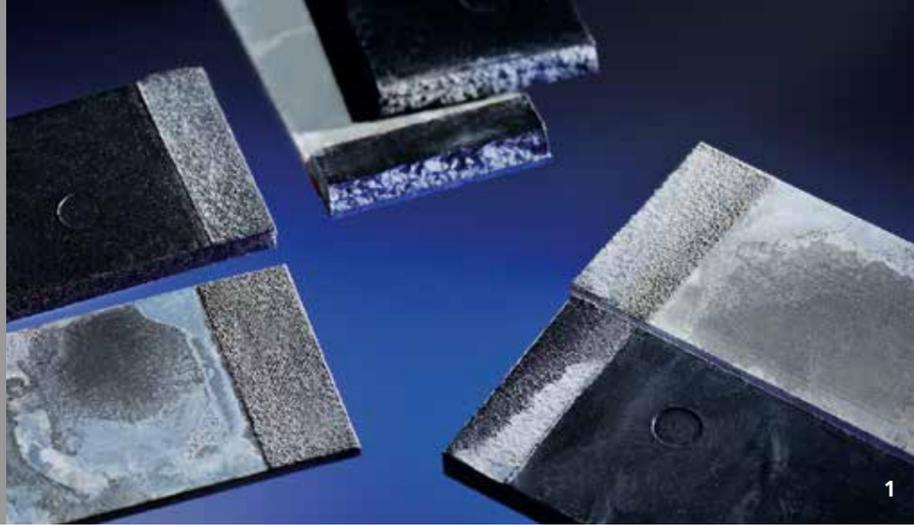
Interessante Branchen sind unter anderem die Produktion von organischer Elektronik, die Verpackungstechnik, die Medizintechnik aber auch die Automobilindustrie.

### Ansprechpartner

Maximilian Brosda M. Eng.  
 Telefon +49 241 8906-208  
 maximilian.brosda@ilt.fraunhofer.de

Dr. Alexander Olowinsky  
 Telefon +49 241 8906-491  
 alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de

- 3 Kombination aus Scannersystem und Glaswalze.



## ALTERUNGSVERHALTEN THERMISCH GEFÜGTER KUNSTSTOFF-METALL- HYBRIDVERBINDUNGEN

### Aufgabenstellung

Die Multi-Materialbauweise öffnet durch die Verwendung verschiedener, an die lokalen Belastungen angepasster Werkstoffe neue Wege zur Gewichtsoptimierung. Dabei stellt die Verbindungstechnik, insbesondere für Kunststoffe und Metalle, durch die physikalische und chemische Ungleichheit der Materialien eine besondere Herausforderung dar. Zusätzlich werden die Hybridverbindungen im Gebrauch durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften, wie z. B. thermische Ausdehnung und korrosive Unterwanderung, stark beansprucht. Das Alterungsverhalten solcher Verbindungen ist deshalb für die Langzeitstabilität von Bauteilen von entscheidender Bedeutung.

### Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT wurde eine Prozesskette entwickelt, bei der mittels Laserstrahlung Mikrostrukturen im metallischen Fügepartner erzeugt werden. Im anschließenden thermischen Fügeprozess wird der Kunststoff aufgeschmolzen und verkrallt sich in den Mikrostrukturen. Um Aussagen über die Langzeitstabilität treffen zu können, werden Hybridverbindungen von verschiedenen Metallen (Aluminiumlegierungen, Stahl) mit Polypropylen Klimawechsel- und Korrosionstests unterzogen. Über eine Zugscherprüfung wird die Festigkeit vor und nach der Auslagerung ermittelt.

1 Bruchflächen der Hybridverbindung nach Korrosionstests.

### Ergebnis

Die Ergebnisse der Zugscherprüfung vor und nach den Klimawechseltests mit bis zu 30 Zyklen zwischen -40 °C und 80 °C zeigen keine signifikante Abnahme der Verbundfestigkeit der Hybridverbindungen. Ebenso haben die Korrosionsklimawechseltests keinen nachweisbaren negativen Einfluss auf die Zugscherfestigkeit. Dies bestätigt die Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen Fügeverfahren für Kunststoff-Metall-Hybridverbindungen für eine Vielzahl von Anwendungen.

### Anwendungsfelder

Durch die gute Langzeitstabilität der Hybridverbindung bei verschiedensten Umwelteinflüssen eignet sich das laserbasierte Fügeverfahren insbesondere für Anwendungen im Automobilbau oder der Luft- und Raumfahrtbranche.

Das diesem Bericht zugrundeliegende IGF-Vorhaben AGeD wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20.326N durchgeführt.

### Ansprechpartner

Kira van der Straeten M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-158  
kira.van.der.straeten@ilt.fraunhofer.de

Dr. Alexander Olowinsky  
Telefon +49 241 8906-491  
alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de



## LASERSTRAHL-MIKRO- SCHWEISSEN MIT STRAHL- QUELLEN IM SICHTBAREN WELLENLÄNGENBEREICH

### Aufgabenstellung

Die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen und Alltagsgegenständen erfordert Kontaktierungen von elektrisch und thermisch hochleitenden Materialien wie Kupfer und Aluminium. Die zurzeit industriell eingesetzten Laserstrahlquellen arbeiten typischerweise mit einer Wellenlänge ( $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ ), die insbesondere bei Kupferbasislegierungen eine geringe Absorption aufweisen und damit zu einer unsteten Energieeinbringung in den Schweißprozess führen.

### Vorgehensweise

Um bei einem Schweißprozess eine konstantere Energieeinbringung zu realisieren und Unregelmäßigkeiten aufgrund von Fluktuationen des Einkoppelgrads in der Schweißnaht zu reduzieren, können Strahlquellen mit einer Wellenlänge im sichtbaren Spektrum eingesetzt werden, um so eine höhere Absorption z. B. bei Kupferlegierungen zu erreichen.

Die dafür verwendbaren Strahlquellen arbeiten üblicherweise mit elektromagnetischen Wellen mit einer Wellenlänge von 515/532 nm (grün) oder 450 nm (blau) und basieren entweder auf einer Frequenzverdopplung der herkömmlichen Festkörperlaser im nahen infraroten Wellenlängenbereich oder verwenden direkte Diodenlaser.



### Ergebnis

Neben der Betrachtung der veränderten Fokussierbedingungen aufgrund der unterschiedlichen Strahlerzeugung bei blauen und grünen Strahlquellen ist insbesondere das Erreichen hoher Vorschubgeschwindigkeiten untersucht worden. Weiterhin wurde die erzielbare Einschweißtiefe in Relation zur Laserleistung betrachtet und in Zusammenhang mit den realisierbaren Einkoppelgraden gesetzt. Zusätzlich ist die Beeinflussung der Nahtqualität durch Spritzer, Poren o. ä., quantifiziert durch die Nahtoberflächenrauheit, bei Verwendung unterschiedlicher Prozessregime untersucht worden.

### Anwendungsfelder

Mögliche Anwendungsfelder dieser neuen Laserstrahlquellen im sichtbaren Wellenlängenbereich liegen insbesondere dort, wo Fügeverbindungen mit Metallen realisiert werden müssen, die aufgrund ihrer absorptionsbedingten Eigenschaften Unregelmäßigkeiten in der Nahtausprägung aufweisen. Dazu gehören insbesondere die Themenfelder der Leistungselektronik, Elektromobilität und Mikroelektronik.

### Ansprechpartner

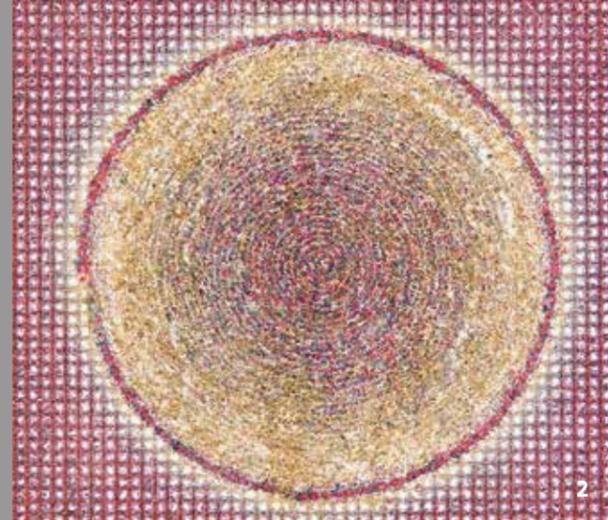
André Häusler M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-640  
andre.haeusler@ilt.fraunhofer.de

Dr. Alexander Olowinsky  
Telefon +49 241 8906-491  
alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de

2 Dünnschichtkontaktierung mittels grüner Laserstrahlquellen.  
3 Laserstrahlschweißen von Batteriemodulen mit blauer Laserstrahlung.



1



2



3



4

## MIKROSCHWEISSEN MIT KURZPULS- LASERSTRAHLQUELLEN

### Aufgabenstellung

Hochstromverbinder aus Kupfer oder Aluminium mit großen Querschnitten stellen eine besondere Herausforderung in der Verbindungstechnik dar. Sie werden immer häufiger in der Leistungselektronik verwendet und ihre Kontaktierung erfolgt auf thermisch und mechanisch empfindlichen Substraten (z. B. Batteriezellen und Leiterplatten). Eine präzise Steuerung der Einschweißtiefe und des Energieeintrags mit minimaler Bauteilbelastung ist dabei unerlässlich. Durch die Verwendung von Nanosekunden-Strahlquellen bietet sich hier ein neuartiger Lösungsansatz zur besseren Kontrolle des Energieeinsatzes und zur Kontaktierung artfremder Werkstoffe an.

### Vorgehensweise

Ein nanosekundengepulster Faserlaser wird hauptsächlich für Anwendungen, bei denen Materialabtrag gewünscht ist wie Laserbohren, -gravieren, -schneiden und Laserstrukturieren, verwendet. Zur Kontaktierung von Kupfer- und Aluminium-Verbindern werden in der Regel Faserlaser eingesetzt, die im Dauerbetrieb (CW) betrieben werden. Zur Untersuchung der Eignung einer gepulsten Laserstrahlquelle zum Schweißen werden die Prozessgrenzen definiert und Proben mit artfremden

Werkstoffen bezüglich verschiedener Eigenschaften, wie z. B. des Kontaktwiderstands und der mechanischen Belastbarkeit, untersucht. Für Benchmarking-Zwecke wird ein Faserlaser im Dauerbetrieb zur Herstellung von Vergleichsproben eingesetzt.

### Ergebnis

Die beschriebene Laserstrahlquelle wurde in einen typischen Aufbau zum Laserschweißen integriert und zum Schweißen von Kupferverbindern bis zu 300 µm Dicke eingesetzt. Es konnten Einschweißtiefen und Nähte mit vergleichbarer Qualität zum konventionellen Laserstrahlschweißen nachgewiesen werden.

### Anwendungsfelder

Schweißen mit einem nanosekundengepulsten Faserlaser kann in unterschiedlichen Bereichen der Leistungselektronik und der Batterietechnik zum Einsatz kommen. Insbesondere dort, wo mehrere Verfahren (u. a. Strukturieren und Schweißen) parallel laufen sollen, ist der Nanosekundenlaser von großer Bedeutung. Zudem erlaubt der Einsatz dieser Laserstrahlquelle eine höhere Flexibilität beim Schweißen von hochglänzenden Metallen.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen »Otto von Guericke e. V.« geförderten MikroPuls-Vorhabens unter dem Förderkennzeichen IGF-Nr. 20.895 N durchgeführt.

### Ansprechpartner

Elie Haddad M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8013  
elie.haddad@ilt.fraunhofer.de

Dr. Alexander Olowinsky  
Telefon +49 241 8906-143  
alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de

1 Pluspol-Kontaktierung mit einem Kupferverbinder ohne Durchbrand.  
2 Spiralförmige Blindschweißung.

## LASERSCHWEISSANLAGE ZUR FERTIGUNG GROSSER LITHIUM-IONEN-BATTERIE- RUNDZELLEN

### Aufgabenstellung

Für die Fertigung großer Lithium-Batterie-Rundzellen müssen die Zellpole mit dem Zellwickel leitend verbunden werden. Hierfür wird eine Laserschweißzelle benötigt, die für die Herstellung von Kleinserien verwendet werden kann. Ziel ist es, eine besonders flexible Anlagentechnik aufzubauen, die variable Schweißnahtgeometrien ermöglicht und für unterschiedliche metallische Materialien geeignet ist.

### Vorgehensweise

Zunächst werden am Fraunhofer ILT Studien für die Machbarkeit und Prozessentwicklung der Schweißaufgaben durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Studien lassen sich die Anforderungen für die Anlagentechnik ableiten. Anschließend werden die nötigen Komponenten am Fraunhofer ILT aufgebaut und die vollständige Anlage für die halbautomatische Prozessführung vor der Auslieferung getestet.

### Ergebnis

Die entwickelte Laserschweißanlage zur Fertigung großer Rundzellen wurde bereits an einen Kunden ausgeliefert, vor Ort installiert und gemeinsam mit den Bedienern in Betrieb genommen. Seitdem wurden bereits mehrere Kleinserien auf der Anlage erfolgreich produziert.

Mit Unterstützung des Fraunhofer ILT konnte ein weiterer Laserschweißprozess für die Fertigung eines Sicherheitsbauteils entwickelt werden, der inzwischen auch erfolgreich auf der Laserschweißanlage implementiert wurde. Somit konnte das Portfolio der Laserschweißaufgaben dank der hohen Anlagenflexibilität erweitert werden. Die Entwicklung und Implementierung weiterer Schweißaufgaben ist bereits in Planung.

### Anwendungsfelder

Die Laserschweißanlage ist für das Fügen metallischer Werkstoffe geeignet. Dies schließt auch Buntmetalle und Edelmetalle mit ein.

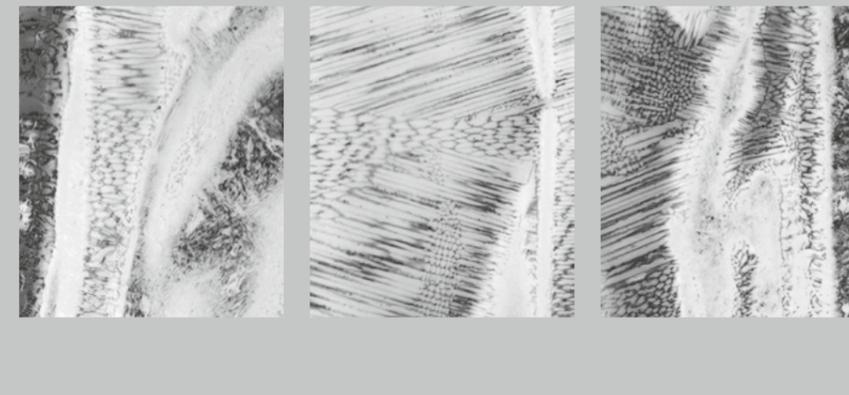
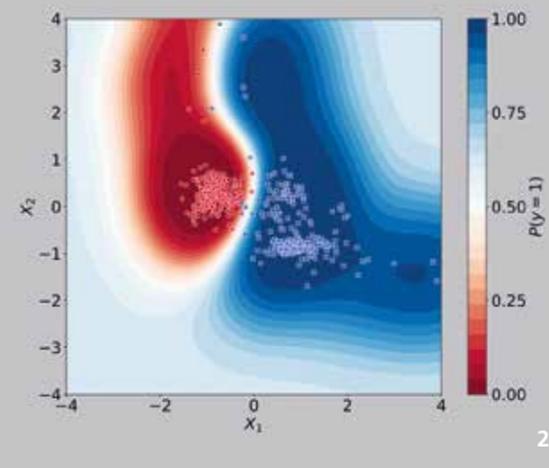
Die großen Rundzellen, die derzeit mit der Laserschweißanlage gefertigt werden, finden hauptsächlich im Automobilssektor oder in der Luft- und Raumfahrt Anwendung. Dieser Bereich soll aber deutlich erweitert werden, beispielsweise auf maritime Anwendungen.

### Ansprechpartner

Johanna Helm M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-8382  
johanna.helm@ilt.fraunhofer.de

Dr. Alexander Olowinsky  
Telefon +49 241 8906-491  
alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de

3 Große Rundzelle, © EAS Batteries GmbH.  
4 Prozessanlage zum Schweißen großer Rundzellen.



## KI-BASIERTE QUALITÄTS- SICHERUNG BEIM BATTERIESCHWEISSEN

### Aufgabenstellung

Im Auftrag der 4D Ingenieurgesellschaft für Technische Dienstleistungen mbH wurde der Einsatz KI-basierter Methoden zur Überwachung von Kontaktschweißungen an Batterien evaluiert. Ein Sensor erfasst die von der Wechselwirkungszone emittierte Prozessstrahlung während des Schweißens. Klassische Ansätze zur Interpretation der Sensorsignale ergeben keine Bewertung, die pseudofehlerfrei und gleichzeitig ohne Fehlerschlupf ist. Um die Sensorsignale zuverlässiger zu interpretieren, werden Methoden der künstlichen Intelligenz appliziert.

### Vorgehensweise

Für die Untersuchungen standen mehr als 32.000 Messsignale von Einzelschweißungen inklusive deren Qualitätsbewertung (i.O. bzw. n.i.O.) zur Verfügung. Auf Basis dieser Messungen wurden charakteristische Merkmale und spezifische Fingerabdrücke der Signale extrahiert. Neben einfachen Signalmerkmalen, wie Mittelwert und Standardabweichung, wurden zusätzlich zeit- und frequenzabhängige Merkmale wie beispielsweise Fourier-, Wavelet- und Autokorrelationskoeffizienten aus den Signalen extrahiert. Anschließend wurde

1 Verschweißter Batterieverbund bestehend aus mehreren Einzelzellen.

2 Entscheidungsgrenzen eines Klassifizierungsalgorithmus im 2D-Merkmalraum.

ein Algorithmus aus dem Bereich des überwachten Lernens verwendet, um ein Klassifizierungsmodell anzulernen, mit dem Schweißungen sowie die zugehörigen Qualitätskategorien (i.O. bzw. n.i.O.) zu bewerten sind.

### Ergebnis

Die KI-basierte Auswertung ermöglicht eine Einteilung der Schweißnahtqualität in n.i.O. und i.O. Die Genauigkeit des Klassifizierungsergebnisses erreicht dabei für diesen Datensatz mehr als 80 Prozent, obwohl eine visuelle Bewertung der Signale kaum eine Unterscheidung der Qualitätskategorien erlaubt. Während der Entwicklung wurden 700 Merkmale basierend auf dem Rohsignal ermittelt. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Fehlererkennungsrate mit den signifikantesten 31 Merkmalen ein Maximum erreicht. Dies reduziert den Aufwand für die Anwendung um mehr als 95 Prozent.

### Anwendungsfelder

Das Einsatzgebiet des KI-Verfahrens ist die Erkennung von Unregelmäßigkeiten und Fehlern beim Laserstrahlschweißen von Batteriebauteilen. Das Verfahren kann darüber hinaus im Rahmen von »Industrie 4.0« auch zur Dokumentation und insbesondere zur Verbesserung der Qualität weiterer Lasermaterialbearbeitungsprozesse genutzt werden.

### Ansprechpartner

Christian Knaak M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-281  
christian.knaak@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Peter Abels  
Telefon +49 241 8906-428  
peter.abels@ilt.fraunhofer.de

## ARTUNGLEICHES SCHWEISSEN ULTRA-HOCHFESTER UND SUPRADUKTILER STÄHLE

### Aufgabenstellung

Beim Schmelzschweißen mit Laserstrahlung stellen sich bei artungleichen Verbindungen unterschiedlich legierter Stähle lokal variierende Legierungen ein, die sich durch ihre Zusammensetzung und damit ihr Gefüge und ihre mechanischen Eigenschaften unterscheiden. Da eine Vorhersage der Eigenschaften schwierig ist, sollen zunächst die Durchmischung und die sich daraus ergebenden Verteilungen der Legierungselemente ermittelt werden.

### Vorgehensweise

Im Rahmen von Schweißversuchen an Überlappstößen werden Proben der Kombinationen aus einem pressgehärteten Chromstahl bzw. einem Dualphasenstahl mit einem hochmanganhaltigen Stahl unter variablen Parametern erzeugt. Die Auswertung erfolgt metallographisch durch Elementanalyse per EDX sowie durch Kleinlast-Härteprüfung. In KS2- und Scherzugversuchen wurden die mechanischen Eigenschaften geprüft.

### Ergebnis

Durch die Kombination der drei Analyseverfahren ist eine präzise Bestimmung der entstandenen Phasen möglich. In allen Verbindungen stellt sich ein weiter Bereich von Gefügen zwischen austenitisch und martensitisch mit unterschiedlichen Varietäten ein. Ein Einfluss der lokalen Legierungen auf die Festigkeit konnte nicht festgestellt werden, da ein Versagen

der Proben in der Wärmeeinflusszone des Dualphasenstahls bzw. des martensitischen Stahls eintrat. In Verbindung mit dem höher gekohlten martensitischen Chromstahl führt eine Wärmebehandlung zu einer erheblichen Verbesserung der Festigkeit. Die Eintragung der lokalen Legierungen im COHMS-Diagramm zeigt die Gültigkeit der dort getroffenen Annahmen auch für laserstrahlgeschweißte Verbindungen.

### Anwendungsfelder

Die grundlegenden Arbeiten zeigen die Stärken und Schwächen der jeweiligen Analyse- und Prüfverfahren auf. Speziell in der Festigkeitsuntersuchung sind noch Anpassungen an die Prüfteilgeometrie erforderlich, um die Schweißnaht selbst zu prüfen. Gelingt dies, so steht für nahezu alle Anwendungsbereiche der Blechbearbeitung von Stahl ein Bewertungsverfahren für die Beurteilung artungleicher Schmelzschweißverbindungen zur Verfügung.

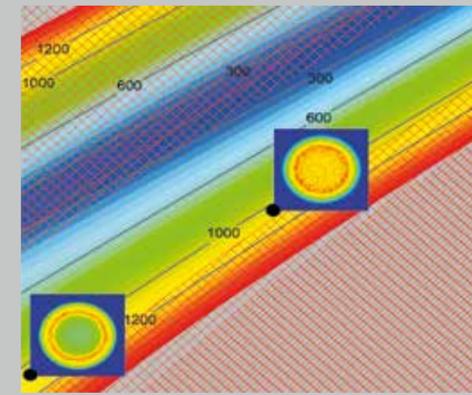
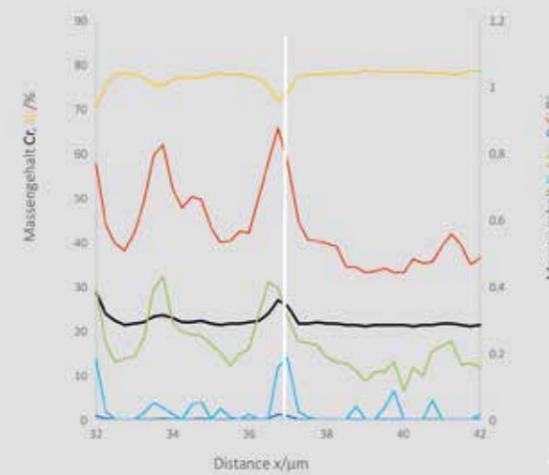
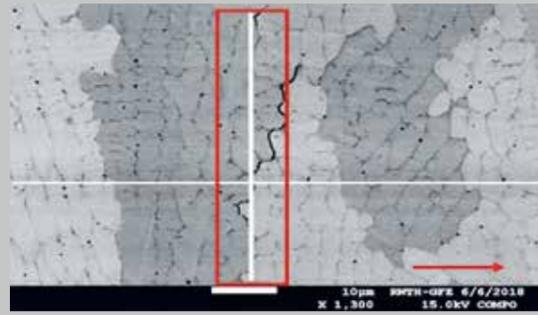
Das IGF-Vorhaben VP 1175 (IGF 19556 N) der FOSTA wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Martin Dahmen  
Telefon +49 241 8906-307  
martin.dahmen@ilt.fraunhofer.de

Dr. Dirk Petring  
Telefon +49 241 8906-210  
dirk.petring@ilt.fraunhofer.de

3 Lokale Gefügeausbildung durch variierende Durchmischung in der Schweißnaht.



## RISSBILDUNGSANALYSE IN SCHWEISSUNGEN VON NIMONIC 75 UND STELLIT 31

### Aufgabenstellung

Im Rahmen einer Verfahrensentwicklung wurde die Schweiß-eignung einer Verbindung von Nimonic 75 und Stellite 31 festgestellt. Nach Freigabe des Verfahrens wurde eine Variante des Nimonic eingesetzt, die beim Schweißen zur Bildung von Heißrissen führte. In einer Fehleranalyse galt es, die Ursache der Rissbildung zu bestimmen und den Wirkpfad zu ermitteln sowie darüber hinaus eine Vorschrift für die künftige Vermeidung des Fehlers auszuarbeiten.

### Vorgehensweise

Schweißversuche haben gezeigt, dass die Anwesenheit von Bor, welches der Nimonic-Variante 2.4951 zur Verbesserung der Kriechbeständigkeit zugesetzt wird, beim Schweißen zu Rissen führt. Bei dieser Legierung traten die Risse über die ganze Schweißnaht verteilt auf, während sie bei der Variante 2.4630 auf die Slopes begrenzt waren. Um die Schadenshypothese zu prüfen, wurde eine elektronenmikroskopische Studie durchgeführt.

### Ergebnis

Nachdem in der metallographischen Analyse keine Unterschiede zwischen den Werkstoffvarianten festgestellt werden konnten, lieferte die hoch aufgelöste Elektronenstrahl-Mikroanalyse Hinweise auf die Verursachung der Schweißfehler durch Bor. Im dendritisch erstarrenden Gefüge der Schweißnaht führt dieses Element durch Ko-Segregation mit Begleit- und Legierungselementen, insbesondere Silizium, zur Bildung von Ausscheidungen an den Korngrenzen, die aufgrund ihrer niedrigen Dehnbarkeit als Heißrisse im Gefüge zurückbleiben. Aus den Ergebnissen wurden eine Begrenzung der Legierung bezüglich rissbildender Elemente und eine Anpassung der Fügestrategie abgeleitet. Diese Erkenntnisse fließen in ein Reparaturverfahren für Turbinenteile ein. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass generativ gefertigte Bauteile sicherer zu schweißen sind, da hier die Legierungen besser einstellbar sind als bei Knetlegierungen.

### Anwendungsfelder

Die eingesetzten Legierungen finden aufgrund ihrer guten Eigenschaften bei hohen Temperaturen Anwendung im Gasturbinenbau. Mit der durch die Forschungsergebnisse verbesserten Schweiß-eignung und -sicherheit können geschweißte Verbindungen der beiden Werkstoffe auch im Apparatebau verwendet werden.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Martin Dahmen  
Telefon +49 241 8906-307  
martin.dahmen@ilt.fraunhofer.de

Dr. Dirk Petring  
Telefon +49 241 8906-210  
dirk.petring@ilt.fraunhofer.de

1 Mikrostruktur im Flachschnitt.

2 Elementverteilung (im markierten Bereich).

## MULTIFUNKTIONALE LASERWERKZEUGE FÜR LEICHTBAU UND ELEKTROMOBILITÄT

### Aufgabenstellung

Variante-reiche Produkte, wechselnde Losgrößen und neue Produktionsmethoden erfordern hochflexible Fertigungs-konzepte. Hierbei ist die Lasertechnik im Zusammenspiel mit der Digitalisierung eine prädestinierte Lösung für eine wirtschaftliche Produktion. Im Vorhaben MultiPROmobil werden ein multifunktionaler Laserbearbeitungskopf sowie eine Robotertechnologie für die flexible und wirtschaftliche Fertigung von Bauteilen in der Elektromobilität entwickelt.

### Vorgehensweise

Auf Basis einer Analyse der Anforderungen an Fertigung und Bauteileigenschaften werden zunächst die Verfahren Schneiden, Schweißen und Additive Fertigung in einem Bear-beitungskopf integriert. Zum Einsatz kommt ein Kombikopf, mit dem die verschiedenen Verfahren ohne Werkzeugwechsel durchgeführt werden können. Als Anwendungsbeispiel dient der Dreieckslenker eines Elektrofahrzeugs, der in einer multifunktionalen Laser-Roboterzelle bearbeitet werden soll. Eine flexible Spanntechnik dient dabei zur sicheren Aufnahme der Bauteile während der Fertigung. Mit digitalen Zwillingen werden Maschine, Prozesse und Bauteil abgebildet, sodass eine virtuelle Inbetriebnahme möglich wird.

3 Kennlinienfeld der Strahlverteilungen für additive Fertigungsschritte.

### Ergebnis

Für die Lösung der Fertigungsaufgabe wurde ein multi-funktionaler Bearbeitungskopf als Werkzeug ausgelegt. Die Konstruktion eines Labormusters ist abgeschlossen. Besondere Merkmale sind ein optisches System für die flexible Anpassung der Strahleigenschaften an die Erfordernisse der drei unter-schiedlichen Verfahren sowie die Funktionen der Zuführung von Gas und Zusatzwerkstoff. Roboter, Spannvorrichtung und Lasertechnik werden in der Fertigungszelle vernetzt und als digitale Zwillinge für die Optimierung der Fertigungsaufgaben realisiert.

### Anwendungsfelder

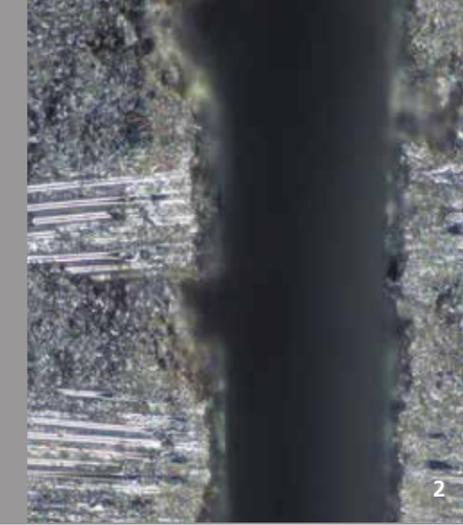
Die Weiterentwicklung des Kombikopfs im Projekt MultiPROmobil bietet insbesondere Potenzial für kleinere und mittlere Unter-nehmen, die einen wichtigen Beitrag zum Zukunftsmarkt der Elektromobilität leisten. Zukünftig sollen auch mehrere multifunktionale Roboter in hochflexiblen Fertigungszellen zum Einsatz kommen. Damit lassen sich Prozessketten im Hinblick auf die schrittweise Einführung der Elektromobilität sehr flexibel und skalierbar gestalten.

Dieses Vorhaben wird mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes NRW unter dem Förderkennzeichen EFRE-0801253 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing Martin Dahmen  
Telefon +49 241 8906-307  
martin.dahmen@ilt.fraunhofer.de

Dr. Dirk Petring  
Telefon +49 241 8906-210  
dirk.petring@ilt.fraunhofer.de



## SCHNEIDEN KERAMISCHER FASERVERBUNDWERKSTOFFE (CMC)

### Aufgabenstellung

Keramische Faserverbundwerkstoffe (Ceramic Matrix Composites – CMC) bilden eine junge Werkstoffgruppe, bei der keramische Fasern in eine keramische Matrix eingebettet und dadurch die Dehnbarkeit und der Risswiderstand im Vergleich zu konventioneller technischer Keramik erhöht werden. Die hochtemperatur- und abrasionsbeständigen Materialien werden u. a. in der Luft- und Raumfahrt und im Turbinenbau eingesetzt. Die mechanischen Eigenschaften von CMCs machen die Bearbeitung extrem aufwendig. Laserschneiden bietet durch den verschleiß- und kräftefreien Betrieb Fertigungsvorteile gegenüber konventionellen Verfahren wie Fräsen oder Bohren.

### Vorgehensweise

Für die CMC-Materialien  $Al_2O_3/Al_2O_3$  und SiC/SiC werden Schneidverfahren mit cw-Faserlasern untersucht. An dem 3–4 mm dicken Probenmaterial werden sowohl das Remote-schneiden mit einem Scanner im Mehrfachabtrag als auch das gasunterstützte Schneiden mit einer konventionellen Fokussieroptik und direkter Ausbildung einer durchgängigen Fuge untersucht. Mit Laserleistungen bis zu 5 kW soll ein Parameterfeld erschlossen werden, das zu wirtschaftlichen Bearbeitungszeiten führt.

1 Bohrung mit  $\varnothing 10$  mm in  $Al_2O_3/Al_2O_3$ .

2 Querschleiff der Schnittfuge (Detail).

### Ergebnis

Mit beiden Schneidverfahren können die Materialien sowohl rissfrei als auch mit Schneidgeschwindigkeiten im Bereich von mehreren Metern pro Minute getrennt werden. Saubere Schnittkanten werden vor allem mit Schneidgasunterstützung erreicht, wodurch die Wiederanlagerung von Abtragprodukten auf der Schnittfläche minimiert wird. Bei SiC/SiC bildet sich nur eine dünne, nicht durchgängige Recastzone aus.

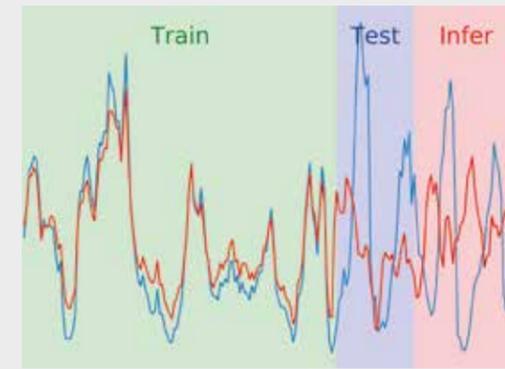
### Anwendungsfelder

Aufgrund hoher Materialkosten ist der Einsatz von CMC aktuell noch Hochtechnologiefeldern in der Luft- und Raumfahrt sowie im Anlagenbau vorbehalten. Kostengünstige und zuverlässige Bearbeitungsmöglichkeiten durch Laserverfahren können einen Beitrag zur weiteren Verbreitung dieser technologisch vielversprechenden Werkstoffgruppe leisten.

### Ansprechpartner

Dr. Frank Schneider  
Telefon +49 241 8906-426  
frank.schneider@ilt.fraunhofer.de

Dr. Dirk Petring  
Telefon +49 241 8906-210  
dirk.petring@ilt.fraunhofer.de



## CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS ZUR VORHERSAGE DES SCHNITTFLANKENPROFILS

### Aufgabenstellung

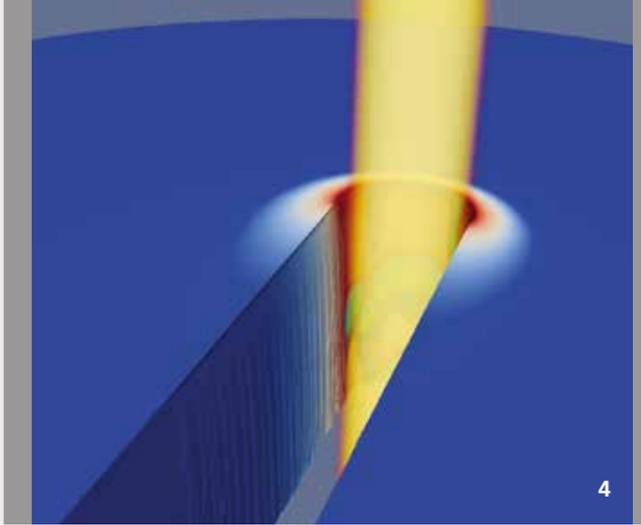
Die gemittelte Rautiefe ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal beim Schneiden von Blechen mit Laserstrahlung. Eine Vorhersage des Riefenprofils aus In-situ-Prozesssignalen unterstützt die Vertiefung des Prozessverständnisses und liefert Ansätze für eine schnelle Regelung der Laserstrahlung. Dazu muss ein Zusammenhang zwischen einem sehr schnellen Frontsignal, das durch schnell laufende Wellen auf der Schmelzfront erzeugt wird, und der 1 bis 2 Größenordnungen langsameren Entstehung des Schnittflankenprofils hergestellt werden.

### Vorgehensweise

Aus einer dynamischen Prozesssimulation und In-situ-Hochgeschwindigkeitsvideographien von Besäumschnitten wird ein Profilsignal auf einer horizontalen Linie im oberen Drittel der Schnittflanke extrahiert. Jedem diskreten Profilwert wird ein zeitlich davor liegender Abschnitt des Frontsignals als Eingang für ein neuronales Netzwerk zugeordnet. Aufgrund der wesentlich kürzeren Trainingsdauer und ihrer Fähigkeit zur Extraktion von Mustern werden Convolutional Neural Networks CNN verwendet.

### Ergebnis

Eine räumliche Mittelung des Signals von der Schmelzfront verbessert die Qualität der Vorhersage des Schnittflankenprofils im Vergleich zu lokalen Signalen (Train). Riefenamplitude



und -häufigkeit werden von dem neuronalen Modell bereits innerhalb der richtigen Größenordnung beschrieben (Test und Infer). Durch die Analyse des Zusammenhangs von den Eingabegrößen und der Qualität des Netzwerks sowie der extrahierten Features wird das Prozessverständnis überprüfbar und erweitert.

### Anwendungsfelder

Machine Learning kann einen wesentlichen Beitrag zur datengetriebenen Untersuchung der Zusammenhänge von dynamischen Prozessgrößen leisten. Am Beispiel des Laserstrahlschmelzscheidens wurde analysiert, ob eine modellbasierte Regelung der Laserparameter mit neuronalen Netzwerken zu einer Reduktion der gemittelten Rautiefe führt. Das methodische Vorgehen ist auf Prozesse übertragbar, bei denen geeignete In-situ-Signale für eine Regelung zur Verfügung stehen.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB1120 »Bauteilpräzision durch Beherrschung von Schmelze und Erstarrung in Produktionsprozessen« an der RWTH Aachen University durchgeführt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) finanziert.

### Ansprechpartner

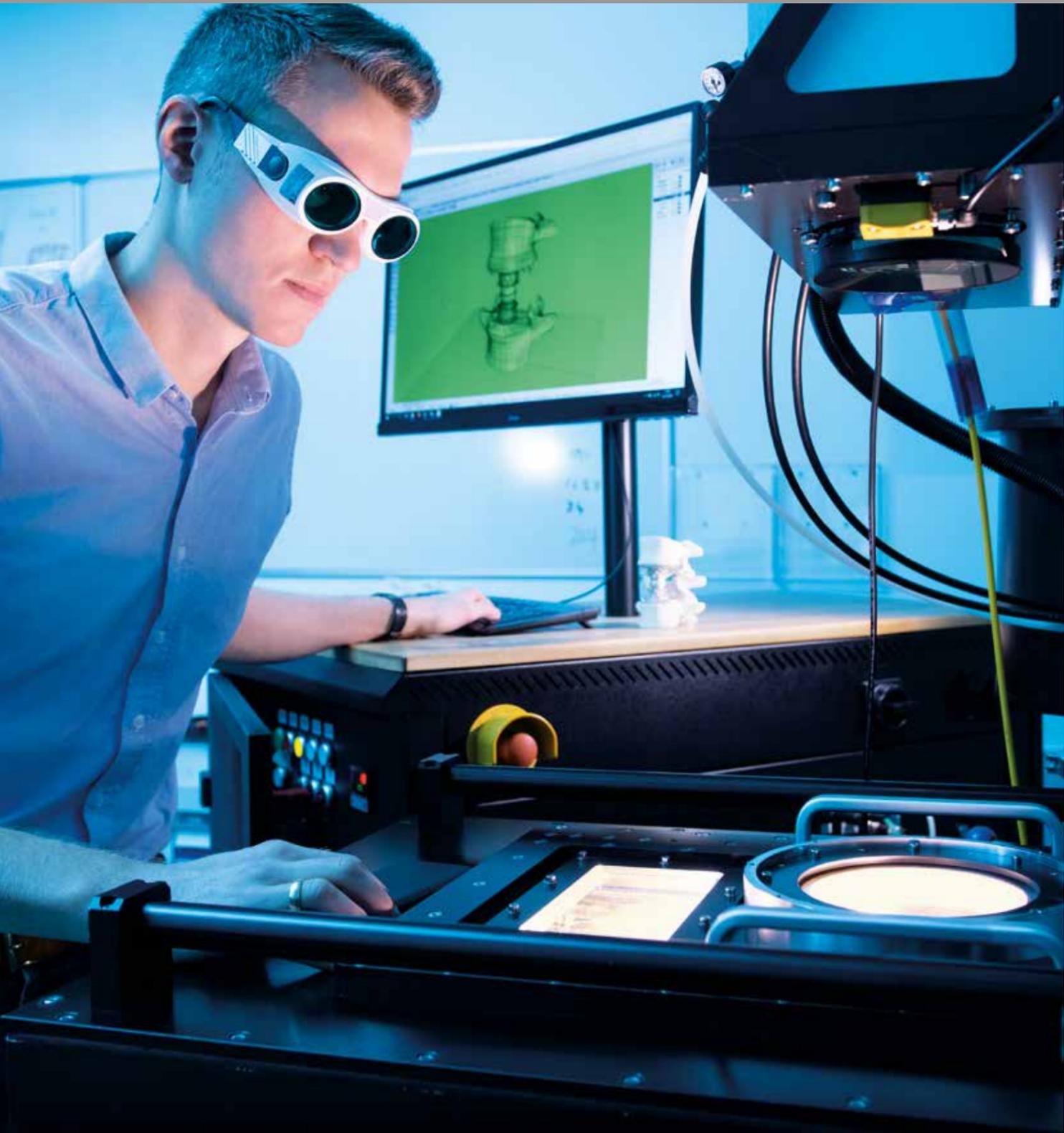
Dr. Ulrich Halm  
Telefon +49 241 8906-680  
ulrich.halm@nld.rwth-aachen.de

Prof. Wolfgang Schulz  
Telefon +49 241 8906-204  
wolfgang.schulz@ilt.fraunhofer.de

3 Eingangssignal und Vorhersage des neuronalen Netzwerks.

4 Simulation von Schmelzwellen.

## MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK



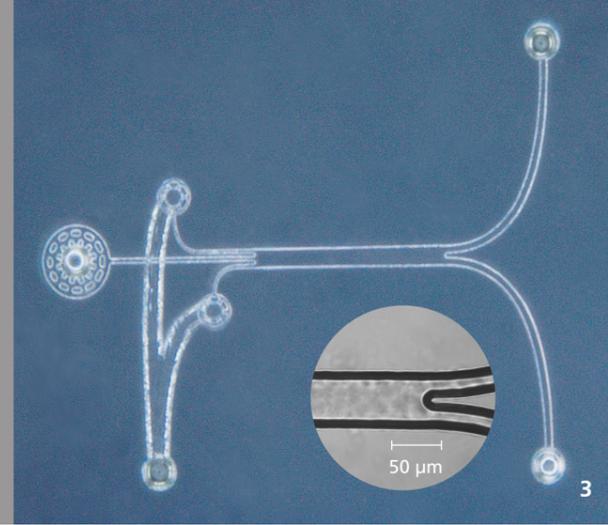
### INHALT

Mikrofluidische Diagnostiksysteme für die klinische Multiplex-Analytik	98
Optofluidischer Sorter für die Durchmusterung von Enzymen im Hochdurchsatz	99
Neue Hydrogele für das laserbasierte Drucken von Gewebemodellen	100
Verkapselung von mikrofluidischen Chips aus Cycloolefin-Copolymeren	101

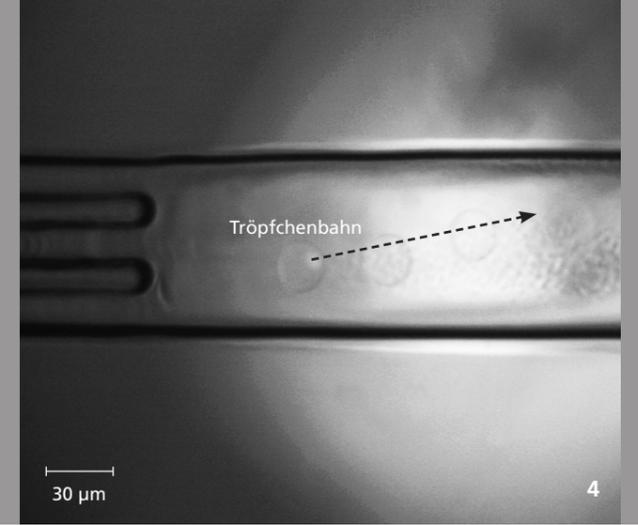
*Laserstrahlschmelzen eines Wirbelkörper-Ersatzimplantats.*



2



3



4

## MIKROFLUIDISCHE DIAGNOSTIKSYSTEME FÜR DIE KLINISCHE MULTIPLEX-ANALYTIK

### Aufgabenstellung

Im Blut zirkulierende Zellen und Biomoleküle sind Träger diagnostischer Information, deren Analyse ein Schlüssel für hochwirksame, individuelle Therapiekonzepte ist. Eine gleichzeitige Erfassung verschiedener molekular-diagnostischer und mikrobiologischer Parameter ermöglicht hierbei eine genaue Abbildung des Krankheitsbilds und damit eine individuell angepasste Therapie für den Patienten. Um eine solche Multiplex-Diagnostik im klinischen Alltag zu etablieren, bedarf es klinischer Tests und automatisierter Auslesesysteme, die bei geringem Probenvolumenbedarf kostengünstig möglichst viele Parameter messen.

### Vorgehensweise

Wissenschaftler des Fraunhofer ILT haben ein Screeningsystem entwickelt, das im Durchfluss eine Vielzahl verschiedener diagnostischer Partikel in einer Probe analysieren kann. Jeder Partikeltyp präsentiert dabei eine eigene Spezies von Fängermolekülen auf seiner Oberfläche, die einen nachzuweisenden Analyten spezifisch binden. Die Identifikation des Partikels erfolgt über seine charakteristischen Fluoreszenz- und Streueigenschaften, der Nachweis und die Quantifizierung

1 *In-vitro-Diagnostikum für die klinische Multiplex-Analytik.*

2 *Mikroflussszelle mit hochintegrierter Messoptik.*

der angebotenen Analytmoleküle über einen fluoreszenten Sekundärmarker. Durch die Erfassung und Unterscheidung der verschiedenen Partikelspezies und der an ihnen angebotenen Analytmoleküle können in einem einzigen Messschritt viele verschiedene diagnostische Parameter gleichzeitig erfasst werden. Die Screeningsysteme zeichnen sich durch spezifisch auf die Messaufgabe angepasste Laserstrahlquellen, eine kompakte Bauform und eine Echtzeitdatenverarbeitung aus.

### Ergebnis

Auf Basis eines mikrofluidischen Systems wurde ein Funktionsmuster für ein In-vitro-Diagnostikum realisiert, das Partikelproben und deren angebotene Analyten mit Hilfe einer integrierten Fluoreszenz- und Streulichtsensorik automatisiert vermisst. Dieses In-vitro-Diagnostikum erlaubt aktuell die Erfassung von bis zu 24 verschiedenen Krankheitsmarkern. Eine hierfür entwickelte echtzeitfähige Elektronikplattform übernimmt die Steuerung des Messsystems sowie die Auswertung der Messdaten und ermöglicht die Integration in Automationslösungen, wie z. B. diagnostische Straßen.

### Anwendungsfelder

Anwendungsfelder sind die Infektions- und Autoimmun-diagnostik sowie mikrobiologische Schnelltests und die Präventivmedizin.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Georg Meineke  
Telefon +49 241 8906-8084  
georg.meineke@ilt.fraunhofer.de

Dr. Achim Lenenbach  
Telefon +49 241 8906-124  
achim.lenenbach@ilt.fraunhofer.de

## OPTOFLUIDISCHER SORTER FÜR DIE DURCHMUSTERUNG VON ENZYMEN IM HOCHDURCHSATZ

### Aufgabenstellung

Der Schlüssel für biotechnologische Produktionsprozesse sind technische Enzyme, die diese Prozesse katalysieren. Dabei liegen die Vorteile der Biotechnologie in der ökologischen und wirtschaftlichen Produktion im Vergleich zur großchemischen Herstellung. Zudem sind mit Hilfe von Biotechnologie völlig neuartige Produkte herstellbar. Auf der Suche nach prozess-optimierten technischen Enzymen ist die Durchmusterung von Millionen aus Genbibliotheken gewonnenen Kandidaten essenziell. Hierfür werden Hochdurchsatzverfahren benötigt, die die Aktivität der Enzyme screenen und die Kandidaten mit guten katalytischen Eigenschaften separieren.

### Vorgehensweise

Für jedes einzelne Gen der Bibliothek wird das entsprechende Enzym zellfrei in einem Mikrotröpfchen exprimiert. Durch enzymatischen Umsatz eines Substrats in ein fluoreszentes Produkt kann in jedem Mikrotröpfchen die Enzymaktivität über seine Fluoreszenz gemessen werden. In einem mikrofluidischen System werden diese Tröpfchen im Hochdurchsatz mit Kilohertzfrequenzen auf ihre Fluoreszenzintensität untersucht. Tröpfchen hoher Fluoreszenzintensität werden in einer Sortierkammer mit einer dynamischen optischen Pinzette aus dem Tröpfchenstrom aussortiert. Die Kraft zum Auslenken der Tröpfchen wird durch den Impulsübertrag bei der Brechung des Laserstrahls am Tropfen erzeugt.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IME wurde diese Methode im Rahmen des von der Fraunhofer-Gesellschaft geförderten Vorlauforschungsprojekts DARWIN mit dem Ziel entwickelt, eine Genbibliothek mit einer Million Kandidaten innerhalb weniger Stunden zu durchmustern.

### Ergebnis

In einer Quarzglas-mikrofluidik werden die Tröpfchen hydrodynamisch fokussiert und anhand ihres Fluoreszenzsignals klassifiziert. Dabei werden Screeningraten von bis zu 5 kHz erreicht. Mit der optischen Pinzette können Mikrotröpfchen mit überschwelligem Fluoreszenzsignal innerhalb von 8 ms aus dem hydrodynamischen Fokus ausgelenkt werden. Dabei werden Kräfte von einigen Nanonewton erzielt.

### Anwendungsfelder

Die primäre Anwendung des optofluidischen Sorters ist die Durchmusterung von zellfrei exprimierten Enzymen. Weitere Einsatzgebiete sind die pharmazeutische Produktentwicklung, das Screening chemischer Synthesen und die Sortierung heterogener Zellensembles.

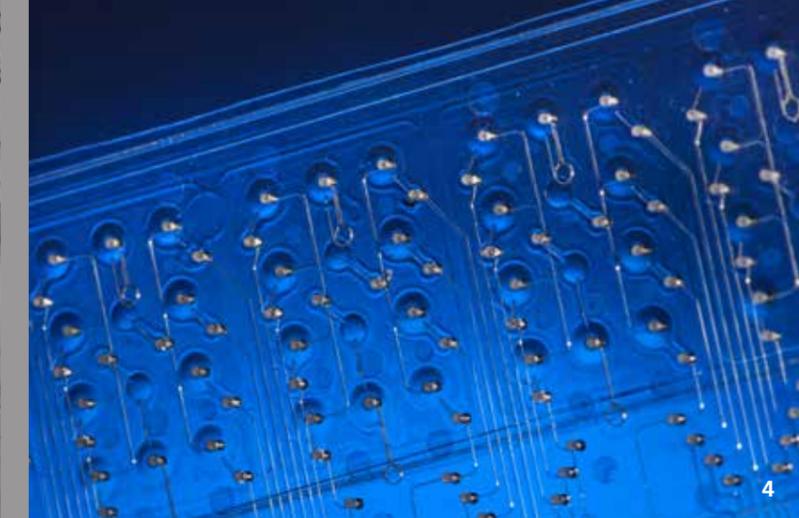
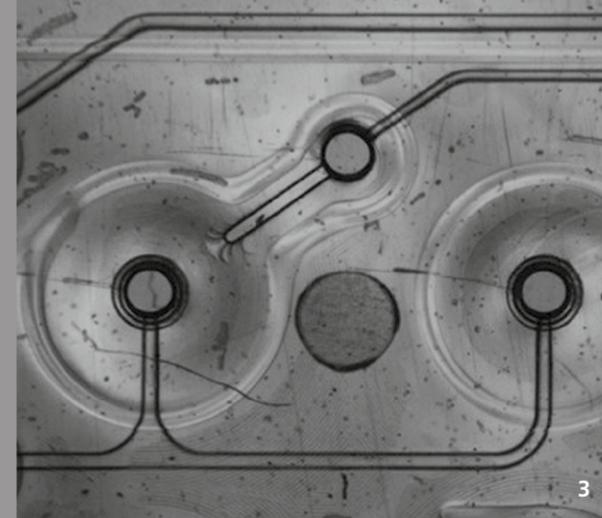
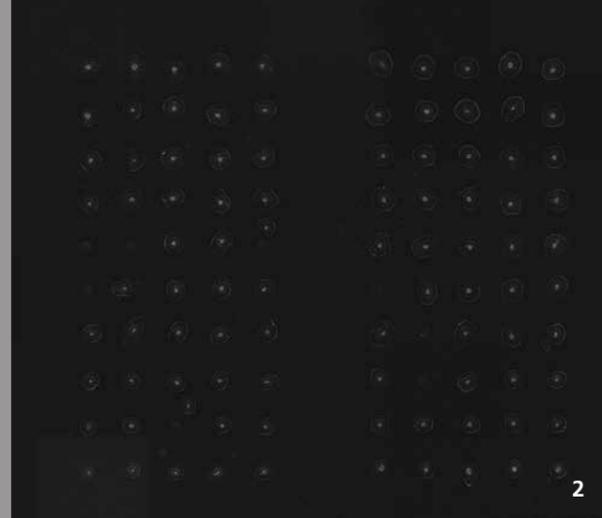
### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Georg Meineke  
Telefon +49 241 8906-8084  
georg.meineke@ilt.fraunhofer.de

Dr. Achim Lenenbach  
Telefon +49 241 8906-124  
achim.lenenbach@ilt.fraunhofer.de

3 *Mikrofluidische Sortierkammer des optofluidischen Sorters.*

4 *Trajektorie eines im Pinzettenfokus aussortierten Mikrotröpfchens.*



## NEUE HYDROGELE FÜR DAS LASERBASIERTE DRUCKEN VON GEWEBEMODELLEN

### Aufgabenstellung

Das laserbasierte Drucken mit Zellen (engl. Laser Assisted Bioprinting LAB) basiert auf dem Prozess des Laser Induced Forward Transfer (LIFT). Zum Drucken mit einzelnen Zellen oder auch von Zellhaufen (Clustern) ist es notwendig, ein Hydrogel zu verwenden, welches die Laserstrahlung absorbiert, eine gleichmäßige, stabile Schicht konstanter Dicke ausbildet und biokompatibel ist. Bisher wurde für den Einzelzelldruck 5-prozentige Gelatine eingesetzt, die sich aber für den Druck von Zellclustern bei Temperaturen um 37 °C und erhöhter Luftfeuchte als ungeeignet erwiesen hat. Daher wurde die Etablierung eines neuen Hydrogels notwendig.

### Vorgehensweise

Für LAB mit einer MIR-Strahlquelle bei einer Wellenlänge von 2,94 µm wird ein Hydrogel erprobt, welches zu mehr als 95 Prozent aus Wasser besteht. Wasser dient als Absorptionsmedium für den LIFT-Prozess. Das für die Zellkultur typischerweise eingesetzte Hydrogel Matrigel® wurde entsprechend der Herstellerangaben mit Zellkulturmedium verdünnt. Dadurch wurde das Aufrakeln dünner Gelschichten < 100 µm Dicke möglich. Das Gel vernetzt bei Temperaturen um 37 °C. Der gleichmäßige Transfer von Hydrogel sowie der Transfer von lebenden Zellen konnte so in der halbautomatisierten Anlage LIFTSYS® unter klimatisierten Bedingungen untersucht werden.

- 1 Schichtdickenmessung einer Hydrogelschicht.  
 2 Übersicht eines Druckbilds von vier Feldern zu je fünf mal zehn Tropfen.

### Ergebnis

Durch die Verwendung von Matrigel® wurde erstmals das gleichmäßige Drucken von Tropfenmustern mit einer Erfolgsrate von mehr als 95 Prozent gezeigt. Die Transfereffizienz ist im Vergleich zu Gelatine somit etwa 30 Prozent größer. Außerdem wurde nachgewiesen, dass Zellcluster mit Matrigel® erfolgreich übertragen werden können.

### Anwendungsfelder

Durch die Verwendung von Matrigel® als Hydrogel ergeben sich neue Anwendungsgebiete des LAB für das 4D-Bioprinting, da Zellcluster verdrückt und so Fortschritte im Tissue Engineering erzielt werden können. Der Aufbau organoide Strukturen und die Entwicklung von Organ-on-a-Chip-Systemen sind beispielsweise für die Pharmaforschung von hohem Interesse. Matrigel® als Transferschicht für LAB eignet sich besonders für die Verarbeitung anspruchsvoller Zelltypen wie Stammzellen oder Kardiomyozyten. Das übergeordnete, visionäre Ziel liegt in der Entwicklung kardiovaskulärer Implantate und künstlicher Organe.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Innovationswettbewerbs »Künstliche Organe aus dem Labor« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durchgeführt.

### Ansprechpartner

Richard Lensing M.Sc.  
 Telefon +49 241 8906-8336  
 richard.lensing@ilt.fraunhofer.de  
 Dr. Nadine Nottrodt  
 Telefon +49 241 8906-605  
 nadine.nottrodt@ilt.fraunhofer.de

## VERKAPSELUNG VON MIKROFLUIDISCHEN CHIPS AUS CYCLOOLEFIN-COPOLYMEREN

### Aufgabenstellung

Mikrofluidische Chips werden unter anderem im Life-Science-Bereich eingesetzt und ermöglichen den Transport sowie die Mischung und Filterung von kleinsten Flüssigkeitsmengen bis in den Pikoliter-Bereich. Typische Anwendungsbeispiele mikrofluidischer Chips sind Mikroreaktoren oder auch Blutzuckermessgeräte. Die mediendichte Verkapselung der Mikrokanäle stellt aufgrund der kleinen Strukturdimensionen im Mikrometerbereich eine große Herausforderung für die konventionelle Füge-technik dar. Das absorberfreie Laserdurchstrahlsschweißen mit Strahlquellen im NIR-Bereich eröffnet hier neue Perspektiven aufgrund seiner hohen Flexibilität. Durch die Nutzung kurzbrennweitiger Fokussieroptiken wird der Kunststoff definiert aufgeschmolzen, wodurch übermäßiger Schmelzeaustritt und somit ein Verschluss der Kanalstrukturen vermieden wird.

### Vorgehensweise

Im Rahmen eines gemeinsamen Projekts mit der m2p-labs GmbH in Baesweiler wurde der Grundkörper eines mikrofluidischen Bioreaktors mit einer Folie aus Cycloolefin-Copolymere (COC) mittels Laserdurchstrahlsschweißen mediendicht verschweißt. Als Strahlquelle wird ein Thulium-Faserlaser mit einer Emissionswellenlänge von 1940 nm verwendet. In diesem Wellenlängenbereich weisen Kunststoffe eine natürliche Absorption auf, wodurch auf den Einsatz eines Absorbermaterials, wie z. B. Ruß, verzichtet werden kann. Die Transparenz des Bauteils wird somit nicht beeinflusst.

### Ergebnis

Durch die exakte Führung des Laserstrahls entlang der Kanalstruktur kann eine mediendichte Verkapselung sichergestellt werden. Aufgrund der geringen Nahtbreite von nur 150 µm bleibt die thermische Belastung des Bauteils gering. Außerdem kann durch eine thermische Eindringtiefe < 1 mm auch die Beschädigung weiterer Kanalstrukturen auf der Rückseite des Bauteils vermieden werden.

### Anwendungsfelder

Neben der Verkapselung mikrofluidischer Bauteile bietet sich das absorberfreie Laserdurchstrahlsschweißen insbesondere für Anwendungen an, in denen eine hohe Transparenz gefordert und der Einsatz von Absorbern aus Biokompatibilitätsgründen, wie z. B. in der Medizintechnik, nicht möglich ist.

### Ansprechpartner

Phong Nguyen M.Sc. M.Sc.  
 Telefon +49 241 8906-222  
 phong.nguyen@ilt.fraunhofer.de  
 Dr. Alexander Olowinsky  
 Telefon +49 241 8906-491  
 alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de

- 3 Vermessung der Nahtgeometrie mittels Polarisationsmikroskop.  
 4 Dicht verschweißte COC-Komponenten.

## LASERMESSTECHNIK UND EUV-TECHNOLOGIE



*Optische Messungen an Knochenmodellen  
für die Laserchirurgie.*

### INHALT

Mobile Spektroskopie zur Kohlenstoffbestimmung in Stahl	104
Pilotanlage zur lasergestützten Sortierung von Sonderlegierungen	105
Demonstratoranlage zur Lasererkennung elektronischer Bauteile	106
Elektronikplattform FIRE für echtzeitfähige und präzise Mess- und Regeltechnik	107
Inline-Sensorik »bd-x« mit FPGA-Elektronik zur Echtzeitdatenverarbeitung	108
Miniaturisierte optische Messsonde System für Bestrahlungsexperimente im extremen Ultraviolett	110
Charakterisierung hochauflösender EUV-Photoresists für industrielle Anwendungen	111
Elektrohydraulische Zerkleinerung von Mobiltelefonen	112



## MOBILE SPEKTROSKOPIE ZUR KOHLENSTOFF- BESTIMMUNG IN STAHL

### Aufgabenstellung

Für die Elementanalyse von Metallen mit nicht kabelgebundenen Handgeräten sollen das Verfahren und der konzeptionelle Aufbau für die Laser-Emissionsspektrometrie (LIBS) mit hoch integrierten Komponenten entwickelt und die analytische Leistungsfähigkeit im Labor untersucht werden. Aufgrund der Bedeutung und der technischen Herausforderungen liegt ein Hauptaugenmerk auf der Bestimmung des Kohlenstoffgehalts in Stahl. Konzentrationen bis herunter in den Bereich von 0,01 Prozent sollen mit einem kompakten Aufbau gemessen werden, der einen Einsatz in einem mobilen Handgerät ermöglicht.

### Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT wurden in enger Verknüpfung von Laserentwicklung und Messtechnik ein passiv gütegeschalteter Laser, die spektrale Detektion sowie die Führung der Laser- und Messstrahlung unter den Vorgaben eines mobilen Einsatzes entwickelt. Neben der erreichbaren analytischen Leistungsfähigkeit spielen dabei Baugröße, Gewicht und Energiemanagement eine entscheidende Rolle. Die Kompromissfindung zwischen diesen Randbedingungen und gegenläufigen Anforderungen an spektrale Auflösung, Inertgasatmosphäre im Probenbereich sowie Dauer, Empfindlichkeit und Repro-

1 Kompaktaufbau mit Laser, Spektrometer und Optikkomponenten zur Analyse von Stahl (ca. 23 x 12,5 x 7 cm<sup>3</sup>).

duzierbarkeit der Messung sind Kernpunkte der Entwicklung. Parameter der LIBS-Detektion werden so abgestimmt, dass die Kohlenstoffspektrallinie detektiert wird und geringe Kohlenstoffgehalte quantitativ nachweisbar sind.

### Ergebnis

Entscheidendes Kriterium für die analytische Leistungsfähigkeit ist die Nachweisgrenze für Kohlenstoff in Stahl. Mit 0,0034 Prozent, entsprechend 34 µg/g, konnte der weltweit beste Wert für Kompakt-LIBS erzielt werden (Opt. Express 27, 36855-36863, 2019). Damit wurde gezeigt, dass die mobile Spektroskopie in Bereiche vorstößt, die bisher nicht oder nur eingeschränkt möglich waren. Ein Beispiel ist die Unterscheidung der technisch bedeutsamen und weitverbreiteten Edelstähle 1.4301 und 1.4307 (auch bekannt unter 304 und 304L), die sich nur geringfügig im Kohlenstoffgehalt unterscheiden. Die Ergebnisse zeigen, dass diese durch eine schnelle Messung mit einem Handgerät auch im Einbaustand geprüft werden können.

### Anwendungsfelder

Mobile, handgeführte Spektroskopiesysteme erlauben eine schnelle Elementanalyse von Metallen in der Metallerzeugung, -verarbeitung sowie in der Recyclingindustrie. Die Einsatzgebiete sind z. B. die Überwachung von Produktionsprozessen, die Verwechslungsprüfung und die Eingangskontrolle von Rohmaterial oder Halbzeugen.

Dieses Projekt wird finanziell durch die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt.

### Ansprechpartner

Dr. Volker Sturm  
Telefon +49 241 8906-154  
volker.sturm@ilt.fraunhofer.de



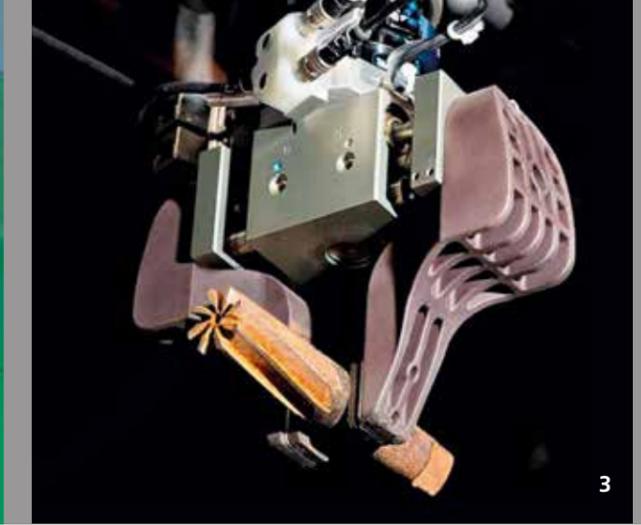
## PILOTANLAGE ZUR LASER- GESTÜTZTEN SORTIERUNG VON SONDERLEGIERUNGEN

### Aufgabenstellung

Metalle gehören zu den Rohstoffen, die sich praktisch ohne Qualitätsverlust recyceln lassen, sofern sie mit hoher Reinheit getrennt gesammelt werden. Teilweise besitzen sie außerdem einen hohen Materialwert oder sind als versorgungskritisch für Europa einzuschätzen. Die manuelle Sortierung von Altmetallen ist jedoch nur eingeschränkt möglich aufgrund der Vielfalt der technisch genutzten Metalllegierungen, die mit dem Auge oft nicht unterscheidbar sind. Hier wird erstmals ein vollautomatisches Sortierverfahren für eine Vielzahl von Legierungen von Sondermetallen in die Praxis eingeführt.

### Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT wurde ein Verfahren entwickelt, das eine laserspektroskopische Direktanalyse von Schrottteilen auf einem Förderband durchführt. Mit Hilfe der Laser-Emissionsspektrometrie (LIBS) wird die Zusammensetzung der Legierungsbestandteile für jedes Schrotstück analysiert und die zugehörige Sortierklasse bestimmt. Die Multielementanalyse mit LIBS ermöglicht dabei die Erkennung einer großen Anzahl von Legierungen. Um dieses Potenzial nutzbar zu machen, wird die automatische Sortierung mit einem Roboter durchgeführt, der im Gegensatz zu klassischen Sortierverfahren nicht auf eine kleine, festgelegte Anzahl von Sortierfraktionen beschränkt ist.



### Ergebnis

Mit Projektpartnern wurde eine Pilotanlage aufgebaut und in einem industriellen Recyclingunternehmen in Betrieb genommen, um Sonderlegierungen wie Schnellarbeitsstähle oder Hartmetalle vollautomatisch zu sortieren. Die LIBS-Analyse wird dabei durch eine integrierte Laserreinigung für die häufig verschmutzten Oberflächen der Metallteile unterstützt. Mithilfe der laserbasierten Bilderkennung werden die einzelnen Schrotstücke identifiziert und geeignete Messpositionen bestimmt. In Kombination mit den LIBS-Ergebnissen dienen die detektierten Geometrieinformationen zur Steuerung des Greifens und Abwerfens der Teile durch den Roboter.

### Anwendungsfelder

Das hier demonstrierte Verfahren lässt sich auf andere Bereiche des Metallrecyclings von Stückgütern übertragen. Auch für Aufgaben in der Inline-Prozesskontrolle eröffnet die Kombination von Geometriemessung und schneller chemischer Analyse Potenziale für zukünftige automatisierte Anwendungen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R181B durchgeführt.

### Ansprechpartner

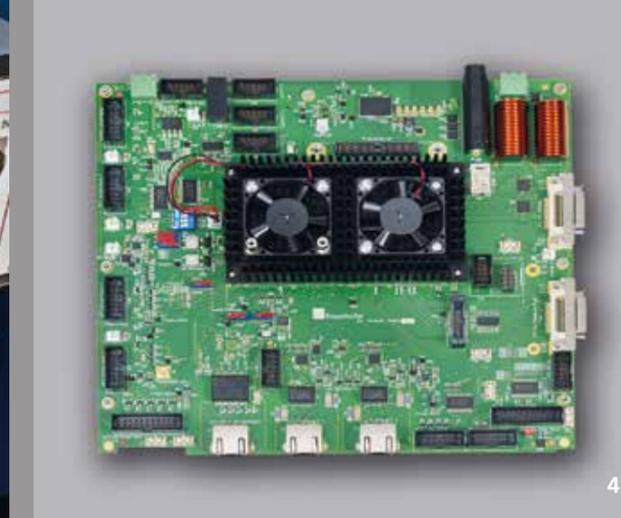
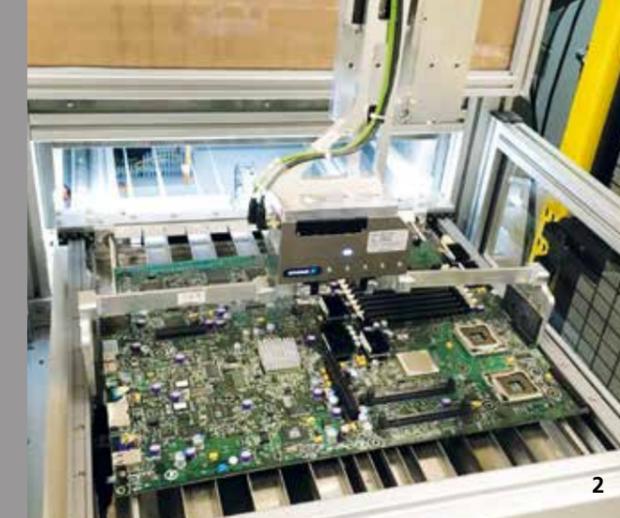
Dr. Cord Fricke-Begemann  
Telefon +49 241 8906-196  
cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de

Prof. Reinhard Noll  
Telefon +49 241 8906-138  
reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de

2 Laseranalyse eines HSS-Bohrers.

3 Roboterhandhabung zur Sortierung,

© Cronimet, Karlsruhe.



## DEMONSTRATORANLAGE ZUR LASERERKENNUNG ELEKTRONISCHER BAUTEILE

### Aufgabenstellung

Moderne elektronische Geräte enthalten eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien, von denen nur ein Teil am Ende der Nutzungsdauer mit den heutigen Verwertungsverfahren zurückgewonnen wird. Weitere wertvolle Technologierohstoffe können jedoch für eine Kreislaufwirtschaft gewonnen werden, wenn sie in Fraktionen mit hoher Konzentration abgetrennt werden.

### Vorgehensweise

Das ADIR-Konsortium hat eine automatisierte Demonstrationsanlage für die gezielte Entnahme elektronischer Komponenten aus Altelektronik erarbeitet. Ein Kernpunkt ist dabei die Bereitstellung der Information, wo welche Komponenten mit welchen Inhaltsstoffen montiert sind. Diese Informationen werden mit Verfahren der Bildverarbeitung, 3D-Lasermessung und Laser-Spektroskopie gewonnen und in einer Datenbank abgelegt.

### Ergebnis

Ein Inspektionssystem, das elektronische Platinen aus der Vorverarbeitung entgegennimmt, zunächst hochauflösende Farbbilder aufnimmt und dann die 3D-Höhenstruktur auf der Platine misst, wurde aufgebaut und in den Demonstrator integriert.

1 CAD-Zeichnung der Demonstrationsanlage.

2 Automatische Übergabe einer Platine an das Inspektionssystem.

Die Ergebnisse werden mit denen bekannter Platinen, die bereits in der Datenbank hinterlegt sind, verglichen. Die Inhaltsstoffe unbekannter Bauteile werden mit Laser-Emissions-spektrometrie (LIBS) ermittelt und die Bauteile, unterstützt durch Bildverarbeitungssoftware, bewertet, um Zielfraktionen festzulegen. So entsteht ein digitales Abbild aller verarbeiteten Platinen, anhand dessen im nachfolgenden Prozessschritt die wertvollen Bauteile gezielt per Laserentlöten entnommen und sortiert werden können. In Feldversuchen in einem Recyclingbetrieb konnte das Verfahren bereits erfolgreich erprobt werden. Spezialisierte metallurgische Betriebe haben aus den angereicherten Sortierfraktionen Wertstoffe wie z. B. Tantal als Sekundärrohstoff gewonnen.

### Anwendungsfelder

Fehlende Informationen über den Aufbau und die stoffliche Zusammensetzung von Altgeräten sind häufig ein Hindernis für eine hochwertige Wiederverwertung der Rohstoffe. Hier kann die digital vernetzte optische Messtechnik die Lücke schließen und eine effiziente und ressourcenschonende Nutzung ermöglichen.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des EU-Projekts ADIR unter dem Förderkennzeichen 680449 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dr. Cord Fricke-Begemann  
Telefon +49 241 8906-196  
cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de

Prof. Reinhard Noll  
Telefon +49 241 8906-138  
reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de

## ELEKTRONIKPLATTFORM FIRE FÜR ECHTZEITFÄHIGE UND PRÄZISE MESS- UND REGELTECHNIK

### Aufgabenstellung

Am Fraunhofer ILT werden Geräte für die Fertigungs- und Labormesstechnik entwickelt. Zentrales Element dieser Geräte ist eine leistungsstarke Elektronikeinheit mit Anbindung an die gerätespezifischen Sensoren und Aktoren. Die Elektronikeinheit ist als offene Plattform ausgelegt, die es ermöglicht, schnell und flexibel anwendungsspezifische Funktionen umzusetzen. Sie gewährleistet außerdem eine unterbrechungsfreie Datenverarbeitung in Echtzeit und kann bei Bedarf hohe Rechenleistungen zur Verfügung stellen. Ferner sind Kommunikationsschnittstellen zu Systemen implementiert, die für lasertechnische Anwendungen von Bedeutung sind. Hierzu zählt unter anderem die Anbindung von Scannersystemen und Sensoren.

### Vorgehensweise

Ein modulares Konzept, bestehend aus einer zentralen Basisplatine mit vielseitigen Schnittstellen und einem passenden Portfolio von Peripherieplatinen, wurde entwickelt. Daraus lassen sich anwendungsspezifische Elektronikeinheiten für neue Geräte zusammenstellen. Bei den vorgesehenen Schnittstellen wurde sowohl Wert auf die Verwendung von Standards gelegt als auch auf echtzeitfähige Datenverarbeitung.

Die Basiseinheit verfügt über einen High-End FPGA und einen integrierten Dual Core ARM-Prozessor mit 1500 MHz Taktfrequenz. Als Betriebssystem wurde ein embedded Linux ausgewählt.

### Ergebnis

Die Plattform basiert auf einem High-End FPGA von Intel mit einer Rechenleistung von bis zu 500 GFLOPs. Auf der Basisplatine wurden folgende Hardwareschnittstellen realisiert: Gigabit-LAN, Industrial Ethernet, Kamerainterface, CAN-Bus, drei serielle Schnittstellen sowie 11 weitere Peripherieschnittstellen. Diese sind zur Anbindung von Laserstrahlquellen, Scannern, A/D- und D/A-Wandlern, Encodern, Photomultipliern, Photodioden, SPS und Präzisionswaagen etc. geeignet.

### Anwendungsfelder

Erste Anwendungen sind Geräte in der Lasermess- und Lasermedizin, wie beispielsweise Abstandssensoren, Mikrosortier- und Laborgeräte basierend auf Fluoreszenzmess-technik.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Stefan Seiwert  
Telefon +49 241 8906-155  
stefan.seiwert@ilt.fraunhofer.de

Dr. Achim Lenenbach  
Telefon +49 241 8906-124  
achim.lenenbach@ilt.fraunhofer.de

3 Elektronikplattform FIRE.

4 Basisplatine FIRE-Board.



## INLINE-SENSORIK »BD-X« MIT FPGA-ELEKTRONIK ZUR ECHTZEITDATENVER- ARBEITUNG

### Aufgabenstellung

Absolut messende interferometrische Sensoren werden in der Fertigungsmesstechnik zur berührungslosen Erfassung geometrischer Merkmale eingesetzt. Die am Fraunhofer ILT entwickelten Sensoren verfügen über Messbereiche von bis zu 20 mm, erreichen Messgenauigkeiten unter 1 µm und arbeiten dabei mit Messfrequenzen von bis zu 80 kHz. Die fortlaufend entstehende Datenmenge von 300 MB/s muss dabei im Messtakt verarbeitet werden. Die Datenverarbeitung ist für die Regelung von Fertigungsprozessen unterbrechungsfrei und in Echtzeit durchzuführen.

### Vorgehensweise

Zur kontinuierlichen Verarbeitung großer Datenmengen sind FPGA-Module (Field Programmable Gate Arrays) in besonderer Weise geeignet, da sich rechenintensive Operationen parallelisieren und damit beschleunigen lassen. Basierend auf einem Arria 10-Modul der Firma Intel hat das Fraunhofer ILT ein Schnittstellenboard mit eigener Programmierung entwickelt und im Rahmen des BMBF-geförderten FuE-Projekts INSPIRE erstmals in Betrieb genommen.

1 Optoelektronischer DIA-Wandler für faseroptisch übertragene Steuersignale mit angeschlossenem Lichtwellenleiter (blau).

2 »bd-4«-Sensorik und FIRE-Datenverarbeitungselektronik mit faseroptischem Messarm (gelb).

### Ergebnis

Die Antwortverzögerungszeit zwischen einem externen Trigger-signal, das eine Messung auslöst, und der Ausgabe eines aus dem Messergebnis berechneten Steuerungssignals wurde experimentell bestimmt und beträgt 0,1 ms. Dabei konnte das Steuerungssignal am FPGA als optisches, pulscodiertes Signal mit einer effektiven Auflösung von 16 Bit über eine Strecke von 100 m übertragen und anschließend über einen DA-Wandler ausgegeben werden. Die optische Übertragung ist von Vorteil, da sie in einer industriellen Umgebung unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störeinflüssen ist.

### Anwendungsfelder

Erste Anwendungen sind die Autofokussierung von Laserbearbeitungsprozessen sowie die Regelung von Kaltwalzprozessen in der Metallverarbeitung. Für diese und weitere Anwendungsfelder, beispielsweise das Laserschweißen oder Laserauftragsschweißen, hat das Fraunhofer ILT »bd 1«- und »bd 4«-Sensoren mit ein bzw. vier unabhängigen Messarmen entwickelt. Verfügbare Messwellenlängen liegen in den Bereichen um 835 nm, 1 µm und 1,5 µm.

Die diesem Bericht zugrundeliegenden FuE-Arbeiten wurden u. a. im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N14290 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dr. Stefan Hölters  
Telefon +49 241 8906-436  
stefan.hoelters@ilt.fraunhofer.de

Prof. Reinhard Noll  
Telefon +49 241 8906-138  
reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de

## MINIATURISIERTE OPTISCHE MESSSONDE

### Aufgabenstellung

Optische Messtechnik wird bereits in vielen Bereichen erfolgreich eingesetzt. Um weitere Anwendungsfelder zu erschließen, werden neue Methoden entwickelt mit dem Ziel, Messmittel zu verkleinern. Am Beispiel einer Messsonde zur Vermessung von Tropfengrößen in Dampfkraftturbinen wird ein bestehendes Messsystem miniaturisiert. Hierfür werden das optische System auf die besonderen Erfordernisse kleiner Bauräume angepasst sowie ein neuartiges Fertigungssystem für die mechanische Halterung eingesetzt.

### Vorgehensweise

Zur Messung der lokalen Tropfengrößenverteilung wird eine Optik benötigt, welche einerseits Licht in das Messvolumen einleitet und andererseits das von den Tropfen gestreute Licht erfasst und zu einem Photomultiplier weiterleitet. Die Messung erfolgt durch die Erfassung der Streulichtintensität, welche von vorbeifliegenden Tropfen induziert wird. Für eine präzise Messung der lokalen Tropfengrößenverteilung wird ein scharf abgegrenztes und definiertes Messvolumen benötigt (Beleuchtungsoptik: Fokussierdurchmesser 10 µm, rückseitige Brennweite 3 mm). Infolge der miniaturisierten Baugröße ( $\varnothing \leq 8$  mm) werden für die Halterungen der optischen Komponenten mechanische Linsenfassungen mittels Selective Laser Etching (SLE) in Form von Quarzglasstüben hergestellt. Die Optik besteht aus zwei Baugruppen, eine für die Fokussierung der über eine Lichtleitfaser eingekoppelten Laserstrahlung in das Messvolumen und eine für die gerichtete Aufnahme der von den Tropfen gestreuten Laserstrahlung.

### Ergebnis

Die in Kooperation mit den RWTH Aachen University Lehrstühlen LLT, DAP und IKDG entwickelte Messsonde konnte bereits erfolgreich in experimentellen Versuchen eingesetzt werden. Durch die neue miniaturisierte Messsonde lassen sich präzise Messungen der lokalen Tropfengrößenverteilung durchführen. Die mittels SLE gefertigten Halterungen für das optische System haben sich bewährt und werden in weiteren Projekten optimiert.

### Anwendungsfelder

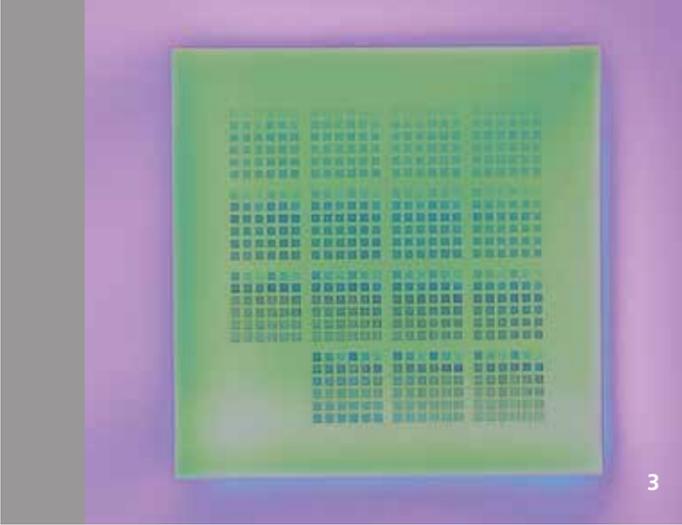
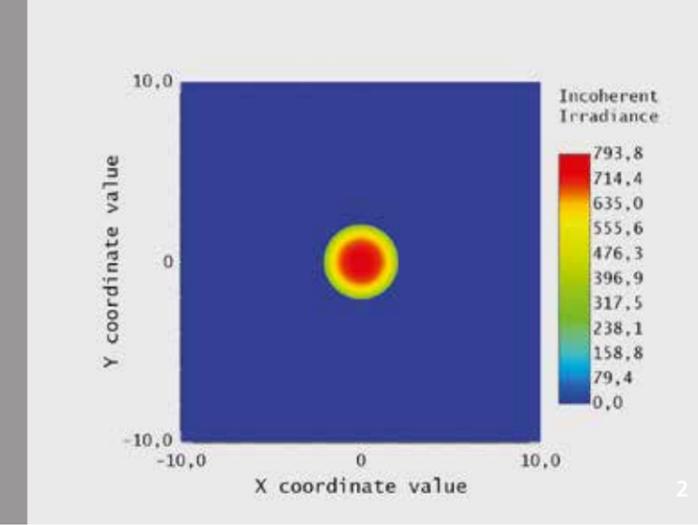
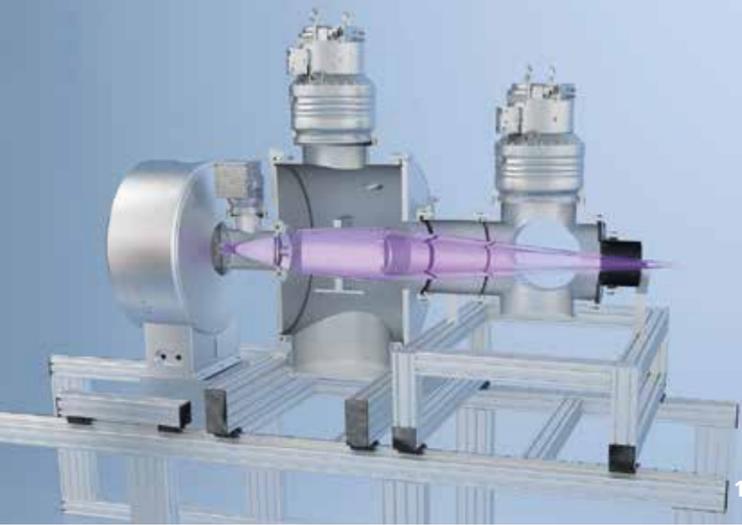
Von den gewonnenen Erkenntnissen profitieren prinzipiell optische Messverfahren, bei denen ein geringer Bauraum eine wichtige Rolle spielt. Die Verwendung mittels SLE-gefertigter Linsenfassungen ermöglicht eine Miniaturisierung bei gleichzeitig mechanischer und thermischer Stabilität. Neben den Messverfahren lassen sich die Erkenntnisse auch auf den Bereich der Lasermaterialbearbeitung bei Leistungen < 100 W übertragen und somit neue Anwendungsbereiche erschließen.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Marcel Prochnau  
Telefon +49 241 8609-8220  
marcel.prochnau@tos.rwth-aachen.de

Dr. Jochen Stollenwerk  
Telefon +49 241 8609-411  
jochen.stollenwerk@ilt.fraunhofer.de

3 Fokussier- und Erfassungsmodul.  
4 Montierte Messsonde.



## SYSTEM FÜR BESTRAHLUNGSEXPERIMENTE IM EXTREMEN ULTRAVIOLETT

### Aufgabenstellung

Die Entwicklung der Extrem-Ultraviolet-Lithographie (EUVL) erfordert die Erforschung und Qualifizierung von Optiken und Komponenten bezüglich ihrer Langzeitstabilität unter dem Einfluss von hohen EUV-Bestrahlungsstärken. Solche Untersuchungen geben Aufschluss über die thermische Belastbarkeit oder den Verschleiß durch EUV-induzierte Kontaminationen als Folge der Bestrahlung.

### Vorgehensweise

Auf Basis einer am Fraunhofer ILT entwickelten entladungsbasierten Strahlungsquelle wurde ein Quelle-Kollektorsystem dimensioniert, das Bestrahlungsexperimente bei Intensitäten erlaubt, die über den Stand der Technik hinausgehen. Die Strahlungsquelle emittiert bei einer elektrischen Eingangsleistung von etwa 8 kW eine mittlere EUV-Leistung von bis zu 700 W/2πsr in einem Spektralbereich von 10–18 nm (Breitband), davon etwa bis zu 40 W/2πsr in den für die EUV-Lithographie besonders interessanten Bereich um 13,5 nm in einer spektrale Bandbreite von 0,27 nm (In-Band). Die Pulswiederholrate der Xenon-basierten Strahlungsquelle

liegt bei bis zu 2500 Hz. Das Emissionsvolumen ist näherungsweise zylinderförmig mit einem Durchmesser von ca. 500 μm und einer Länge von 3–5 mm. Das isotrop emittierte Licht wird von einem Kollektor im streifenden Einfall gesammelt und auf die zu behandelnde Probe fokussiert. Bei der Dimensionierung des Kollektors sind die durch die jeweilige Aufgabenstellung vorgegebenen Anforderungen wie Spotgröße, mittlere Leistung oder Spitzenintensität zu berücksichtigen.

### Ergebnis

Mit dem in Bild 1 gezeigten Quelle-Kollektorsystem ist eine mittlere Bestrahlungsleistung von ca. 40 W/cm<sup>2</sup> (Breitband) und etwa 4 W/cm<sup>2</sup> (In-Band) bei einem Spotdurchmesser um 1,6 mm erreichbar. Ein leicht modifiziertes optisches System erlaubt eine näherungsweise homogene Bestrahlung einer Fläche mit einem Durchmesser von ca. 4 mm bei entsprechend geringerer Intensität (Bild 2). In einem Multiplexsystem mit vier Quelle-Kollektormodulen kann bei einer Wiederholrate von bis zu 10 kHz eine mittlere Leistung von mehr als 120 W/cm<sup>2</sup> (Breitband) und mehr als 12 W/cm<sup>2</sup> (In-Band) erwartet werden.

### Anwendungsfelder

Das beschriebene System zur Bestrahlung von Proben im extremen Ultraviolet bei einer Zentralwellenlänge um 13,5 nm findet insbesondere Anwendung im Umfeld der EUV-Lithographie.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Jochen Vieker  
Telefon +49 241 8906-397  
jochen.vieker@ilt.fraunhofer.de

## CHARAKTERISIERUNG HOCHAUFLÖSENDER EUV-PHOTORESISTS FÜR INDUSTRIELLE ANWENDUNGEN

### Aufgabenstellung

Für die stetige Verkleinerung der Strukturgrößen in der industriellen Lithographie mit extrem ultravioletter Strahlung EUV (Standardwellenlänge: 13,5 nm) werden hochauflösende und EUV-sensitive Photoresists benötigt. Zur Charakterisierung stehen jedoch meist keine geeigneten kompakten Laboranlagen zur Verfügung. Mit der entwickelten EUV-Laborbelichtungsanlage (EUV-LET) wird die Charakterisierung von EUV-Resists hinsichtlich Sensitivität, Kontrast und Auflösungsvermögen bei der industriellen Standardwellenlänge von 13,5 nm ermöglicht.

### Vorgehensweise

Zur Charakterisierung von EUV-Resists für deren Einsatz in der industriellen Lithographie bei 13,5 nm wird die breitbandige EUV-Strahlung der plasmabasierten Gasentladungsquelle mittels eines Mehrschichtspiegels spektral gefiltert. Für die Resistcharakterisierung steht so eine Hauptwellenlänge von 13,5 nm mit einer relativen spektralen Bandbreite von 4 Prozent zur Verfügung. Mittels eines Dosismonitors wird die Pulsenergie kontinuierlich gemessen und als Grundlage für die Belichtungszeit genutzt. Der Photoresist-beschichtete Wafer befindet sich in einer Positioniereinheit, wodurch die Durchführung von Belichtungsreihen auf dem Wafer realisiert wird. Zusätzlich kann der Maske-Waferabstand mit einer Genauigkeit im nm-Bereich eingestellt werden. Dies ermöglicht es, neben einfachen Kontrastkurven auch Auflösungstests durchzuführen. Zur Erzielung der höchstmöglichen Auflösung

wird das Verfahren der achromatischen Talbot-Lithographie verwendet. Bisher erreichte Auflösungen liegen im sub-30-nm-Bereich für Lochanordnungen und sub-40-nm für Linienanordnungen.

### Ergebnis

Mit dem EUV-LET können verschiedene EUV-Resists hinsichtlich Kontrast, Sensitivität und Auflösungsvermögen charakterisiert werden. Das EUV-LET ermöglicht dabei die schnelle und einfache Überprüfung neuer Resistkompositionen bei einer Wellenlänge von 13,5 nm.

### Anwendungsfelder

Die realisierte kompakte Lithographieanlage wird zur Entwicklung und Charakterisierung industrieller Photoresists für den Einsatz in der Lithographie mit extrem ultravioletter Strahlung verwendet.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wird im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen ZF4109602RE8 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dr. Sascha Brose  
Telefon +49 241 8906-8434  
sascha.brose@tos.rwth-aachen.de

Dr. Jochen Stollenwerk  
Telefon +49 241 8906-411  
jochen.stollenwerk@ilt.fraunhofer.de

3 Transmissionsmaske für Auflösungstests.  
4 EUV-Nanostrukturierungsanlage (EUV-LET).

1 Quelle-Kollektorsystem für extreme ultraviolette Strahlung.  
2 Berechnete Intensitätsverteilung mit Spotgröße von 4 mm.



# ZUWENDUNGSGEBER

## ELEKTROHYDRAULISCHE ZERKLEINERUNG VON MOBILTELEFONEN

### Aufgabenstellung

Die Rückgewinnung von Werkstoffen aus elektronischen Bauteilen erfordert eine Zerkleinerung des Guts und eine möglichst sortenreine Trennung der einzelnen Komponenten. Mit der heute gängigen Zerkleinerung mittels Prallbrechern und anschließender metallurgischer Behandlung lassen sich einige Wertstoffe nur in geringem Maße oder gar nicht zurückgewinnen. Bei den Arbeiten im Projekt ADIR steht das Recycling von Mobiltelefonen im Vordergrund.

Als bekannte Methode zur Zerkleinerung von Elektronikschrott wurde die elektrohydraulische Fragmentierung bereits erfolgreich demonstriert. Dabei werden durch kurze, starke Strompulse in Wasser Stoßwellen erzeugt, mit denen das zu behandelnde Gut zerkleinert wird. Um dieses Verfahren attraktiver für den Durchsatz von großen Mengen zu machen, sollte insbesondere der Energieaufwand zur Erzeugung der Stoßwellen minimiert werden.

### Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT wurde ein Demonstrator aufgebaut, bei dem die kapazitiv gespeicherte Energie in einem möglichst niederinduktiv ausgelegten Strompulsgenerator umgewandelt wird. Im Vergleich zum Stand der Technik konnte so der

Energieaufwand bisher um einen Faktor 4 reduziert werden. Bei einer elektrischen Pulsenergie von nur 0,3–1 kJ konnten so Strompulse im Bereich 40–80 kA erzeugt werden. Damit können Druckpulse in einer Wasserfunkenentladung von 50–100 MPa aufgebaut werden.

### Ergebnis

In ersten Untersuchungen konnten wertstoffhaltige Komponenten, wie Vibrationsalarme oder Lautsprecher, aus dem Kunststoffgehäuse von Mobiltelefonen getrennt werden. Weitere Arbeiten zielen z. B. auf die komplette Entstückung von Elektronikplatinen ab.

### Anwendungsfelder

Die elektrohydraulische Fragmentierung mit optimiertem Energieeintrag wurde exemplarisch am Beispiel von Mobiltelefonen durchgeführt, wobei eine Ausweitung des Verfahrens auf weitere Arten von Elektronikschrott möglich ist. Allgemein ist die elektrohydraulische Fragmentierung bei Verbundwerkstoffen, wie z. B. Verbundglas, Beton oder Schlacken, ein attraktives Verfahren zur Trennung der darin gebundenen Wertstoffe.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des EU-Projekts ADIR unter dem Förderkennzeichen 680449 (Next Generation Urban Mining – Automated Disassembly, Separation and Recovery of Valuable Materials from Electronic Equipment) durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dr. Klaus Bergmann  
Telefon +49 241 8906-302  
klaus.bergmann@ilt.fraunhofer.de

Prof. Reinhard Noll  
Telefon +49 241 8906-138  
reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de

Einige der in diesem Jahresbericht vorgestellten Verbundprojekte wurden mit öffentlichen Mitteln gefördert. Wir möchten den Zuwendungsgebern an dieser Stelle für Ihre Unterstützung danken.



Bundesministerium für Bildung und Forschung



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Die Landesregierung Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION



EUROPÄISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung



Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

1 Komponenten von Mobiltelefonen mit freigelegten Vibrationsalarmen.

2 Elektrohydraulisches Fragmentierungssystem.

# NETZWERKE UND CLUSTER

*»Zusammenkommen ist ein Beginn,  
Zusammenbleiben ein Fortschritt,  
Zusammenarbeiten ein Erfolg.«*

Henry Ford

## DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT AUF EINEN BLICK

### DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist die weltweit führende Organisation für anwendungsorientierte Forschung. Mit ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien sowie auf die Verwertung der Ergebnisse in Wirtschaft und Industrie spielt sie eine zentrale Rolle im Innovationsprozess. Sie ist Wegweiser und Impulsgeber für innovative Entwicklungen und wissenschaftliche Exzellenz. Mit inspirierenden Ideen und nachhaltigen wissenschaftlich-technologischen Lösungen fördert die Fraunhofer-Gesellschaft Wissenschaft und Wirtschaft und wirkt mit an der Gestaltung unserer Gesellschaft und unserer Zukunft.

Interdisziplinäre Forschungsteams der Fraunhofer-Gesellschaft setzen gemeinsam mit Vertragspartnern aus Wirtschaft und öffentlicher Hand originäre Ideen in Innovationen um, koordinieren und realisieren systemrelevante, forschungspolitische Schlüsselprojekte und stärken mit werteorientierter Wertschöpfung die deutsche und europäische Wirtschaft. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Austausch mit den einflussreichsten Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 74 Institute und Forschungseinrichtungen. Rund 28 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,8 Milliarden Euro. Davon fallen 2,3 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent davon erwirtschaftet Fraunhofer mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 30 Prozent steuern Bund und Länder als Grundfinanzierung bei, damit die Institute schon heute Problemlösungen entwickeln können, die in einigen Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft entscheidend wichtig werden.

Die Wirkung der angewandten Forschung geht weit über den direkten Nutzen für die Auftraggeber hinaus: Fraunhofer-Institute stärken die Leistungsfähigkeit der Unternehmen, verbessern die Akzeptanz moderner Technik in der Gesellschaft und sorgen für die Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Hochmotivierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf dem Stand der aktuellen Spitzenforschung stellen für uns als Wissenschaftsorganisation den wichtigsten Erfolgsfaktor dar. Fraunhofer bietet daher die Möglichkeit zum selbstständigen, gestaltenden und zugleich zielorientierten Arbeiten und somit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung, die zu anspruchsvollen Positionen in den Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft befähigt. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und des frühzeitigen Kontakts mit Auftraggebern hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.

### DIE FORSCHUNGSFELDER

Auf diese Forschungsfelder konzentriert sich die Forschung der Fraunhofer-Gesellschaft:

- Gesundheit und Umwelt
- Schutz und Sicherheit
- Mobilität und Transport
- Produktion und Dienstleistung
- Kommunikation und Wissen
- Energie und Rohstoffe



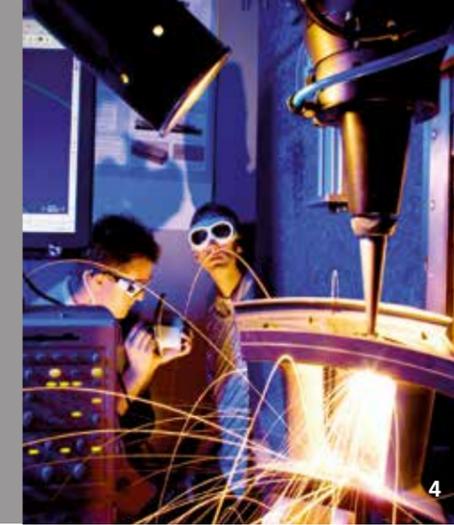
1



2



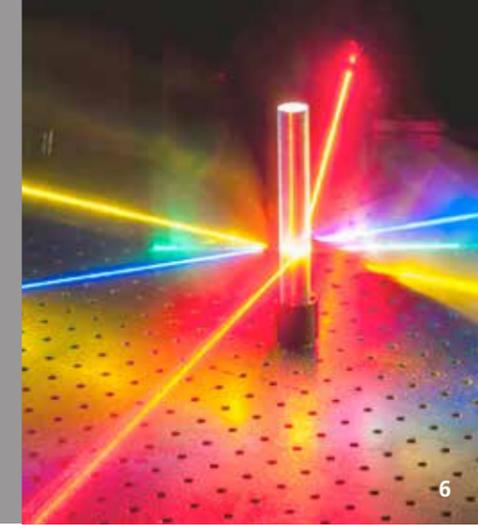
3



4



5



6

## FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

### Kompetenz durch Vernetzung

Im Fraunhofer-Verbund »Light & Surfaces« kooperieren sechs Fraunhofer-Institute auf den Gebieten Laser-, Optik-, Mess- und Beschichtungstechnik. Basierend auf grundlegenden Arbeiten in verschiedenen Anwendungsfeldern gewährleistet der Verbund eine schnelle und flexible Realisierung kundenspezifischer Systemlösungen in diesen Bereichen. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Markts ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten für den Kunden. In Kooperation mit den jeweils ortsansässigen Universitäten bieten die Institute das gesamte Spektrum der studentischen Ausbildung bis hin zur Promotion. Auf diese Weise sind die Fraunhofer-Institute nicht nur Innovationspartner für technologische Entwicklungen, sondern dienen auch kontinuierlich als Quelle des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses. [www.light-and-surfaces.fraunhofer.de](http://www.light-and-surfaces.fraunhofer.de)

### Kontakt

- Prof. Karsten Buse (Vorsitzender)  
karsten.buse@ipm.fraunhofer.de
- Dr. Heinrich Stülpnagel (Geschäftsführer)  
heinrich.stuelpnagel@ipm.fraunhofer.de

1 © Fraunhofer IWS.

2 © Fraunhofer IOF.

3 © Fraunhofer FEP.

4 © Fraunhofer ILT.

5 © Fraunhofer IST.

6 © Fraunhofer IPM.

### Kernkompetenzen des Verbunds

Die aufeinander abgestimmten Kompetenzen der sechs Verbundpartner gewährleisten eine schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an die unterschiedlichen Anforderungen aus den Bereichen:

- Laserfertigungsverfahren
- Strahlquellen
- Messtechnik
- Medizin und Life Sciences
- Werkstofftechnik
- Optische Systeme und Optikfertigung
- Mikro- und Nanotechnologie
- Dünnschichttechnik
- Plasmatechnik
- Elektronenstrahltechnik
- EUV-Technologie
- Prozess- und Systemsimulation

## DIE INSTITUTE

### Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP

Das Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP arbeitet an innovativen Lösungen auf den Arbeitsgebieten der Vakuumbeschichtung, der Oberflächenbehandlung und der organischen Halbleiter. Grundlage dieser Arbeiten sind die Kernkompetenzen Elektronenstrahltechnologie, Plasmagestützte Großflächen- und Präzisionsbeschichtung, Rolle-zu-Rolle Technologien, Entwicklung technologischer Schlüsselkomponenten sowie Technologien für organische Elektronik und IC-/Systemdesign. Fraunhofer FEP bietet damit ein breites Spektrum an Forschungs-, Entwicklungs- und Pilotfertigungsmöglichkeiten,

insbesondere für Behandlung, Sterilisation, Strukturierung und Veredelung von Oberflächen sowie für OLED-Mikrodisplays, organische und anorganische Sensoren, optische Filter und flexible OLED-Beleuchtung. Ziel ist, das Innovationspotenzial der Elektronenstrahl-, Plasmatechnik und organischen Elektronik für neuartige Produktionsprozesse und Bauelemente zu erschließen und es für unsere Kunden nutzbar zu machen. [www.fep.fraunhofer.de](http://www.fep.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Mit über 540 Mitarbeitern ist das Fraunhofer ILT ein gefragter FuE-Partner der Industrie für die Entwicklung innovativer Laserstrahlquellen, Laserverfahren und Lasersysteme. Unsere Technologiefelder umfassen Laser und Optik, Lasermesstechnik, Medizintechnik und Biophotonik sowie Lasermaterialbearbeitung. Hierzu zählen u. a. das Schneiden, Abtragen, Bohren, Schweißen und Löten sowie die Oberflächenbearbeitung, die Mikrofertigung und die Additive Fertigung. Übergreifend befasst sich das Fraunhofer ILT mit Laseranlagentechnik, Prozessüberwachung und -regelung, Modellierung sowie der gesamten Systemtechnik. [www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative optische Systeme zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zu dessen Anwendung. Unser Leistungsangebot umfasst die gesamte photonische Prozesskette vom optomechanischen und opto-elektronischen Systemdesign bis zur Herstellung von kundenspezifischen Lösungen und Prototypen. Das Institut ist in den fünf Geschäftsfeldern Optische Komponenten und Systeme, Feinmechanische Komponenten und Systeme, Funktionale Oberflächen und Schichten, Photonische Sensoren und Messsysteme sowie Lasertechnik aktiv. [www.iof.fraunhofer.de](http://www.iof.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM entwickelt maßgeschneiderte Messtechniken und Systeme für die Industrie. Dadurch ermöglicht das Institut seinen Kunden, den Energie- und Ressourceneinsatz zu minimieren und gleichzeitig Qualität und Zuverlässigkeit zu maximieren. Fraunhofer IPM macht Prozesse ökologischer und gleichzeitig ökonomischer. Langjährige Erfahrungen mit optischen Technologien bilden die Basis für Hightech-Lösungen in der Produktionskontrolle, der Objekt- und Formerfassung, der Gas- und Prozesstechnologie sowie im Bereich der thermischen Energiewandler. [www.ipm.fraunhofer.de](http://www.ipm.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Das Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST ist ein innovativer Partner für Forschung und Entwicklung in der Oberflächentechnik mit Kompetenzen in den zugehörigen Produkt- und Produktionssystemen. Ziel ist es, maßgeschneiderte Lösungen zu erarbeiten – vom Prototyp über wirtschaftliche Produktionsszenarien bis hin zur Skalierung auf industrielle Maßstäbe, und dies auch unter Maßgabe geschlossener Material- und Stoffkreisläufe. [www.ist.fraunhofer.de](http://www.ist.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Licht und Schicht: Das Fraunhofer IWS wirkt überall dort, wo Laser- auf Oberflächentechnik trifft. Wenn es darum geht, unterschiedliche Materialien Lage um Lage aufzutragen, zu fügen, zu trennen, zu funktionalisieren oder zu analysieren, kommt das Dresdner Institut ins Spiel. Von der Entwicklung neuer Verfahren über die Integration in die Fertigung bis hin zur anwendungsorientierten Unterstützung reicht das Angebot – alles aus einer Hand. Das Fraunhofer IWS stellt sich den Herausforderungen der Digitalisierung. Der Fokus liegt auf der Forschung und Entwicklung von Lösungen für »Industrie 4.0«. [www.iws.fraunhofer.de](http://www.iws.fraunhofer.de)

# STRATEGISCHE FRAUNHOFER-PROJEKTE

## FRAUNHOFER ICON-PROJEKT »QFC-4-1QID«

### Quantenbits ins Glasfasernetz bringen: Fraunhofer ICON-Projekt »QFC-4-1QID«

Quanteninformationen mit Glasfasern übertragen und damit dem Quanteninternet den Weg bereiten: Mit diesem Ziel starteten das niederländische Forschungszentrum QuTech und das Fraunhofer ILT am 1. September 2019 das ICON-Projekt QFC-4-1QID. In dieser langfristig angelegten, strategischen Partnerschaft der Forschungsinstitutionen entwickeln die Wissenschaftler zunächst Quanten-Frequenzkonverter für die Anbindung von Quantenprozessoren an Glasfasernetze. Eingesetzt wird die neue Technologie 2022 beim weltweit ersten Quanteninternet-Demonstrator.

Mit »ICON – International Cooperation and Networking« rief die Fraunhofer-Gesellschaft ein Förderprogramm ins Leben, das internationale Spitzenforscher zusammenbringt. Im Rahmen des Vorhabens »Low-Noise Frequency Converters for the First Quantum Internet Demonstrator – QFC-4-1QID-« begann die Zusammenarbeit von Fraunhofer ILT und QuTech, dem Forschungszentrum für Quantentechnologien der Technischen Universität Delft und der Niederländischen Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung TNO.

### Quanten-Frequenzkonverter für maßgeschneiderte Photonen

Quantencomputer bieten die Chance, hochkomplexe Berechnungen und Algorithmen in kürzester Zeit auszuführen und die aktuelle Informationstechnologie zu revolutionieren. In einem Quanteninternet lassen sich zukünftig mehrere Quantencomputer abhörsicher verbinden und neue Technologien wie das verteilte Quantencomputing nutzen.

Im ICON-Projekt QFC-4-1QID entwickeln die Partner Technologien, mit denen sich die Wellenlänge einzelner Photonen gezielt konvertieren lässt, wobei die Quanteninformation nicht beeinträchtigt wird. Ziel ist es, die Photonen anschließend verlustarm durch Glasfasern zu übertragen und Qubits – also die kleinsten Recheneinheiten eines Quantencomputers – über große Entfernungen miteinander zu koppeln.

Eine große Herausforderung ist das Design entsprechender Quanten-Frequenzkonverter mit einer hohen Gesamteffizienz. Es geht um die Umwandlung von Photonen aus Stickstofffehlstellen in Diamant mit einer Wellenlänge von 637 nm. Für Langstreckenverbindungen mit möglichst geringen Übertragungsverlusten sind mit den Qubits verschränkte Photonen mit Wellenlängen in den Telekommunikationsbändern im Bereich zwischen 1500 und 1600 nm zu erzeugen.

### Auf dem Weg zum Quanteninternet

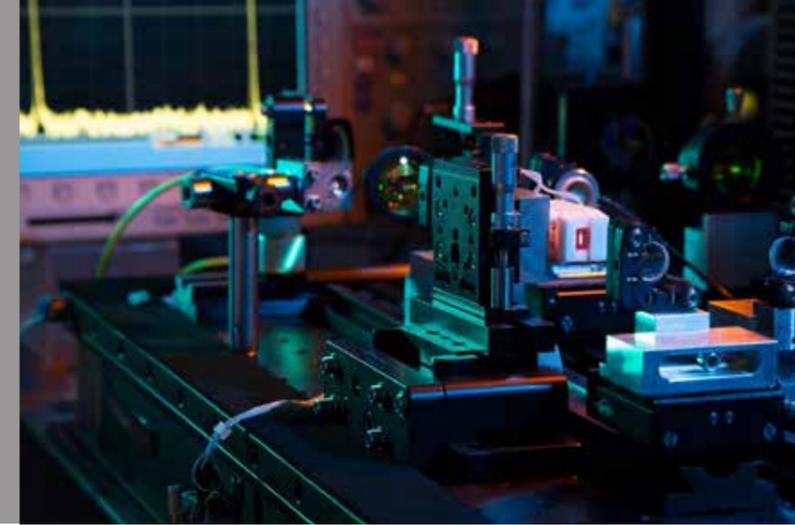
Der weltweit erste Quanteninternet-Demonstrator soll 2022 vier Städte in den Niederlanden verbinden. Mit dem Projekt QFC-4-1QID leistet die Fraunhofer-Gesellschaft einen Beitrag zu den technologischen Voraussetzungen für das erste Quanteninternet und positioniert sich als internationaler Forschungspartner im Bereich neuer Quantentechnologien.

### Ansprechpartner im Fraunhofer ILT

Florian Elsen M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-224  
florian.elsen@ilt.fraunhofer.de

Dr. Bernd Jungbluth  
Telefon +49 241 8906-414  
bernd.jungbluth@ilt.fraunhofer.de

Quelle und weiterführende Informationen im Internet unter: [www.ilt.fraunhofer.de/de/technologiefelder/quantentechnologie.html](http://www.ilt.fraunhofer.de/de/technologiefelder/quantentechnologie.html)



ICON-Projekt QFC-4-1QID: OPO als Konzeptstudie eines rauscharmen Quantenfrequenzkonverters.

## FRAUNHOFER-LEITPROJEKT »futureAM«

Mit »futureAM« treibt die Fraunhofer-Gesellschaft die Weiterentwicklung der Additiven Fertigung metallischer Bauteile systematisch voran. Dazu sind sechs erfahrene Institute im Bereich der Additiven Fertigung eine strategische Projektpartnerschaft eingegangen:

- Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT, Hamburg
- Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Bremen
- Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD, Darmstadt
- Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen
- Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Dresden
- Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz

### Strategische Ziele der Projektpartnerschaft

1. Aufbau einer übergreifenden Kooperationsplattform für die hochintegrierte Zusammenarbeit und die Nutzung der dezentral verteilten Ressourcen der Fraunhofer-Gesellschaft im Bereich Additive Manufacturing (AM)
2. Schaffung der technologischen Voraussetzungen für eine praxisrelevante Steigerung von Skalierbarkeit, Produktivität und Qualität von AM-Prozessen für die Fertigung individualisierter Metallbauteile

### Handlungsfelder

Zur Sicherung der Technologieführerschaft wird die Additive Fertigung systematisch in vier Handlungsfeldern, die von jeweils einem Institut koordiniert werden, weiterentwickelt:

- Industrie 4.0 und digitale Prozesskette
- Skalierbare und robuste AM-Prozesse
- Werkstoffe
- Systemtechnik und Automatisierung

Beispiele für die ambitionierten Projektziele in den vier Handlungsfeldern sind eine neuartige Software zur automatisierten AM-Bauteilidentifikation und -optimierung, ein skalierbares LPBF-Anlagenkonzept mit Produktivitätssteigerung (Faktor > 10), ein Verfahren sowie eine Systemtechnik zur Erzeugung orts aufgelöster, maßgeschneiderter Multi-Materialeigenschaften und eine autonome Fertigungszelle für die Nachbehandlung von AM-Bauteilen.

Die intensive Zusammenarbeit in den vier Handlungsfeldern wird durch den Aufbau eines »Virtual Lab«, der die Kompetenzen und Ressourcen der Projektpartner digital abbildet, ergänzt. Hieraus werden unter Beteiligung aller Projektpartner Technologiedemonstratoren entwickelt.

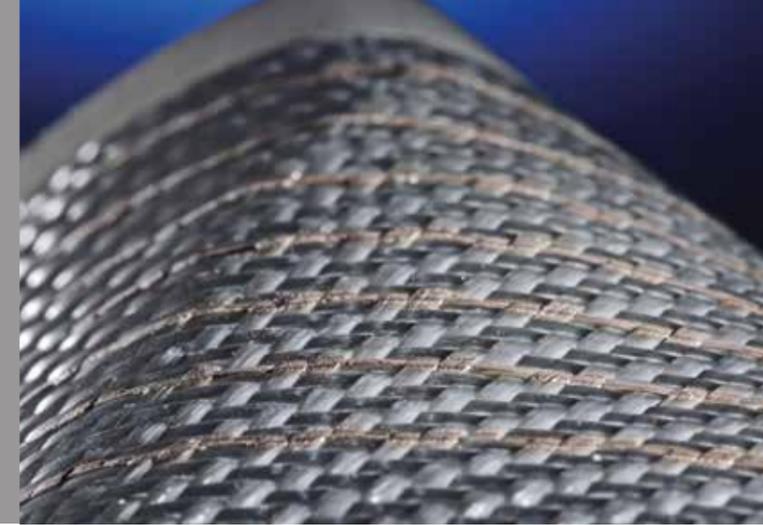
### Ansprechpartner im Fraunhofer ILT

Christian Tenbrock M.Sc., M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8350  
christian.tenbrock@ilt.fraunhofer.de

Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum (Gesamtkoordinator)  
Telefon +49 241 8906-398  
johannes.henrich.schleifenbaum@ilt.fraunhofer.de

Weitere Informationen unter:  
[www.futuream.fraunhofer.de](http://www.futuream.fraunhofer.de)

# FRAUNHOFER-ALLIANZEN UND LEISTUNGSZENTREN



Additive Herstellung elektrischer Funktionsschichten in Faserverbundwerkstoffen.

## FRAUNHOFER-LEITPROJEKT »GO BEYOND 4.0«

Den sechs Fraunhofer-Instituten ENAS, IFAM, ILT, IOF, ISC und IWU ist es gelungen, mit digitalen Druck- und Laserverfahren z. B. Leiterbahnen, Sensorik und Hightech-Beleuchtungsmodule individuell und bauteilintegriert herzustellen. Das Ergebnis: Individualisierung von Bauteilen in Massenproduktionsumgebungen mit neuen Möglichkeiten für Design, Materialersparnis und Gewichtsreduktion.

Anhand der drei Demonstratoren »Smart Door« – Fertigungsdomäne Automobilbau, »Smart Wing« – Fertigungsdomäne Luftfahrt und »Smart Luminaire« – Fertigungsdomäne Beleuchtung konnte die Einsatzfähigkeit digitaler Druck- und Laserverfahren gezeigt werden. Diese und weitere Anwendungsmöglichkeiten zeigt auch anschaulich der Film zum Leitprojekt »Go Beyond 4.0« (siehe: [www.ilt.fraunhofer.de/de/mediathek/video-audio/zentren.html#GoBeyond40](http://www.ilt.fraunhofer.de/de/mediathek/video-audio/zentren.html#GoBeyond40))

### Ansprechpartner im Fraunhofer ILT

Dr. Christian Vedder  
Telefon +49 241 8906-378  
christian.vedder@ilt.fraunhofer.de

Weiterführende Informationen unter:  
[www.ilt.fraunhofer.de/de/cluster.html#GoBeyond40](http://www.ilt.fraunhofer.de/de/cluster.html#GoBeyond40)

## FRAUNHOFER-ALLIANZEN

Institute oder Abteilungen von Instituten mit unterschiedlichen Kompetenzen kooperieren in Fraunhofer-Allianzen, um ein industrierelevantes Geschäftsfeld gemeinsam zu bearbeiten und zu vermarkten. Das Fraunhofer ILT engagiert sich in den nachfolgenden sieben Fraunhofer-Allianzen:

- Batterien
- Generative Fertigung
- Leichtbau
- Nanotechnologie
- Simulation
- Space
- SysWasser

## LEISTUNGSZENTREN

Leistungszentren organisieren den Schulterschluss der universitären und außeruniversitären Forschung mit der Wirtschaft und zeichnen sich durch verbindliche, durchgängige Roadmaps der beteiligten Partner in den Bereichen Forschung und Lehre, Nachwuchsförderung, Infrastruktur, Innovation und Transfer aus. Sie sind ein Angebot an die Politik, wissenschaftliche Exzellenz mit gesellschaftlichem Nutzen prioritär zu entwickeln. Das Fraunhofer ILT ist an dem Leistungszentrum »Vernetzte Adaptive Produktion«, das vom Aachener Fraunhofer IPT koordiniert wird und eines von bundesweit 15 Leistungszentren der Fraunhofer-Gesellschaft ist, beteiligt.

### Fraunhofer-Leistungszentrum »Vernetzte Adaptive Produktion« in Aachen

Der Schwerpunkt dieses Leistungszentrums liegt in der Entwicklung, systematischen Einführung und Nutzung moderner Digitalisierungstechnologien für zukunftsfähige, industrielle Produktionssysteme und Wertschöpfungsketten im Sinne von »Industrie 4.0«. Im Rahmen eines übergreifenden FuE-Moduls »Digitalisierung und Vernetzung« erarbeitet das Leistungszentrum in den Themenfeldern »Smart Manufacturing Plattform«, »Big Data«, »Adaptive Prozesskette« und »Prozesssimulation und Modellierung« das Konzept der vollständig vernetzten, adaptiven Produktion. Alle Entwicklungen werden in sechs Pilotlinien in den Bereichen Energie, Mobilität und Gesundheit anhand repräsentativer Prozessketten validiert und demonstriert. Die Anbindung an das Fraunhofer Cloud System »Virtual Fort Knox« stellt hierbei eine neutrale und sichere Plattform zur Speicherung der Produktionsdaten und Ausführung von Webservices zur Analyse und Optimierung der Prozessketten dar. Die enge Zusammenarbeit mit namhaften Industrieunternehmen stellt die Übertragbarkeit in ein industrielles Umfeld sicher.

Aufgabe des Leistungszentrums ist es, in einem Zeitraum von drei Jahren eine offene Forschungsplattform und Testumgebung für die Industrie zu entwerfen, in der neue Konzepte einer digitalisierten Produktion erforscht und praxisnah erprobt werden können. Das Fraunhofer ILT deckt die folgenden Schwerpunkte ab:

- Digitale Prozesskette für die laserbasierte Reparatur von Turbomaschinenkomponenten
- Vernetzung konventioneller und laserbasierter Prozesse im Werkzeugbau
- Modellbasierte Prozessentwicklung und -bewertung flexibler Verschaltungskonzepte für die Batteriemodulfertigung mittels Laserstrahlschweißen

### »ICNAP« – Internationale Community zur Entwicklung von Anwendungen und Technologien für die Industrie 4.0

Ziel der Arbeiten innerhalb der Community des International Center for Networked, Adaptive Production (ICNAP) ist es, anspruchsvolle Wertschöpfungsketten zur Herstellung komplexer und individualisierter Produkte deutlich flexibler und effizienter zu gestalten.

Das ICNAP stellt eine Verstärkung der Forschungsarbeiten im Leistungszentrum unter aktiver Beteiligung der Industrie dar. Leistungsstarke Partner aus den Bereichen IT-Systemanbieter, Anlagenhersteller sowie produzierende Unternehmen haben bereits ihre weitere Mitarbeit zugesagt.

Die Herausforderung liegt dabei nicht in der reinen Weiterentwicklung von Fertigungsverfahren. Vielmehr sollen die Möglichkeiten der Digitalisierung und Vernetzung für unterschiedlichste technische Produkte, Prozesse und Unternehmensnetzwerke demonstriert und validiert werden.

### Ansprechpartner im Fraunhofer ILT

Dr. Alexander Olowinsky  
Telefon +49 241 8906-491  
alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de

Weitere Informationen unter:  
[www.vernetzte-adaptive-produktion.de](http://www.vernetzte-adaptive-produktion.de)

# FRAUNHOFER CLUSTER OF EXCELLENCE

## ADVANCED PHOTON SOURCES CAPS

Mit dem Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources CAPS startete die Fraunhofer-Gesellschaft im Januar 2018 ein ambitioniertes Vorhaben. Das Ziel ist die internationale Technologieführerschaft bei Lasersystemen, die mit ultrakurzen Pulsen (UKP) höchste Leistungen erreichen, sowie die Erforschung von deren Einsatzpotenzialen im Verbund mit Fraunhofer-Partnern. Die neuen Systeme sollen alle bisherigen UKP-Laser um eine Größenordnung in der mittleren Laserleistung übertreffen. Gleichzeitig wird an der erforderlichen Systemtechnik sowie an möglichen Anwendungen in Industrie und Forschung gearbeitet.

### Fraunhofer CAPS – ein starkes Netzwerk

Derzeit entwickeln 13 Fraunhofer-Institute gemeinsam eine neue Generation extrem leistungsstarker Ultrakurzpulslaser. Neue Anwendungsbereiche sollen erschlossen, ultrapräzise Fertigungsverfahren im industriellen Umfeld skaliert und neue Pulsdauer- und Wellenlängenbereiche für die Forschung bereitgestellt werden. Koordiniert wird das Cluster vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen und dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena.

### UKP-Laser für hochpräzise Anwendungen

UKP-Laser erzeugen im Fokus selbst bei vergleichsweise kleinen Pulsenergien extrem hohe Intensitäten. Lange Zeit wurden sie lediglich in der Grundlagenforschung eingesetzt. Die Entwicklung hocheffizienter, leistungsstarker Pumpdioden ermöglichte die Nutzung neuer Lasermedien, insbesondere von Ytterbium-dotierten Fasern und Kristallen. Darauf basierende UKP-Laser haben in den letzten Jahren mittlere Laserleistungen und eine Robustheit erreicht, die auch für industrielle Anwendungen genutzt werden kann.

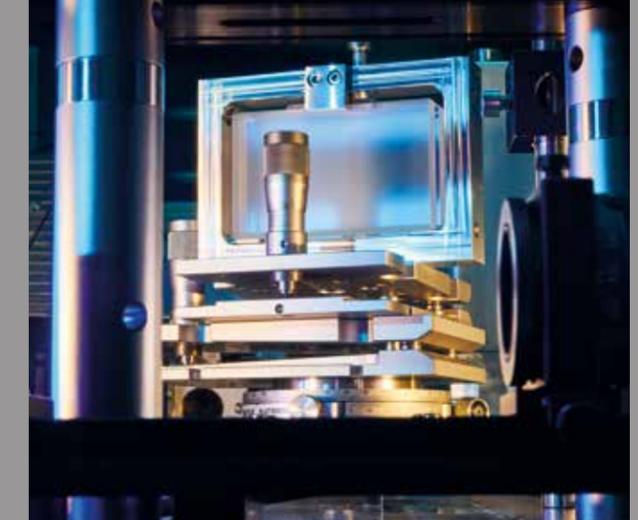
Für Anwendungen in der Mikromaterialbearbeitung haben UKP-Laser zwei wesentliche Vorteile: Einerseits können sie praktisch alle Materialien bearbeiten. Andererseits ist der Abtrag besonders präzise und dadurch schonend, da durch die ultraschnelle Wechselwirkung kaum Wärme im angrenzenden Material verbleibt. Deshalb waren diese Laser schon früh für die Medizintechnik interessant, beispielsweise für Augenoperationen mit Hilfe des Femto-LASIK-Verfahrens.

### Advanced Photon Sources – Strahlleistungen im kW-Bereich

Im Hinblick auf wirtschaftlich vertretbare Bearbeitungsgeschwindigkeiten beim Schneiden von ultraharten Keramikmaterialien und faserverstärkten Kunststoffen reicht die Leistung aktueller UKP-Laser der 100-W-Klasse oft nicht aus. Getrieben durch die Anwendungspotenziale in der Industrie und den Bedarf der Grundlagenforschung haben sich die Partner des Clusters zum Ziel gesetzt, die mittlere Leistung der UKP-Quellen an den Fraunhofer-Instituten ILT und IOF bis in den 10-kW-Bereich zu erhöhen.



Aufbau zur nichtlinearen Pulskompression.



Kompressionsgitter zur Erzeugung höchster Pulsenergien mittels CPA.

### Applikationslabore für Industrie und Wissenschaft

Ein wesentliches Ziel des Forschungsclusters ist die frühzeitige Arbeit an verschiedenen Anwendungen. Dafür stellen die koordinierenden Fraunhofer-Institute IOF und ILT in Jena und Aachen zwei Applikationslabore mit mehreren kW-UKP-Laserquellen sowie der nötigen Systemtechnik zur Verfügung. Das am 17. September 2019 eröffnete Applikationslabor am Fraunhofer ILT liegt direkt neben dem Laserentwicklungslabor und ist mit einer separaten Strahlquelle ausgestattet. So können in drei verschiedenen Räumen parallel Versuche vorbereitet und durchgeführt werden. 2019 steht zunächst eine Quelle mit 500 W, Pulsenergien bis zu 1 mJ und Pulsdauern unter 100 fs bereit, die bis Mitte 2020 auf 2,5 kW (5 mJ) erweitert wird. Die Labore der User Facility stehen Industriepartnern für Applikationsuntersuchungen zur Verfügung. Dabei können sie auf das Know-how der verschiedenen Fraunhofer-Partnerinstitute zurückgreifen.

### Breites Anwendungsspektrum

Die Applikationsentwicklung zielt darauf ab, neue Prozesse zu untersuchen und bekannten Verfahren zu industriell relevanten Durchsätzen zu verhelfen. Die Beispiele reichen von der Mikrostrukturierung und Oberflächenfunktionalisierung von Solarzellen, ultraharten Keramiken und Batteriekomponenten bis hin zum Schneiden von Gläsern und Leichtbaumaterialien. Neben Durchbrüchen in der ultrapräzisen Fertigung mit hoher Produktivität ist mit den neuen UKP-Quellen auch die Erzeugung kohärenter Strahlung bis in den weichen Röntgenbereich geplant. Die anvisierten Photonenflüsse liegen um zwei bis drei Größenordnungen über den bisher erreichten. Damit sollen in den Materialwissenschaften Anwendungen wie die Generierung und Untersuchung neuartiger Materialien etabliert werden. Darüber hinaus ergeben sich neue Möglichkeiten für den Halbleiterbereich, die Lithographie oder die Bildgebung biologischer Proben.

Auch für die Grundlagenforschung ist die Skalierung der Laserleistung interessant. Perspektivisch werden Laserteilchenbeschleuniger wesentlich kompakter und können dadurch sogar in bestehende Labore integriert werden. Zudem können diese sogenannten »secondary sources« auch Gebiete wie die Materialforschung und Medizintechnik maßgeblich beflügeln.

### Ansprechpartner im Fraunhofer ILT

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hoffmann  
Telefon +49 241 8906-206  
hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de

### Gesamtleitung des Clusters

Prof. Reinhart Poprawe (bis 30.9.2019)  
Telefon +49 241 8906-109  
reinhart.poprawe@ilt.fraunhofer.de

Prof. Constantin Häfner (ab 1.10.2019)  
Telefon +49 241 8906-110  
constantin.haefner@ilt.fraunhofer.de

Prof. Andreas Tünnermann (Stellvertreter)  
Telefon +49 3641 807-201  
andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de

Weiterführende Informationen  
im Internet unter: [www.caps.fraunhofer.de](http://www.caps.fraunhofer.de)

# LASERTECHNIK AN DER RWTH AACHEN UNIVERSITY



© RWTH Aachen University / Peter Winandy.

## GEMEINSAM ZUKUNFT GESTALTEN

Die RWTH Aachen University bietet mit den Lehrstühlen für Lasertechnik LLT, für Technologie Optischer Systeme TOS und für Digital Additive Production DAP sowie dem Lehr- und Forschungsgebiet für Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD ein herausragendes Kompetenzcluster im Bereich der Optischen Technologien. Dies ermöglicht eine überkritische Bearbeitung grundlegender und anwendungsbezogener Forschungsthemen. Die enge Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT erlaubt nicht nur industrielle Auftragsforschung auf der Basis solider Grundlagenkenntnisse sondern führt vielmehr zu neuen Impulsen in der Weiterentwicklung von optischen Verfahren, Komponenten und Systemen. Unter einem Dach werden die Synergien von Infrastruktur und Know-how aktiv genutzt.

Dies kommt insbesondere dem wissenschaftlichen und technischen Nachwuchs zugute. Die Kenntniss der aktuellen industriellen und wissenschaftlichen Anforderungen in den Optischen Technologien fließt unmittelbar in die Gestaltung der Lehrinhalte ein. Darüber hinaus können Studenten und Promovierende über die Projektarbeit in den Lehrstühlen und im Fraunhofer ILT ihre theoretischen Kenntnisse in die Praxis umsetzen. Auch die universitäre Weiterbildung wird gemeinsam gestaltet. Lehre, Forschung und Innovation – das sind die Bausteine, mit denen die vier Lehrstühle und das Fraunhofer ILT Zukunft gestalten.

### Lehrstuhl für Lasertechnik LLT

Der Lehrstuhl für Lasertechnik ist seit 1985 an der RWTH Aachen University in der grundlagen- und anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung in den Bereichen Lasermesstechnik, Strahlquellenentwicklung, Lasermaterialbearbeitung sowie Digital Photonic Production tätig.

Ein großer Teil der Forschungsaktivitäten wird im Rahmen einiger Großprojekte bearbeitet, wie z. B. dem Exzellenzcluster »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer«, dem BMBF-Forschungscampus »Digital Photonic Production« und dem DFG-Sonderforschungsbereich 1120 »Präzision aus Schmelze«. Der Lehrstuhl LLT ist zudem auch Koordinator des »Research Center for Digital Photonic Production«.

Aktuelle Forschungsthemen:

- Wechselwirkung von Ultrakurzpuls-Laserstrahlung mit dem zu bearbeitenden Material beim Abtragen, Modifizieren, Bohren oder Schmelzen
- Zukünftige Konzepte für Strahlquellen, wie z. B. direkt-diodengepumpte Alexandrit-Laser oder die Erzeugung von EUV-Strahlung mittels ultrakurzer Pulse
- Integration von optischen Messverfahren zur Qualitätskontrolle beim »Additive Manufacturing«
- Neue Konzepte zu innovativen laserbasierten Bearbeitungsprozessen und -strategien



Prof. Constantin Häfner (Lehrstuhlleiter seit 1.10.2019)  
[www.llt.rwth-aachen.de](http://www.llt.rwth-aachen.de)

### Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme TOS

Mit dem Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme TOS trägt die RWTH Aachen University seit 2004 der wachsenden Bedeutung hochentwickelter optischer Systeme in der Fertigung, den IT-Industrien und den Lebenswissenschaften Rechnung. Der Fokus der Forschung liegt in der Entwicklung und Integration optischer Komponenten und Systeme für Laserstrahlquellen und Laseranlagen.

Hochkorrigierte Fokussiersysteme für hohe Laserleistungen, Einrichtungen zur Strahlhomogenisierung oder innovative Systeme zur Strahlumformung spielen bei Laseranlagen in der Fertigungstechnik eine bedeutende Rolle. Die Leistungsfähigkeit von Faserlasern und diodengepumpten Festkörperlaser wird beispielsweise durch Koppeloptiken und Homogenisatoren für das Pumplicht bestimmt. Ein weiteres Forschungsthema sind Freiformoptiken für die innovative Strahlformung. Im Bereich Hochleistungsdiodenlaser werden mikro- und makrooptische Komponenten entwickelt und zu Systemen kombiniert. Weiterhin werden Montagetechniken optimiert.



Prof. Peter Loosen (Lehrstuhlleiter)  
[www.tos.rwth-aachen.de](http://www.tos.rwth-aachen.de)

### Lehrstuhl für Digital Additive Production DAP

Der Lehrstuhl für Digital Additive Production DAP erforscht zusammen mit industriellen und wissenschaftlichen Partnern die grundlegenden Zusammenhänge der Additiven Fertigung vom Bauteildesign über die Supply Chain, die Produktion und das Bauteilhandling bis hin zu den Einzeleigenschaften additiv gefertigter Bauteile. Zudem stehen begleitende Prozesse wie Auslegung, Qualitätsmanagement, Abbildung der gesamten digitalen Prozesskette und Fabrikplanung im Fokus der Entwicklungsarbeiten. Im Rahmen von Grundlagen-, Verbund- und Industrieprojekten aus den verschiedensten Branchen, wie beispielsweise Automotive, Luft- und Raumfahrt, Turbomaschinenbau, Life Sciences, Electronics, Werkzeug- und Formenbau, sowie der engen Kooperation mit außeruniversitären Forschungseinrichtungen verfügt der DAP über eine weitreichende Expertise sowohl software- als auch hardwareseitig.

Neben der Weiterentwicklung bestehender Additive Manufacturing-Prozesse sowie vorhandener Maschinen- und Systemtechnik liegt der Fokus des DAP insbesondere auf softwaregetriebenen End-to-End-Prozessen. Angefangen vom bionischen Leichtbau über die Funktionsoptimierung für AM und dem Design »digitaler Materialien« bis hin zur Validierung im realen Prozess können die Vorteile additiver Verfahren nutzbar gemacht werden.



Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum (Lehrstuhlleiter)  
[www.dap.rwth-aachen.de](http://www.dap.rwth-aachen.de)

### Lehr- und Forschungsgebiet für Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD

Das 2005 gegründete Lehr- und Forschungsgebiet für Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD erforscht die Grundlagen der optischen Technologien mit Schwerpunkt auf Modellbildung und Simulation für die Anwendungsbereiche Makroschweißen und -schneiden, Additive Fertigung, Präzisionsbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern und PDT in der Zahnmedizin sowie Dermatologie.

Technische Systeme werden durch Anwendung und Erweiterung mathematisch-physikalischer und experimenteller Methoden untersucht. Mit der Analyse mathematischer Modelle werden ein besseres Verständnis dynamischer Zusammenhänge erreicht und neue Konzepte für die Verfahrensführung gewonnen. In Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT werden die Ergebnisse für Partner aus der Industrie umgesetzt.

Im Vordergrund der Ausbildungsziele steht die Vermittlung einer wissenschaftlichen Methodik zur Modellbildung anhand praxisnaher Beispiele. Die Modellbildung wird durch die experimentelle Diagnose der Laser-Fertigungsverfahren und die numerische Berechnung von ausgewählten Modellaufgaben geleitet.



Prof. Wolfgang Schulz (Leiter des Lehr-/Forschungsgebiets)  
[www.nld.rwth-aachen.de](http://www.nld.rwth-aachen.de)

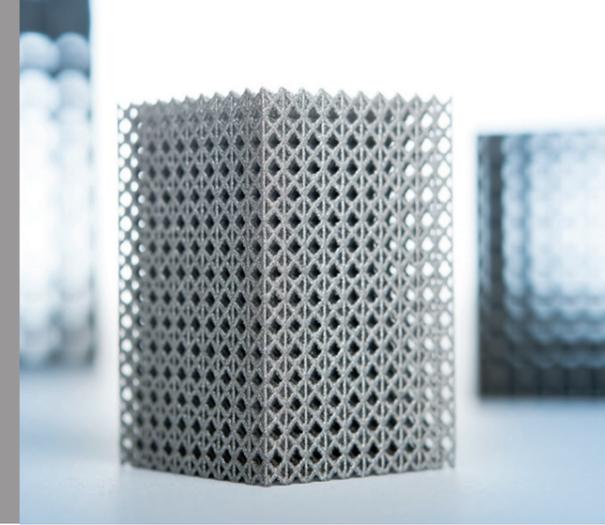
### Lehrgebiet Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing an der FH Aachen

Ende August 2019 emeritierte Prof. Dr. Andreas Gebhardt von der FH Aachen und übergab sein Lehrgebiet »Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing« im Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik am 1.9.2019 an den langjährigen Experten für 3D-Druck, Sebastian Bremen, vom Fraunhofer ILT. Im Sommersemester 2016 erhielt Sebastian Bremen bereits an der FH Aachen erste Lehraufträge für Lasertechnik und Rapid Prototyping und erweiterte seither seine Expertise in diesem Lehrgebiet.

2013 gründeten die FH Aachen und das Fraunhofer ILT das Aachener Zentrum für 3D-Druck, um die Zukunft der Additiven Fertigung gemeinsam zu entwickeln. Diesen Kooperationsvertrag haben das Fraunhofer ILT und die FH Aachen Anfang 2019 erneuert. Gemeinsam betreiben sie eine LPBF-Anlage, bei der es sich derzeit um die weltweit größte kommerzielle Anlage für das Laser Powder Bed Fusion (LPBF) handelt. Beide Institutionen nutzen diese LPBF-Anlage, um den metallischen 3D-Druck weiterzuentwickeln. Prof. Bremen leitet das Aachener Zentrum für 3D-Druck weiterhin und führt somit die Verbindung zwischen FH Aachen und dem Fraunhofer ILT fort.



Prof. Sebastian Bremen (Leiter des Lehrgebiets)  
[www.goethelab.fh-aachen.de](http://www.goethelab.fh-aachen.de)



## DIGITAL PHOTONIC PRODUCTION DPP

### Digital Photonic Production – die Zukunft der Produktion

Mit dem Thema Digital Photonic Production hat sich das Fraunhofer ILT eine zentrale Fragestellung der Produktionstechnik von morgen auf die Fahne geschrieben. Digital Photonic Production erlaubt die direkte Herstellung von nahezu beliebigen Bauteilen oder Produkten aus digitalen Daten. Verfahren, die vor über zehn Jahren für das Rapid Prototyping erfunden wurden, entwickeln sich zu Rapid Manufacturing Verfahren zur direkten Produktion von Funktionsbauteilen. Rapid Manufacturing Verfahren werden bereits in einigen Anlagen wie z. B. im Automobilbau und in der Luftfahrtindustrie für die industrielle Fertigung eingesetzt. Das Werkzeug Laser nimmt dabei wegen seiner einzigartigen Eigenschaften eine zentrale Rolle ein. Kein anderes Werkzeug kann annähernd so präzise dosiert und gesteuert werden.

### Mass Customization

Digital Photonic Production geht dabei weit über laserbasierte generative Fertigungsverfahren hinaus. Neue Hochleistungs-Ultrakurzpulslaser ermöglichen zum Beispiel einen sehr schnellen und nahezu materialunabhängigen Abtrag. Bis hinein in den Nanometerbereich können so feinste funktionale 3D-Strukturen erzeugt werden. Im Zusammenhang mit diesen neuen Technologien wird teilweise von einer neuen industriellen Revolution gesprochen. Im Wesentlichen beruht dieses revolutionäre technologische Potenzial auf einer fundamentalen Änderung der Kostenfunktion für laserbasierte Fertigungsverfahren.

Im Unterschied zu konventionellen Verfahren können mit dem Werkzeug Laser sowohl kleine Stückzahlen als auch komplexe Produkte in kleinster Dimension, aus verschiedensten Materialien und mit kompliziertesten Geometrien kostengünstig gefertigt werden. Um dieses Potenzial von Digital Photonic Production vollständig zu nutzen, müssen Prozessketten ganzheitlich betrachtet werden. Die Neuauslegung von industriellen Prozessketten reicht dabei von vor- und nachgelagerten Fertigungsschritten über das Bauteildesign bis zu völlig neuen Geschäftsmodellen wie Mass Customization oder Open Innovation.

### Forschungscampus Digital Photonic Production

Genau diese ganzheitliche Betrachtung ist im BMBF-Forschungscampus Digital Photonic Production in Aachen möglich. Im Rahmen der Förderinitiative »Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF wird der Aachener Campus über einen Zeitraum von 15 Jahren mit bis zu 2 Millionen Euro pro Jahr nachhaltig gefördert.

Der Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University ging im Jahr 2012 als Koordinator eines Antragskonsortiums als einer von neun Gewinnern aus dem nationalen Wettbewerb hervor. Rund 30 Unternehmen und wissenschaftliche Institute arbeiten im Rahmen dieser Initiative gemeinsam unter kontinuierlicher Einbindung neuer Partner unter einem Dach an grundlegenden Forschungsfragen. Mit dem Forschungscampus Digital Photonic Production steht der Industrie und Wissenschaft in Aachen ein schlagfertiges Instrument zur Gestaltung der Zukunft der Produktionstechnik zur Verfügung.

# RWTH AACHEN CAMPUS

## RWTH AACHEN CAMPUS

Nach dem Vorbild der Stanford University und des Silicon Valleys schafft die RWTH Aachen University in den kommenden Jahren auf einem Gesamtareal von ca. 2,5 km<sup>2</sup> einen der größten technologieorientierten Campus Europas und damit eine der national und international bedeutendsten Wissens- und Forschungslandschaften. Die Cluster-Flächen sind in unmittelbarer Nähe zu einigen Großforschungsinstituten und -einrichtungen auf dem ehemaligen Hochschulerweiterungsgelände in Aachen-Melaten sowie auf dem Teilareal des Aachener Westbahnhofs verortet. Damit werden die Kernbereiche der RWTH Aachen in der Innenstadt, auf der Hörn und in Melaten erstmals zu einem zusammenhängenden Campus verbunden.

### Forschungskatalysator und Innovationsgenerator

Durch das in Deutschland einzigartige Angebot der »Immatrikulation von Unternehmen« bietet der RWTH Aachen Campus eine völlig neue Form des Austauschs zwischen Industrie und Hochschule. Sie ermöglicht den Unternehmen die aktive Beteiligung in Center, die die operativen Einheiten der Cluster darstellen, um interdisziplinär und konsortial an Schwerpunktthemen zusammenzuarbeiten. Zugleich wird so der Zugang zu qualifiziertem Nachwuchs gesichert. Auch zügige praxisorientierte Promotionsverfahren werden ermöglicht.

Die Ansiedelung der interessierten Unternehmen auf dem RWTH Aachen Campus kann zur Miete in Investorengebäuden oder mit einem eigenen Gebäude erfolgen. So entsteht eine einzigartige, intensivere Form der Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Unternehmen. Hinter allem steht das ganzheitliche Konzept: Forschen, Lernen, Entwickeln, Leben.

Der RWTH Aachen Campus schafft nicht nur die ideale Arbeitsumgebung für mehr als 10.000 Mitarbeiter mit Forschungseinrichtungen, Büros und Weiterbildungszentren sondern bietet zudem durch Gastronomie, Wohnen, Einkaufsmöglichkeiten, Kinderbetreuung und vielfältige Serviceeinrichtungen ein hohes Maß an Lebensqualität.

### Stand und Entwicklung

Der RWTH Aachen Campus entsteht in mehreren Schritten. Die erste Etappe wurde 2010 mit der Erschließung und Bebauung des Campus-Melaten mit sechs thematischen Clustern gestartet – darunter auch das vom Fraunhofer ILT koordinierte Cluster Photonik. Die Themen der ersten sechs Cluster sind:

- Cluster Biomedizintechnik
- Cluster Nachhaltige Energie
- Cluster Photonik
- Cluster Produktionstechnik
- Cluster Schwerlastantriebe
- Cluster Smart Logistik

Derzeit werden die thematischen Cluster weiter verdichtet. Im nächsten Schritt wird der Campus Westbahnhof erschlossen. Die beiden Campus-Gebiete sollen auf 16 Cluster wachsen. Die Infrastruktur wird beispielsweise durch den Bau einer Kongresshalle, einer Bibliothek und Hotels erweitert. In allen 16 Clustern werden relevante Zukunftsthemen für Industrie und Gesellschaft bearbeitet.

Weitere Informationen unter: [www.rwth-campus.com](http://www.rwth-campus.com)

## CLUSTER PHOTONIK

Das Cluster Photonik, eines von sechs Startclustern auf dem RWTH Aachen Campus, ist spezialisiert auf die Erforschung und Entwicklung von Verfahren zur Erzeugung, Formung und Nutzung von Licht, insbesondere als Werkzeug für die industrielle Produktion. Der Laserstrahl kann im Vergleich zu anderen Werkzeugen präzise dosiert und gesteuert werden. Das Cluster Photonik wurde von Prof. Poprawe (Leiter des Fraunhofer ILT bis Ende September 2019) initiiert. Das große Areal bietet genügend Raum für einerseits die interdisziplinäre Kooperation von wissenschaftlichen Einrichtungen untereinander und andererseits für die enge strategische Zusammenarbeit von Unternehmen mit dem Fraunhofer ILT und den assoziierten Lehrstühlen der RWTH Aachen University. Insofern ist das Cluster Photonik die konsequente Weiterentwicklung des seit 1988 bestehenden Anwenderzentrums des Fraunhofer ILT, in dem ständig rund 10 Unternehmen als Gastfirmen des Instituts in eigenen Büros und Laboren vor Ort in engem Schulterschluss mit dem Fraunhofer ILT tätig waren.

Das erste Gebäude im Cluster Photonik – das Industry Building Digital Photonic Production – wurde vor über 500 Fachexperten aus der Lasertechnologie sowie 100 Gästen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik im Umfeld des International Laser Technology Congress AKL'16 am 28. April 2016 feierlich eröffnet. Die Schlüsselübergabe fand zwischen dem privatwirtschaftlichen Investor Landmarken AG mit dem KPF-Architektenteam und dem Fraunhofer ILT statt. Die Gäste konnten das neue 7000 qm große DPP-Gebäude mit seinen Forschungs- und Büroräumlichkeiten besichtigen. Rund 20 Unternehmen sowie FuE-Teams des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik der RWTH Aachen University belegen das Gebäude.

Eine weitere durch den Bund und das Land NRW finanzierte Infrastruktur zur interdisziplinären universitären Kooperation im Bereich Digital Photonic Production wurde in 2019 eröffnet: das Research Center Digital Photonic Production. Das Richtfest des Neubaus fand am 24. Mai 2016 in Anwesenheit von BMBF-Staatssekretär Thomas Rachel (MdB) und dem ehemaligen RWTH-Rektor Prof. Ernst Schmachtenberg statt. Auf einer Nutzfläche von 4.300 qm nehmen 16 Institute der RWTH Aachen University aus 6 Fakultäten die interdisziplinäre und ganzheitliche Erforschung von digitalen photonischen Fertigungsketten in Angriff.

Die beiden Gebäude, das Research Center Digital Photonic Production und das Industry Building Digital Photonic Production, bilden die Basis des BMBF-geförderten Forschungscampus DPP. Der Forschungscampus DPP bietet derzeit mehr als 20 Industriepartnern die Möglichkeit, gemeinsam unter einem Dach zu forschen. Hierzu zählen sowohl große Unternehmen wie TRUMPF, MTU oder Siemens als auch mittelständische Unternehmen und Spin-offs des Fraunhofer ILT. Das Cluster Photonik ist somit der ideale Ausgangspunkt für Forschung und Entwicklung, Aus- und Fortbildung, Innovation und Vernetzung im Bereich der optischen Technologien.

### Ansprechpartner

Dr. Christian Hinke  
Telefon +49 241 8040-418  
[christian.hinke@ilt.rwth-aachen.de](mailto:christian.hinke@ilt.rwth-aachen.de)

Prof. Constantin Häfner  
Telefon +49 241 8906-110  
[constantin.haefner@ilt.rwth-aachen.de](mailto:constantin.haefner@ilt.rwth-aachen.de)



1 3D-Skizze des Cluster Photonik  
(© KPF, New York).

# DAS CLUSTER PHOTONIK



## RESEARCH CENTER DPP

### Research Center Digital Photonic Production

Die inter- und transdisziplinäre Vernetzung verschiedener Forschungsgebiete ist ein wesentlicher Faktor für die Verkürzung von Innovationszyklen. Hier konnte bereits durch das Exzellenzcluster »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer« ein wesentlicher Schritt geleistet werden: Wissenschaftler verschiedener Institute und Lehrstühle am Standort Aachen forschen über einen verhältnismäßig langen Zeitraum gemeinsam an unterschiedlichen Themen für ein gemeinsames Ziel. Die Wissenschaftler und die Infrastruktur sind in den jeweiligen Instituten und Lehrstühlen beheimatet. Der Austausch findet zur Zeit nur in zeitlich begrenzten Intervallen statt. Um jedoch eine noch wirkungsvollere Vernetzung der verschiedenen Forschungsdisziplinen und der beteiligten Wissenschaftler zu ermöglichen, sollten diese an einem gemeinsamen Ort für einen längeren Zeitraum ansässig werden.

Im Jahr 2014 bekamen Institute und Lehrstühle aus sechs Fakultäten der RWTH Aachen University unter Federführung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT den Förderzuschlag für den Bau des »Research Center Digital Photonic Production RCDPP«. Bau, Ersteinrichtung und Großgeräte im Gesamtvolumen von ca. 55 Mio Euro werden von Bund und Land NRW je zur Hälfte finanziert.

Das Research Center DPP bietet Wissenschaftlern auf ca. 4300 qm Nutzfläche – davon 2800 qm Labor-, Reinraum und Hallenflächen – Raum für grundlagenorientierte Forschung im Bereich der Photonik.

Die aktuell beteiligten Institute und Lehrstühle stammen aus sechs Fakultäten der RWTH Aachen University: Maschinenwesen, Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Elektrotechnik und Informationstechnik, Georessourcen und Materialtechnik, Medizin und Wirtschaftswissenschaften. Somit können sich projektbezogene interdisziplinäre Arbeitsgruppen bilden, beispielsweise bei der Erforschung neuer Materialien für den 3D-Druck. Für Materialwissenschaftler ergibt sich die Möglichkeit, gemeinsame Experimente mit Laserexperten durchzuführen und so die Innovationszyklen zu verkürzen.

Weitere Schwerpunkte sind die adaptive Fertigung komplexer optischer Systeme, die direkte photonische Ablation mit hohen Abtragsraten, die Ultrapräzisionsbearbeitung, EUV-Strahlquellen, Hochleistungs-Ultrakurzpuls laser, Medizintechnik, Biotechnologie und Quantentechnologie.

### Ansprechpartner

Roman Flaig M. Sc.  
Telefon +49 241 8906-646  
roman.flraig@ilt.fraunhofer.de

Dr. Christian Hinke  
Telefon +49 241 8040-418  
christian.hinke@ilt.rwth-aachen.de

## INDUSTRY BUILDING DPP

### Industry Building Digital Photonic Production

In unmittelbarer Nähe zum Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT und den assoziierten Lehrstühlen LLT, TOS, DAP und NLD der RWTH Aachen University können sich Unternehmen im Industry Building Digital Photonic Production mit der Absicht einer strategischen Partnerschaft niederlassen, um neue Komponenten, Systeme, Verfahren, Prozessketten oder Geschäftsmodelle im Bereich der optischen Technologien – insbesondere für die Produktionstechnik – zu entwickeln. Die gemeinsame Forschung und Entwicklung ist die Basis für diese langfristigen Kooperationen. Dabei spielt es keine Rolle, ob sich ein Unternehmen mit einer juristischen Person, einem gezielt ausgewählten FuE-Team oder mehreren Doktoranden aus den eigenen Reihen vor Ort niederlässt. Räumlichkeiten wie Labore und Büros können je nach Bedarf über den privaten Betreiber angemietet werden. Der Nutzen dieser Kooperation liegt in der räumlichen Nähe zu den Experten des Fraunhofer ILT und der assoziierten RWTH-Lehrstühle, die ebenfalls eigene Räumlichkeiten vor Ort bezogen haben. In Open Space-Strukturen und gemeinsam belegten Laboren können gemischte Teams aus Industrie und Wissenschaft interagieren und sich gegenseitig inspirieren. Auch die Aus- und Fortbildung sowie der Zugang zu wissenschaftlichen Veranstaltungen vor Ort gestaltet sich durch die »Immatrikulation der Unternehmen« an der RWTH Aachen University sehr effizient.

Im Industry Building DPP sind auf rund 7000 qm Nutzfläche neben einzelnen Unternehmen auch große Initiativen wie der BMBF-geförderte Forschungscampus DPP oder Zentren des Cluster Photonik wie ACAM – Aachen Center for Additive Manufacturing – beheimatet. So können Unternehmen beispielsweise im Forschungscampus DPP in enger Abstimmung mit den beteiligten Akteuren neue Verfahren der Additiven

Fertigung oder der Nanostrukturierung zur Herstellung smarter Produkte sowie Prozesse für 3D-Drucktechnologien optimieren und in Pilotanlagen testen.

### Partner aus der Industrie

- Access e.V.
- AixPath GmbH
- AMPHOS GmbH
- BMW AG
- EdgeWave GmbH
- Exapt Systemtechnik GmbH
- EOS GmbH
- Innolite GmbH
- LightFab GmbH
- ModuleWorks GmbH
- MTU Aero Engines AG
- Pulsar Photonic GmbH
- Siemens AG
- SLM Solutions GmbH
- TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
- TRUMPF Photonic Components

### Ansprechpartner

Dr. Christian Hinke  
Telefon +49 241 8040-418  
christian.hinke@ilt.rwth-aachen.de

- 1 Forschung unter einem Dach: Research Center Digital Photonic Production RCDPP, Entwurf: Carpus+Partner.
- 2 Industry Building DPP im Cluster Photonik auf dem RWTH Aachen Campus.

# FORSCHUNGSCAMPUS DPP

## FORSCHUNGSCAMPUS DIGITAL PHOTONIC PRODUCTION DPP

### Ziele und Aufgaben

Der Forschungscampus »Digital Photonic Production DPP« in Aachen erforscht neue Methoden und grundlegende physikalische Effekte für die Nutzung von Licht als Werkzeug in der Produktion der Zukunft. Mit dem BMBF-geförderten Forschungscampus DPP wird eine neue Form der langfristigen und systematischen Kooperation zwischen RWTH Aachen University, Fraunhofer-Gesellschaft und Industrie etabliert. Ziel dieser Zusammenarbeit ist die komplementäre Bündelung der verschiedenen Ressourcen unter einem Dach zur gemeinsamen anwendungsorientierten Grundlagenforschung. Dies wird durch ein neues Gebäude auf dem RWTH Aachen Campus ermöglicht: dem Industry Building DPP. Hier können die Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft auf ca. 7.000 qm Büro- und Laborfläche gemeinsam unter einem Dach im Rahmen des Forschungscampus DPP forschen.

### Ansprechpartner

Dr. Christian Hinke  
Telefon +49 241 8040-418  
christian.hinke@ilt.rwth-aachen.de

Weitere Informationen unter: [www.forschungscampus-dpp.de](http://www.forschungscampus-dpp.de)

### Roadmapping-Prozess

Die Zusammenarbeit der zwei Fraunhofer-Institute ILT und IPT und der rund 20 Industrieunternehmen wird in gemeinsam abgestimmten Technologie-Roadmaps definiert. Entlang der Technologie-Roadmaps erforschen die Partner in abgestimmter Form grundlegende Aspekte der Lichterzeugung (z. B. Modellierung von Ultrakurzpulsresonatoren), neue Möglichkeiten der Lichtführung und -formung (z. B. Modellierung von Freiformoptiken) und physikalische Modelle zur Wechselwirkung von Licht, Material und Funktionalität (z. B. Modellierung von belastungsoptimierten generativ gefertigten Strukturen).

### Gemeinsame Arbeitsgruppen

Die Zusammenarbeit im Forschungscampus DPP wird in gemeinsamen Arbeitsgruppen mit Mitarbeitern aus der Wissenschaft und der Wirtschaft entlang der Technologie-Roadmaps organisiert. Folgende fünf Arbeitsgruppen wurden etabliert:

- DPP Direct
- DPP Femto
- DPP Nano
- DPP MaGeoOptik
- DPP Digitale Photonische Prozesskette

### DPP Direct

Das additive Fertigungsverfahren Laser Powder Bed Fusion (LPBF) erlaubt die direkte, werkzeuglose Fertigung von Funktionsbauteilen mit serienidentischen Eigenschaften. Neben der hohen Ressourceneffizienz sticht vor allem die werkzeuglose Fertigung komplexer Bauteile hervor. Diese können in kleinen Stückzahlen schnell und vergleichsweise kostengünstig gefertigt werden. Ebenso können funktions- und gewichtsoptimierte Bauteile für neue Produkte mit verbesserten Eigenschaften kostengünstig realisiert werden. Das LPBF-Verfahren wird zunehmend in Branchen wie Dentaltechnik, Werkzeugbau, Energietechnik, Automobilbau und Flugzeugbau eingesetzt.



1



2

### DPP Femto

Mit den noch relativ jungen Ultrakurzpulslasern (UKP-Laser) können neue Funktionalitäten auf Bauteilen verschiedener Werkstoffe erzeugt werden. Allerdings sind die fundamentalen Zusammenhänge der Wechselwirkung zwischen dem UKP-Laserlicht und modernen Funktionsmaterialien der digitalen Welt noch nicht ausreichend erforscht. Ziel der Partner im Verbundvorhaben DPP Femto ist es, diese komplexen Zusammenhänge im Detail zu analysieren und somit der Lasertechnologie neue Horizonte in der Bearbeitung elektronischer Bauteile wie in der Displayfertigung oder der Fertigung moderner LEDs zu eröffnen.

### DPP Nano

Um eine örtlich begrenzte, zeitlich gesteuerte, exakt dosierte Wärmebehandlung durchzuführen, werden neue Laser-Strahlquellen (wie z.B. VCSEL-Laser), optische Systeme und Algorithmen entwickelt und erprobt. Ziel ist die Erzeugung maßgeschneiderter, werkstoffangepasster Lichtverteilungen. Hiermit werden neue Anwendungsgebiete in der Industrie erschlossen (z. B. durch die Funktionalisierung von Oberflächen auf Basis nanopartikulärer Werkstoffe), die Produktivität von Wärmebehandlungsprozessen gesteigert (z. B. Laserhärten) sowie das Anwendungsspektrum erweitert (z. B. Herstellung von komplexen Bauteilen aus Verbundwerkstoffen).

### DPP MaGeoOptik

Ziel des Forschungsvorhabens »MaGeoOptik« ist es, die Leistungsfähigkeit aktueller Strahlführungssysteme durch den Einsatz qualitativ hochwertiger Optiken, neuartiger Materialien und komplexerer Geometrien deutlich zu steigern. Hierzu werden neue Pressprozesse von Quarzgläsern konzipiert und qualifiziert, Software und Prozesse mit innovativen Bearbeitungskinetiken für Diamantoptiken entwickelt

und geeignete metrologische Verfahren der berührungslosen Optikprüfung eingesetzt. Dadurch lassen sich u. a. komplexe Geometrien in Quarzglas, wie z. B. Array-Strukturen mit asphärischen Einzelgeometrien, kostengünstig herstellen.

### DPP Digitale Photonische Prozesskette

Die hohe Energiedichte im Laserfokus lässt sich nutzen, um entweder gezielt Material abzutragen oder aufzuschmelzen. So können kleinste Strukturen in die Oberfläche von Bauteilen für technische Funktionen oder gestalterische Zwecke eingebracht werden. Die Modellierung der filigranen Strukturen ist mit gängigen CAD/CAM-Systemen sehr aufwendig. Daher wird eine digitale Infrastruktur geschaffen, um prozedural beschriebene Strukturen für photonische Fertigungsverfahren nutzen zu können. Die Ergebnisse werden in CAx-Bibliotheken zur Bahnberechnung implementiert und anschließend in konventionelle CAM-Softwareprodukte integriert.

### Start der zweiten Förderphase in 2020

Der Aufbau des Forschungscampus DPP wird seit 2014 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Förderinitiative »Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen« unterstützt. Ende 2019 wurde der Forschungscampus DPP von einer unabhängigen Jury evaluiert und für eine zweite fünfjährige Förderphase empfohlen. Ab Frühjahr 2020 wird der Forschungscampus mit nunmehr 31 Partnern und einem weiterentwickelten, agilen Managementkonzept in die zweite Förderphase starten.

- 1 *Begegnungsfläche im lichtdurchfluteten Atrium des Industry Building DPP.*  
2 *DPP Nano: Selektive Vorwärmung mittels VCSEL beim Laser Powder Bed Fusion (LPBF).*

# AUSGRÜNDUNGEN



## Netzwerke und Infrastruktur

Das Fraunhofer ILT bietet zusammen mit dem durch das BMBF geförderten Forschungscampus Digital Photonic Production DPP und dem RWTH Aachen Campus ein ideales Umfeld zur Gründung eines Unternehmens im Bereich der photonischen Produktion. Das Fraunhofer ILT fungiert dabei als Know-how-Partner, der je nach Kooperationsvertrag mehr oder weniger in die Entwicklung neuer Technologien einbezogen wird. Über entsprechende Lizenzverträge haben die Spin-offs auch Zugriff auf jene Patente, die die Gründer noch selbst am Fraunhofer ILT realisiert haben.

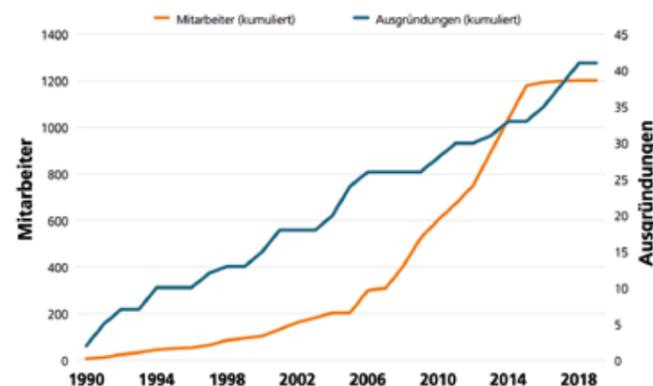
Der Forschungscampus DPP bildet die Plattform zum intensiven Austausch mit Unternehmen, Instituten und Beratern, die sich im Bereich der photonischen Produktion bewegen. Auch Co-Creation Areas und Open Innovation Konzepte werden am Forschungscampus bei Bedarf genutzt. Im Industry Building DPP auf dem RWTH Aachen Campus Gelände können die Ausgründer auf 7000 qm Nutzfläche eigene Büros und Labore anmieten. Hier haben sich bereits rund 30 Unternehmen niedergelassen, darunter auch Forschergruppen großer Konzerne wie Siemens, TRUMPF oder MTU. Das gesamte Umfeld des Campus wirkt als Inkubator für erfolgreiche Unternehmensausgründungen.

## Unterstützende Angebote

Neben den öffentlich geförderten Ausgründungsprogrammen haben die Spin-offs direkten Zugriff auf regionale Beratungsangebote wie von der AGIT oder der IHK Aachen. Diese koordiniert auch das rund 200 Mitglieder umfassende ehrenamtliche AC<sup>2</sup>-Beraternetzwerk.

Neben den regionalen Akteuren unterstützt die Fraunhofer Venture, eine Abteilung der Fraunhofer-Gesellschaft, die Wissenschaftler in der Weiterentwicklung und Umsetzung ihrer Ideen bis hin zur Marktreife. Das vielfältige Serviceangebot reicht von der Beratung und Optimierung eines Businessplans über die Unterstützung von Rechts- und Organisationsgestaltung bis hin zur Vermittlung von Investoren und Vorbereitung einer möglichen Beteiligung der Fraunhofer-Gesellschaft.

## Ausgründungen seit 1990



## SPIN-OFFS DES FRAUNHOFER ILT

### Intensive Ausgründungskultur am Fraunhofer ILT

Das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT pflegt seit den frühen 90er Jahren eine intensive Ausgründungskultur. Dies ist im Wesentlichen durch die Erkenntnis geprägt, dass eine effiziente Vorgehensweise zur Einführung einer neuen Technologie in den Markt die unternehmerische Tätigkeit der maßgeblichen Promotoren der jeweiligen Technologie ist. Gründer sind zutiefst von ihrer Idee überzeugt und lassen sich von Bedenkenträgern oder administrativen Hürden selten bremsen. Gleichzeitig müssen sie so flexibel sein, dass sie ihr Geschäftsmodell dem Bedarf des Marktes ständig anpassen, ohne dabei ihre Kernidee aufzugeben. Innovative Gründer sind somit sowohl Impulsgeber in der Branche für neue technologische Lösungsansätze und Perspektiven als auch klassische Unternehmer, die eine nachhaltige Geschäftsentwicklung im Blick halten müssen.

Diese Wesenszüge teilen sich die Ausgründer mit dem Namenspatron der Fraunhofer-Gesellschaft: Joseph von Fraunhofer, der Anfang des 19. Jahrhunderts als Forscher, Erfinder und Unternehmer hervortrat. Sein Aktionsspektrum reichte von der Entdeckung der später nach ihm benannten Fraunhofer-Linien im Sonnenspektrum über die Entwicklung neuer Bearbeitungsverfahren für die Linsenfertigung bis hin zur Leitung einer Glashütte. Insofern setzt das Fraunhofer ILT diese unternehmerische Tradition durch die Unterstützung ausgründungswilliger Mitarbeiter fort. Und das seit Bestehen des Instituts.

## Spin-offs generieren Mehrwert für die Laserbranche

Rückblickend entstanden in den letzten 25 Jahren ein bis zwei Unternehmen pro Jahr. Damit liegt die Ausgründungsfrequenz des Instituts über dem Durchschnitt der Fraunhofer-Gesellschaft. Rund 40 sogenannte Spin-offs agieren in der Lasertechnik und erzeugen nicht nur neue Umsätze sondern erweitern auch das Marktpotenzial der Branche. Sie tragen unmittelbar zum Wirtschaftswachstum bei.

Neben diesem finanziellen Aspekt sind die ausgegründeten Unternehmen attraktive Arbeitgeber, da sie sich in einer Branche bewegen, die seit Jahren herausragende Wachstumsraten aufweist. Selbstverständlich sorgen die Spin-offs auch für Mehrwerte bei großen etablierten Unternehmen, die bei Bedarf auf die neuen angebotenen Technologien zurückgreifen. Ob es sich um neue Reinigungsverfahren, maßgeschneiderte additiv gefertigte Implantate, neue Hochleistungsdiodenlaser oder leistungsstarke Ultrakurzpuls laser handelt, die rund 40 Ausgründungen des Fraunhofer ILT decken ein weites Spektrum ab.

# STANDORTINITIATIVEN



## ACAM

### ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing

Die Fraunhofer-Institute für Lasertechnik ILT und für Produktionstechnologie IPT haben im Jahr 2015 gemeinsam mit Partnern aus der Wissenschaft das ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing gegründet. Ziel des ACAM ist die Unterstützung produzierender Unternehmen bei der Umsetzung additiver Fertigungsverfahren in ihren Produktionsprozessen. Das Center wird von Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum (Fraunhofer ILT) und Dr. Kristian Arntz, (Fraunhofer IPT) geleitet.

Das ACAM bündelt die Kompetenzen unterschiedlicher Forschungsinstitute in ihren Dienstleistungen auf dem RWTH Aachen Campus Melaten. ACAM führt eine Expertencommunity rund um das Thema Additive Manufacturing zusammen und entwickelt das Know-how in diesem Bereich systematisch weiter. Die bestehende Expertise wird den Anwendern direkt zugänglich gemacht.



ACAM Community-Treffen am 20. Februar 2019 bei Oerlikon AM in Feldkirchen, © Oerlikon AM.

In Sachen Ausbildung bietet das ACAM maßgeschneiderte Seminare an. Interessierte Unternehmen können sich kostenpflichtig an der ACAM Community beteiligen. Die Partnerfirmen können sich bei Bedarf auch direkt auf dem Campus mit eigenen Ressourcen ansiedeln. Die Mitarbeiter dieser Firmen können auch an Aus- und Weiterbildungsangeboten der RWTH Aachen University teilnehmen und sind in das universitäre Umfeld eingebunden.

### Strategische Partner von ACAM

- Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
- Access Technology GmbH
- KEX Knowledge Exchange AG
- Institut für werkzeuglose Fertigung IwF, An-Institut der FH Aachen

### RWTH Aachen University

- Lehrstuhl für Lasertechnik LLT
- Lehrstuhl für Digital Additive Production DAP
- Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components PEM
- Lehr- und Forschungsgebiet Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD
- Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus IKT
- Werkzeugmaschinenlabor WZL
- Institut für Kraftfahrzeuge IKA
- Institut für Kunststoffverarbeitung IKV
- Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau IWM

### Ansprechpartner

Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum  
Telefon +49 241 8906-398  
johannes.henrich.schleifenbaum@ilt.fraunhofer.de

Weitere Informationen unter: [www.acam.rwth-campus.com](http://www.acam.rwth-campus.com)

## AACHENER ZENTRUM FÜR 3D-DRUCK

Das Aachener Zentrum für 3D-Druck ist eine gemeinsame Forschungsgruppe des Fraunhofer ILT und der FH Aachen mit dem Ziel, kleinen und mittelständischen Unternehmen den Zugang zur gesamten Prozesskette im Bereich Additive Manufacturing (AM) zu eröffnen. So sollen die ökonomischen und technologischen Chancen genutzt werden, die diese innovative Technologie bietet.

Kleine und mittlere Unternehmen durchleuchten ihre Anwendungen und sehen zunehmend die ökonomischen und technologischen Chancen des AM in ihren Produktionsumgebungen. Oftmals scheuen sie allerdings die Investitionsrisiken. Vor allem aber verfügen sie nur selten über qualifizierte 3D-Druckspezialisten und ausgebildete Facharbeiter. Hier setzt das eng kooperierende Expertenteam des Fraunhofer ILT und der FH Aachen an.

### Ansprechpartner

Prof. Sebastian Bremen (Fraunhofer ILT/FH Aachen)  
Telefon +49 241 8906-537  
sebastian.bremen@ilt.fraunhofer.de

Prof. Andreas Gebhardt (FH Aachen bis 31.8.2019)  
Telefon +49 241 6009 52500  
gebhardt@fh-aachen.de

Weitere Informationen unter: [www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de) und [www.fh-aachen.de](http://www.fh-aachen.de)

## ICTM AACHEN

### ICTM – International Center for Turbomachinery Manufacturing

Die Fraunhofer-Institute für Produktionstechnologie IPT und Lasertechnik ILT sowie das Werkzeugmaschinenlabor WZL und der Lehrstuhl für Digital Additive Production DAP der RWTH Aachen University starteten am 28. Oktober 2015 in Aachen zusammen mit 19 renommierten Industriepartnern das »International Center for Turbomachinery Manufacturing – ICTM«.

Zu den zur Zeit 32 Industriepartnern des Netzwerks zählen große und mittelständische Unternehmen aus den Bereichen Turbomaschinenbau, Maschinenbau, Automatisierungs- und Zerspanungstechnik sowie Additive Fertigung. Im Mittelpunkt des Centers stehen Forschung und Entwicklung rund um die Fertigung und Reparatur von Turbomaschinenkomponenten, welche durch die Partner in allen Bereichen abgedeckt werden. Das Forschungszentrum wurde ohne jegliche staatliche Förderung gegründet und gehört damit zu den wenigen selbstständigen Netzwerken, die aus den Fraunhofer-Innovationsclustern »TurPro« und »ADAM« hervorgingen. Der zehnköpfige Lenkungskreis besteht aus Vertretern der beteiligten Industrieunternehmen und Forschungsinstitute.

### Ansprechpartner im Fraunhofer ILT

Dr. Andres Gasser  
Telefon +49 241 8906-209  
andres.gasser@ilt.fraunhofer.de

Weitere Informationen unter: [www.ictm-aachen.com](http://www.ictm-aachen.com)

1 Additiv gefertigte Buchstaben mit integrierten Leichtbaustrukturen.

# KOOPERATIONEN UND VERBÄNDE

Um seinen Kunden Lösungen aus einer Hand anbieten zu können, pflegt das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT Kooperationen mit in- und ausländischen Forschungszentren, Universitäten, Clustern und Unternehmen. Auch zu Verbänden, IHKs, Prüfanstalten und Ministerien hält das Fraunhofer ILT enge Kontakte.

## REGIONALE NETZWERKE

Auf lokaler Ebene kooperiert das Fraunhofer ILT mit der RWTH Aachen University, der Fachhochschule Aachen und dem Forschungszentrum Jülich in vielen grundlegenden Fragestellungen. Im Aachener Zentrum für 3D-Druck – einer Kooperation der FH Aachen mit dem Fraunhofer ILT – erhalten insbesondere mittelständische Unternehmen Unterstützung in allen Fragen der Additiven Fertigung. Auch im Bereich der Life Sciences ist das Fraunhofer ILT über den MedLife e.V. regional gut vernetzt. Der Fachverband IVAM e.V. ermöglicht dem ILT den Zugang zu zahlreichen Experten der Mikrotechnik. Im Landescluster NMWP.NRW engagiert sich das Fraunhofer ILT in den Bereichen Nanotechnologie, Photonik, Mikrosystemtechnik und Quantentechnologie.

## NATIONALE KOOPERATIONEN

Gemeinsam mit rund 70 weiteren Forschungseinrichtungen ist das Fraunhofer ILT in die Fraunhofer-Gesellschaft, die als größte Organisation für anwendungsorientierte Forschung in Europa wirkt, eingebettet. Unsere Kunden profitieren von der gebündelten Kompetenz der kooperierenden Institute.

Die Vernetzung von Laseranwendern, -herstellern und -forschern auf nationaler Ebene gelingt unter anderem im Arbeitskreis Lasertechnik e.V., in der Wissenschaftlichen Gesellschaft Lasertechnik e.V. und in verschiedenen Industrieverbänden wie DVS, SPECTARIS oder VDMA. Das Fraunhofer ILT engagiert sich aktiv in nationalen Initiativen wie dem BMBF-Forschungscampus oder dem Programm »go-cluster« des BMWi. In allen Gremien setzen ILT-Mitarbeiter Impulse, um sowohl das Fachgebiet der Lasertechnik als auch Formen der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie zum Wohle der Gesellschaft weiterzuentwickeln.

## INTERNATIONAL VERNETZT

Mit ausländischen Firmen und Niederlassungen deutscher Firmen im Ausland führt das Fraunhofer ILT sowohl bilaterale Projekte als auch Verbundprojekte durch. Darüber hinaus unterhält die Fraunhofer-Gesellschaft Verbindungsbüros in zahlreichen Ländern. Um auch internationale Entwicklungen von Fraunhofer ILT-relevanten Fachgebieten zeitnah begleiten zu können, engagieren sich Mitarbeiter gezielt in ausgewählten Verbänden und Netzwerken wie dem European Photonic Industry Consortium EPIC und der Technologieplattform Photonics21 auf europäischer Ebene oder dem Laser Institute of America LIA auf transatlantischer Ebene. Zahlreiche wissenschaftliche Vorträge auf internationalen Tagungen runden das Bild ab.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Axel Bauer  
Telefon +49 241 8906-194  
axel.bauer@ilt.fraunhofer.de

# ARBEITSKREIS LASERTECHNIK E.V.



Der Arbeitskreis Lasertechnik e.V. – kurz AKL e.V. – wurde 1990 gegründet, um die faszinierenden Möglichkeiten, die das Werkzeug Laser im Hinblick auf Präzision, Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit eröffnet, durch Intensivierung des Informations- und Ausbildungsstands für den industriellen Einsatz nutzbar zu machen. Heute sind viele der Anwendungsmöglichkeiten bekannt. Dennoch werden ständig neue Laserstrahlquellen und Laserverfahren entwickelt, die zu innovativen Perspektiven in der industriellen Fertigung führen. In dieser sich schnell wandelnden Disziplin unterstützt ein Netzwerk von Laserexperten die laufenden Innovationsprozesse. Der AKL e.V. dient dabei ausschließlich und unmittelbar der Förderung wissenschaftlicher Ziele.

### Aufgaben des AKL e.V.

- Förderung der wissenschaftlichen Arbeit auf dem Gebiet der Lasertechnik durch Anregung und Unterstützung von Forschungsprojekten, die an Forschungsinstitutionen durchgeführt werden sowie die Kooperation mit anderen Forschungsvereinigungen und wissenschaftlichen Institutionen
- Förderung der Verbreitung der Lasertechnik in der Wirtschaft sowie die Unterstützung des wissenschaftlichen Gedankenaustauschs mit Personen, Unternehmen, Gesellschaften, Vereinigungen, Behörden und Ämtern jeder Art, insbesondere durch finanzielle Unterstützung und Organisation von Forschungsvorhaben, Vorträgen, Konferenzen, Besprechungen und Tagungen. In diesem Zusammenhang organisiert der AKL e.V. unter anderem auch regelmäßig die Seminare und Veranstaltungen »Aix-Laser-People«.

Dem AKL e.V. gehören rund 180 Mitglieder an. Hierbei bildet die persönliche Kommunikation zwischen den Mitgliedern das Rückgrat des Vereins. Im Vorstand des AKL e.V. sind weiterhin Dr. Hartmut Frerichs (Geschäftsführer), der Vorsitzende Ulrich Berners und Dr. Bernd Schmidt (Schatzmeister) vertreten. Seit der Verabschiedung von Prof. Reinhart Poprawe hält nun der neue Institutsleiter des Fraunhofer ILT Prof. Constantin Häfner das Amt des stellvertretenden Vorsitzenden inne.

### Innovation Award Laser Technology

Alle 2 Jahre verleihen die Vereine Arbeitskreis Lasertechnik e.V. und das European Laser Institute ELI e.V. den mit 10.000 € dotierten Forschungspreis Innovation Award Laser Technology. Dieser europäische Preis der angewandten Wissenschaft richtet sich sowohl an Einzelpersonen als auch an Projektgruppen, deren Fähigkeiten und Engagement zu einer herausragenden Innovation auf dem Gebiet der Lasertechnik geführt haben. Potenzielle Teilnehmer sind außerdem Personen, die in der Industrie, an Universitäten oder an unabhängigen Forschungszentren in Europa tätig sind und eine innovative Idee in Bezug auf die Lasertechnik erfolgreich konzipiert und umgesetzt haben. Im Kern sollen sich die Arbeiten mit der Nutzung und Erzeugung von Laserlicht zur Materialbearbeitung befassen und zu einem wirtschaftlichen Nutzen führen.

### Ansprechpartner

Dr. Hartmut Frerichs  
Telefon +49 241 8906-420  
hartmut.frerichs@akl-ev.de

Weitere Informationen unter: [www.akl-ev.de](http://www.akl-ev.de)

# VERANSTALTUNGEN UND PUBLIKATIONEN



»Alles, im Kleinen und Großen,  
beruht auf Weitersagen.«

Christian Morgenstern

## PATENTE

### PATENTERTEILUNGEN DEUTSCHLAND

DE 102015201140.2 Bearbeitungskopf für die Materialbearbeitung

DE 102013017288.8 Verfahren und Vorrichtung zum Justieren eines Paars mittels elektromagnetischer Strahlung messender Messköpfe

DE 102014200633.3 Bearbeitungsvorrichtung und -verfahren zur Laserbearbeitung einer Oberfläche

DE 102013005137.1 Verfahren zum Abtragen von sprödhartem Material mittels Laserstrahlung

DE 102007024700.3 Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserstrahlung sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

DE 102017210241 Optische Anordnung zur Umformung des Intensitätsprofils eines optischen Strahls

DE 102015014060.4 Verfahren zum Fügen von zwei Bauteilen im Bereich einer Fügezone mittels mindestens einem Laserstrahl sowie Verfahren zum Erzeugen einer durchgehenden Fügenaht

### PATENTERTEILUNGEN EUROPA

EP 15700558.8 Bearbeitungsvorrichtung und -verfahren zur Laserbearbeitung einer Oberfläche

EP 14728436.8 Verfahren zum Abtragen von sprödhartem Material mittels Laserstrahlung

EP 08758722.6 Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserstrahlung sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

EP 15722192.0 Verfahren und Anordnung zur spektralen Verbreiterung von Laserpulsen für die nichtlineare Pulscompression

47

Bachelorarbeiten  
in 2019

PATENTE

14 Erteilungen,  
24 Anmeldungen  
in 2019

113

wissenschaftliche  
Vorträge  
in 2019

61

Masterarbeiten  
in 2019

107 Veröffentlichungen

# PATENTE

## PATENTERTEILUNGEN CHINA

**CN 201480030334.1** Verfahren zum Abtragen von sprödhartem Material mittels Laserstrahlung

## PATENTERTEILUNGEN JAPAN

**JP 6505022** Device and Method for Generative Component Production (Verfahren und Vorrichtung zur generativen Bauteilfertigung)

**2017-512418** Verfahren und Anordnung zur spektralen Verbreiterung von Laserpulsen für die nichtlineare Pulskompression

## PATENTANMELDUNGEN DEUTSCHLAND

**102019127676.4** Schweißvorrichtung zum Verschweißen von Elektroden zweier benachbarter Batteriezellen einer Batterie, Batterie und Verfahren zur Herstellung einer Batterie

**102019130378.8** Verfahren zum Fügen einer elektrischen Zelle und elektrischer Speicher

**102019210295.6** Verfahren zum Beschichten einer Oberfläche eines Substrates durch Laserauftragschweißen

**102019004260.3** Verfahren zum Bohren oder Schneiden durch Abtragen von schmelzfähigem oder verdampfungsfähigem Material eines Werkstücks

**102019125951.7** Verfahren und Vorrichtung zur Bahngenaugkeitsbestimmung einer stationären Bearbeitungsmaschine

**102019212818.1** Abtastmodul zur zweidimensionalen Abtastung einer Zielebene mit einem oder mehreren Laserstrahlen

**102019207421.9** Verfahren und Vorrichtung zum Glätten einer Oberfläche eines Bauteils durch Bearbeitung mit energetischer Strahlung

**102019124 856.6** Werkstoffzuführungsvorrichtung

**102019209133.4** Verfahren zum Testen neuer Werkstoffzusammensetzungen für das pulverbettbasierte Laserschmelzen sowie dafür ausgebildete Vorrichtung

**102019115531.2** Koaxiales Pulverdüsenspitzenmodul zur Oberflächenbearbeitung eines Werkstücks

**102019116214.9** Vorrichtung und Verfahren zur Referenzierung und Kalibrierung einer Laseranlage

**102019206200.8** Verfahren zur Herstellung eines Metall-Kunststoff-Verbundes sowie metallbeschichtetes Kunststoffbauteil

**102019205222.3** Verfahren zur Terminierung optischer Strahlung sowie dafür ausgebildete optische Strahlfalle

**102019201573.5** Verfahren und Vorrichtung zur interferometrischen Abstandsmessung, insbesondere bei der Lasermaterialbearbeitung

**102019205289.4** Anlage zur Herstellung elektrischer Kontaktelemente mit selektiv veredelten elektrischen Kontaktflächen

**102019204032.2** Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung von räumlich modulierbaren Leistungsdichteverteilungen u. a. für parallelisierte Lasermaterialbearbeitungsprozesse

**102019202222.7** Ablenkspiegel aus Diamant sowie Verfahren zur Herstellung

## PATENTANMELDUNGEN EUROPA

**PCT/EP2019/078054** Radar- und Lichtausstrahlungsanordnung für Fahrzeuge zum Ausstrahlen von Licht und Radarstrahlung sowie Verfahren und Verwendung

**PCT/EP2019/081335** Vorrichtung und Verfahren zur Elementanalyse von Materialien

**PCT/EP2019/075528** Verfahren zum Glätten der Oberfläche eines Kunststoffbauteils

**PCT/EP2019/067130** Verfahren, Vorrichtung und System zur Erzeugung einer hoch-dynamischen Leistungsdichteverteilung eines Laserstrahls

**PCT/EP2019/064334** Vorrichtung zur Laserbearbeitung schwer zugänglicher Werkstücke

**PCT/EP2019/000186** Verfahren und Vorrichtung zum Bohren von Bauteilen

## PATENTANMELDUNGEN TAIWAN

**108137484** Radar and Light Emitting Arrangement for Vehicles for Emitting Light and Radar Radiation as well as Method and Use

## DISSERTATIONEN

### DISSERTATIONEN

- 15.2.2019 – Tobias Bonhoff (Dr. rer. nat.)**  
Multiphysikalische Simulation und Kompensation thermo-optischer Effekte in Optiken für Laseranwendungen
- 18.2.2019 – Christian Kalupka (Dr. rer. nat.)**  
Energiedeposition von ultrakurz gepulster Laserstrahlung in Gläsern
- 5.4.2019 – Jeroen Risse (Dr.-Ing.)**  
Additive manufacturing of nickel-base superalloy IN738LC by Laser Powder Bed Fusion
- 15.4.2019 – Carlo Holly (Dr. rer. nat.)**  
Modeling of the lateral emission characteristics of high-power edge-emitting semiconductor lasers
- 30.4.2019 – Alp Özmert (Dr.-Ing.)**  
Evaluation of multidimensional data from optoelectronic sensors for the determination of the penetration depth in laser welding
- 28.5.2019 – Sabrina Vogt (Dr.-Ing.)**  
Lokale Laserentfestigung von Halbzeugen und Bauteilen aus hochfesten Stählen
- 10.7.2019 – Sebastian Nyga (Dr. rer. nat.)**  
Kontradirektionale Modenkopplung in pumpüberhöhten optisch-parametrischen Ringoszillatoren

Eine Liste der wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Vorträge sowie Bachelor- und Masterarbeiten finden Sie online in unserer Mediathek unter:  
[www.ilt.fraunhofer.de/de/mediathek.html](http://www.ilt.fraunhofer.de/de/mediathek.html)

## VERANSTALTUNGEN

### LASER WORLD OF PHOTONICS 2019

#### Quantentechnologien, metallischer 3D-Druck oder Elektromobilität – neueste Entwicklungen aus Aachen

Vom 24. bis 27. Juni 2019 traf sich die Lasercommunity in München. Mit rund 34 000 Besuchern und 1325 Ausstellern hat die LASER World of PHOTONICS 2019 dabei gleich zwei neue Rekorde aufgestellt. Das Fraunhofer ILT war auch dieses Mal wieder mit über 50 Exponaten aus den verschiedenen Bereichen der angewandten Lasertechnik und Strahlquellenentwicklung vertreten.

#### Ultrakurzpuls laser gehen mit kW-Systemen in die Offensive

Im Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources CAPS arbeiten unter der Führung des Fraunhofer ILT und IOF Experten 11 weiterer Fraunhofer-Institute an der Weiterentwicklung der Laser- und Prozesstechnik für die nächste Generation von Ultrakurzpuls laser-Systemen (siehe auch Seite 122–123). An einem Flugzeugflügel des Industriepartners Sonaca wurde am Messestand gezeigt, wie hohe Präzision und hohe Produktivität mit UKP-Lasern in der großflächigen Bearbeitung funktionieren: Mit dem UKP-Laser lassen sich großflächig winzige Bohrungen in Flugzeugflügel einbringen. Das reduziert den Luftwiderstand und ermöglicht bis zu 15 Prozent Treibstoffersparnis. Als Eyecatcher war zudem eine Multipasszelle zu sehen, mit deren Hilfe die Pulsdauern von Hochleistungs-UKP-Lasern effizient verkürzt werden können.



Der Fraunhofer-Gemeinschaftsstand auf der LASER World of PHOTONICS 2019: 70 Jahre Fraunhofer – 70 Jahre Zukunft.

#### Lasertechnologie für die E-Mobility

»Keine Elektromobilität ohne Laser« lautete ein herausragendes Motto der diesjährigen LASER-Messe: Wie es in die Praxis umgesetzt wurde, demonstriert der Elektro-Rennwagen »eace05« des Ecurie Aix – Formula Student Teams der RWTH Aachen University in München. Für die mit knapp 180 Kilogramm Gesamtgewicht ultraleichte Karosserie des Rennwagens wurden CFK-Teile mit dem Laser geschnitten sowie die Batteriezellen laserverschweißt. Zudem enthalten Motor und Räder mit metallischem 3D-Druck hergestellte Teile.

Das Fraunhofer ILT demonstrierte auf dem Messestand auch das Schweißen von Batteriezellen mit Roboterunterstützung. Mit dem Prozess des Laser-Based Tape-Automated Bonding (LaserTAB) zeigten sie, wie Roboter, Laserscanner und Prozessüberwachung zusammen funktionieren.

#### Laserstrukturieren mit dreifacher Produktivität

Kunststoffverkleidungen im Pkw werden mit verschiedenen Verfahren geprägt. Die Herstellung der Werkzeuge dafür dauert allerdings extrem lange. Mit einer neuen Lasermaschine geht das dreimal so schnell und dabei werden noch feinere Strukturen möglich. Auf der LASER World of PHOTONICS 2019 wurden die im BMBF-Forschungsvorhaben eVerest entwickelten Ergebnisse präsentiert: die von Grund auf verbesserte Technologie des Laserstrukturierens mit Auflösungen im Mikrometerbereich.

Für die Optimierung der Prozesse wurden alle Komponenten auf ihre Effizienz untersucht. Laser mit ultrakurzen Pulsen (UKP) sind bekannt für ihre Präzision bis in den Nanometerbereich. Deshalb wurde innerhalb von eVerest zusätzlich zum



Völlig neue Möglichkeiten mit Lasertechnik für Leichtbau und E-Mobility: der Elektro-Rennwagen »eace05«.

normalen Nanosekunden (ns)-Laser auch eine UKP-Quelle integriert. Das Problem der UKP-Laser war bislang ihre mangelnde Produktivität. Mit einem besonders leistungsstarken UKP-Laser der Amphos GmbH, der eine Kopplung über eine aktiv gekühlte Spezialfaser enthält, gelang es den Prozessingenieuren am Fraunhofer ILT, den gleichen Abtrag pro Watt zu erreichen wie mit dem ns-Laser. Die Oberflächenrauheit kann schließlich mit dem UKP-Laser auf unter 0,5 µm reduziert werden.

#### Cleverer Kombikopf für drei verschiedene Laserprozesse

Leichtbau und E-Mobility sind heute schon fast synonym mit den Forderungen nach mehr Flexibilität und Effizienz. Im NRW-Leitmarkt-Projekt MultiPROmobil wurde analysiert, wie sich klassische und zukünftige Bearbeitungsprozesse mit nur einem Laserkopf durchführen lassen. So entstand ein Kombikopf, der mit dem Laser nicht nur schneiden und schweißen kann, sondern auch das Generieren von additiven Schichten ermöglicht.

Aktuell arbeiten die Projektpartner daran, den Kombikopf so zu optimieren, dass er alle drei Prozesse in einer Fertigungsanlage im »fliegenden Wechsel« ausführen kann – ohne Optik- und Düsenwechsel. Im Projekt wurde auch eine Simulationssoftware entwickelt, die Maschinen, Prozesse und Bauteile anhand von Digital Twins abbildet und so die Kontrolle und Optimierung der Abläufe ermöglicht.

#### futureAM – Faktor 10 schneller bei additiven Verfahren

Die Additive Fertigung von Metallbauteilen bietet ein großes Potenzial für unterschiedlichste Anwendungsbereiche. Einer der hemmenden Faktoren für den industriellen Einsatz war jedoch bisher die geringe Produktivität. Deshalb haben sich 2017 sechs Fraunhofer-Institute im Fraunhofer-Leitprojekt »futureAM – Next Generation Additive Manufacturing« unter der Leitung des Fraunhofer ILT zusammengeschlossen mit dem Ziel, den Prozess des Additive Manufacturing von Metallbauteilen (Metall AM) um den Faktor 10 zu beschleunigen. Im Mittelpunkt der ganzheitlichen Betrachtung steht die komplette Prozesskette von der Auftragsabwicklung über Design und Simulation bis hin zur Fertigung in den Maschinen, die anhand von verschiedenen Demonstratoren dargestellt wurde.

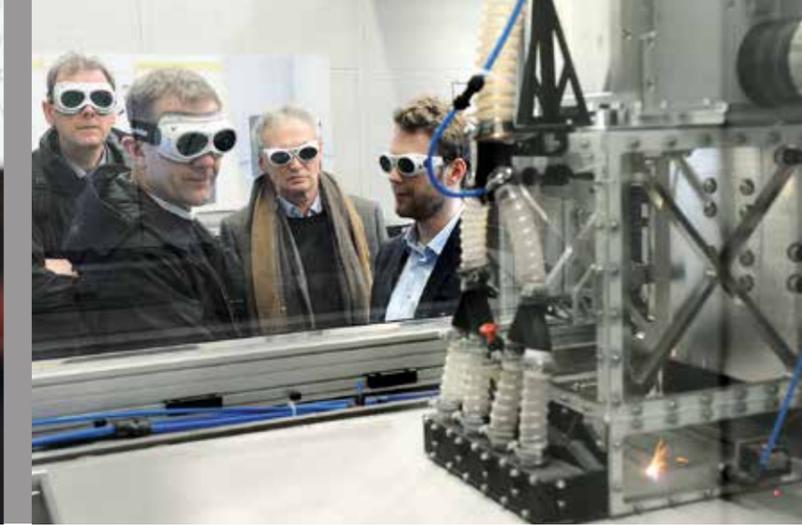
#### Bausteine für die Quantentechnologie

Ein Schlüssel für die Umsetzung in marktreife Anwendungen des Quantenimaging, der Quantenkommunikation und des Quantencomputing ist die Verfügbarkeit hochintegrierter photonischer Komponenten. Am Fraunhofer ILT werden dafür Prozesstechniken entwickelt, um Wellenleiter, Koppler und Filter in Gläsern und Kristallen herzustellen. Als Basis dienen Hochleistungs-UKP-Lasersysteme.

Derzeit arbeitet das Fraunhofer ILT unter anderem an Verfahren zum Quantenimaging, aber auch an der optischen Schnittstelle für das Quanteninternet der Zukunft.



Dr. Oliver Nottrodt (Fraunhofer ILT) auf dem Lasersymposium Elektromobilität LSE 2019.



Laborführung im Rahmen der 5. ICTM Conference am Fraunhofer ILT.

## VERANSTALTUNGEN

#### 6./7.2.2019, Aachen

##### 5th Conference of the ICTM International Center for Turbomachinery Manufacturing

Ziel der »5th Conference of the ICTM International Center for Turbomachinery Manufacturing Aachen« war es, technologische Innovationen zu beschleunigen und auf industrielle Anwendungen zu übertragen. Die Konferenz zeigte die exzellente Forschung und Entwicklung für den Turbomaschinenbau und vernetzte Vertreter aus Industrie und Wissenschaft. Themen waren unter anderem die hochproduktive und umweltfreundliche Fertigung von Turbomaschinen.

- Rund 200 Teilnehmer aus 18 Ländern
- Organisation: Fraunhofer ILT und Fraunhofer IPT

#### 20.2.2019, Aachen

##### Lasersymposium Elektromobilität LSE 2019

Die zunehmende Elektrifizierung von Automobilen bewirkt einen erhöhten Bedarf an leistungsfähigen Energiespeichersystemen. Um den ständig wachsenden Herausforderungen gerecht zu werden, sind neue Fertigungsmethoden für die Produktion von Batteriemodulen und -packs notwendig. Schon heute sind hocheffiziente Laserverfahren für die gesamte Prozesskette essentiell und der Anteil der Lasertechnik in der Fertigung wird noch zunehmen. Diese Themen wurden durch 10 Referenten aus Industrie und Forschung beim ersten Lasersymposium Elektromobilität LSE 2019 beleuchtet.

- Organisation: Fraunhofer ILT

#### 10./11.4.2019, Aachen

##### 5. UKP-Workshop: Ultrafast Laser Technology

Der 5. UKP-Workshop präsentierte neben den Grundlagen der Ultrakurzpulslasertechnologie eine Übersicht zu aktuellen Entwicklungen im Bereich der Strahlquellen sowie auch der notwendigen Systemtechnik. Im Fokus lagen geeignete Strahlformungslösungen für individuelle Prozesse. Vorgestellt wurden neueste laserbasierte Anwendungen und Verarbeitungsmethoden, die die Grenzen der bisherigen Technologien in Bezug auf Verarbeitungsgeschwindigkeit, Qualität und Materialbandbreite erweitern.

- Über 20 Vorträgen zum Thema Ultrakurzpulslaser – Anwendungen und Bearbeitungsverfahren
- Über 170 Teilnehmer aus 14 Ländern
- Organisation: Fraunhofer ILT, Konferenzort: Aachener Tivoli

#### 6./7.11.2019, Aachen

##### AI for Laser Technology Conference

Die erste »AI for Laser Technology Conference« bot industriellen Anwendern praxisnahes Grundwissen und eine Orientierung zur Anwendung von Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI) in der Lasertechnik. Die rund 70 Teilnehmer erfuhren wie man mit Hilfe von KI aus Prozessdaten eindeutige Aussagen trifft und so Qualität, Effizienz und Flexibilität in der Lasertechnik steigern kann.

- Organisation: Fraunhofer ILT



Networking beim Aix-Laser-People-Treffen im Seehaus in München.



Gut besucht: Fraunhofer-Gemeinschaftsstand auf der K 2019 in Düsseldorf.

## AIX-LASER-PEOPLE

**26.6.2019, München**

**58. Aix-Laser-People-Treffen anlässlich der LASER World of PHOTONICS**

Bereits zum 10. Mal fand das Ehemaligentreffen während der LASER World of PHOTONICS in München statt. Rund 170 Teilnehmer, davon 65 AKL e.V.-Mitglieder und Alumni des Fraunhofer ILT sowie der kooperierenden Lehrstühle der RWTH Aachen University, kamen im Seehaus des Englischen Gartens zusammen. Der Geschäftsführer Dr. Hartmut Frerichs nutzte die Gelegenheit, dem ehemaligen Institutsleiter des Fraunhofer ILT Prof. Poprawe im Namen des gesamten AKL e.V. zu danken und als langjähriges Vorstandsmitglied zu verabschieden. Beim diesjährigen Business Speed Dating tauschten sich jeweils 20 Laserexperten aus verschiedenen Branchen und Wissenschaftler aus dem Fraunhofer ILT-Umfeld in den Gruppen »Industrie trifft Industrie« und »Industrie trifft Wissenschaft« aus. Das abschließende Get-Together in lockerer Atmosphäre bot die Gelegenheit für weiteres Networking.



Verabschiedung von Prof. Reinhart Poprawe (Mitte) durch Ulrich Berners (li.) und Dr. Hartmut Frerichs (re.) in München.

**19.12. 2019, Geilenkirchen**

**59. Aix-Laser-People-Treffen im Laser Bearbeitungs- und Beratungszentrum NRW GmbH (LBBZ)**

Zum Ende des Jahres lud der Arbeitskreis Lasertechnik e.V. zum Ehemaligentreffen in das Laser Bearbeitungs- und Beratungszentrum NRW in Geilenkirchen ein. Das LBBZ ist seit 1991 als Unternehmen im Bereich der industriellen Anwendung der Lasertechnik und anderer moderner Produktionsverfahren tätig. Das Team des LBBZ konnte nicht nur über die positive Unternehmensentwicklung der vergangenen Jahre referieren, sondern auch das eigene Produktionssystem für die Fertigung von Chassis für die Elektromobilität vorstellen. Der Begrüßung durch Dr. Hartmut Frerichs und Geschäftsführer Ulrich Berners folgten drei spannende Übersichtsvorträge zum Thema Elektromobilität und die damit verbundenen Herausforderungen. Im Anschluss folgte die Besichtigung der Produktionsprozesse vor Ort und eine abschließende Diskussion.

Am Abend fand die Veranstaltung ihre Fortsetzung bei einem geselligen Ausklang im Fraunhofer ILT, wo neben dem fachlichen Austausch vor allem auch das Networking im Vordergrund stand.

### Ansprechpartner

Dr. Hartmut Frerichs  
Telefon +49 241 8906-420  
hartmut.frerichs@akl-ev.de

Weitere Informationen unter: [www.akl-ev.de](http://www.akl-ev.de)

## KOLLOQUIUM LASERTECHNIK AN DER RWTH AACHEN

**10.1.2019 – Lehrstuhl für Lasertechnik LLT**

Prof. Thomas Dekorsy, DLR / Fakultät für Luft- und Raumfahrt und Geodäsie der Universität Stuttgart  
»Laserbasierte Detektion und Reduktion von Weltraumschrott«

**27.2.2019 – Lehrstuhl für Lasertechnik LLT**

Prof. Christoph Becher, Universität Saarland  
»Quantum frequency conversion of single photons as tool for quantum networks«

**25.4.2019 – Lehrstuhl für Lasertechnik LLT**

Dr. Thomas Metzger, TRUMPF Scientific Lasers GmbH & Co. KG  
»Ultrafast thin-disk amplifiers«

**22.10.2019 – Lehrstuhl für Lasertechnik LLT**

David Sebastian Voigt, M. Sc., Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
»Molecular emissions and spatial characterization of the LIBS plasma in Martian conditions«

**14.11.2019 – Lehrstuhl für Lasertechnik LLT**

Prof. Clara Saraceno, Ruhr Universität Bochum  
»High-power ultrafast thin-disk oscillators for Terahertz science«

## MESSEN

**5.–7.2.2019, San Francisco, USA**

**SPIE Photonics West 2019**

**Internationale Fachmesse für Optik und Photonik**

Vertreten auf dem Gemeinschaftsstand der Bundesrepublik Deutschland zeigte das Fraunhofer ILT Exponate zu:

- Diamond Optics for High-Power Laser Applications
- Spaceborne Optical Parametric Oscillator
- Highly Stable Fiber Amplifier for Gravitational Measurements

Auf der begleitenden LASE Conference wurden 8 Vorträge von Fraunhofer ILT-Experten gehalten.

**12.–14.3.2019, Paris, Frankreich**

**JEC World 2019**

**The Leading International Composites Show**

Das Fraunhofer ILT präsentierte auf dem Gemeinschaftsstand des Aachener Zentrums für integrativen Leichtbau (AZL) laserbasierte Technologien für die industrielle Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen:

- Multi-Material Dachspiegel Demonstrator (HyBriLight-Projekt)
- Schneiden von GFK-CFK Mischbauteilen
- High-Speed Mikrostrukturierung von Metallen für Kunststoff-Metall Hybridverbindungen

**20.–22.3.2019, Shanghai, China**

**LASER World of PHOTONICS China**

**Internationale Fachmesse für Optik und Photonik**

Das Fraunhofer ILT präsentierte auf der LASER World of PHOTONICS China neue Ideen für die industrielle Laseranwendung.



Fraunhofer-Gemeinschaftsstand auf der Hannover Messe 2019.



Fraunhofer ILT auf der formnext 2019 in Frankfurt.



Fraunhofer ILT mit innovativen Verfahren für das Lasermikroschweißen auf der productronica 2019.

Die Topthemen des Fraunhofer ILT auf der LASER China waren:

- Material Ablation Using Ultrashort Pulsed Laser
- High Precision Laser Drilling and Laser Cutting with Helical Optic
- High Power Multi Beam Processing with Ultrashort Laser Pulses
- Laserfact Combi-Head: Cutting, Cladding, Welding
- Extreme High-Speed Laser Material Deposition EHLA

Außerdem hielten Experten des Fraunhofer ILT Vorträge auf der 14th International Laser Processing and Systems Conference LPC 2019.

**1.–5.4.2019, Hannover**

**Hannover Messe Industrie 2019  
Weltleitmesse der Industrie**

Das Fraunhofer ILT zeigte auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand Exponate zum Thema »Funktionale Schichten für elektronische Anwendungen«. Im Vordergrund standen direkt gedruckte Dehnungsmessensoren und lokal vergoldete Kontakte.

**7.–10.5.2019, Stuttgart  
Control 2019**

**Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung**  
Das Fraunhofer ILT zeigte auf dem Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz VISION ein anlagenintegriertes System zur kamerabasierten Fugenfolge und Prozessüberwachung für das Laserstrahl- bzw. das MSG-Hybridschweißen. Die Kombination aus bildgebender Messtechnik und geeignetem Beleuchtungsverfahren versetzt das System in die Lage, die Fugengeometrie und den Laserfokus mittels texturbasiertem Verfahren in Echtzeit zu ermitteln und den Versatz zwischen Wechselwirkungspunkt und Fugenmitte adaptiv zu minimieren.

**17.–23.6.2019, Paris  
Paris Air Show 2019**

Auf der Paris Air Show zeigte das Fraunhofer ILT auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand das extreme Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt: Ein Zylinder, der durch das EHLA-Verfahren mit einer korrosionsbeständigen Nickel-Legierung (Inconel 625) beschichtet wurde, demonstrierte die Stärken dieser Technologie im Vergleich zu herkömmlichen Beschichtungsprozessen wie dem thermischen Spritzen oder dem galvanischen Auftrag.

**25.–27.6.2019, Erfurt  
Rapid.Tech 2019**

**International Hub für Additive Manufacturing**  
Das Aachener Zentrum für 3D-Druck präsentierte sich auf dem Stand der ACAM GmbH. Das Aachener Zentrum für 3D-Druck ist ein Verbundprojekt zwischen dem Fraunhofer ILT und der FH Aachen mit dem Ziel, kleinen und mittelständischen Unternehmen den Zugang zur ganzheitlichen Prozesskette im Bereich Additive Manufacturing zu erschließen. Des Weiteren war das Fraunhofer ILT mit Vorträgen im Forum »Kunststoff« sowie im Forum »AM Science« vertreten.

**10.–13.9.2019, Frankfurt am Main  
IAA 2019**

**Internationale Automobilausstellung**  
Das Fraunhofer ILT präsentierte auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand Exponate zu den folgenden Themen:

- Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten auf Bremscheiben, auf Autotüren und auf sowie in FVK-Bauteile integrierte Leiterbahnen
- Direkt gedruckte Dehnungsmessensoren
- Lokal vergoldete Kontakte
- 3D-gedruckte Komponenten und weitere Anwendungen für Automotive-Bauteile

**8.–10.10.2019, Karlsruhe  
Deburring EXPO**

**Leitmesse für Entgrattechnologien und Präzisionsoberflächen**

Das Fraunhofer ILT präsentierte im Forschungspavillon aktuelle Entwicklungen aus den Bereichen Laserentgraten und -polieren. Schwerpunkt dabei waren Laserverfahren für tribologisch beanspruchte Oberflächen, Dichtflächen und Blechkanten.

**16.–23.10.2019, Düsseldorf  
K 2019**

**Messe der Kunststoff- und Kautschukindustrie**

Auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand stellte das Fraunhofer ILT folgende Themen aus:

- Laserdurchstrahlenschweißen transparenter Kunststoffe
- Fügen von Kunststoff-Metall-Hybridverbindungen
- Schneiden und Abtrag von Kunststoffen mittels Laserstrahlung
- Laserbasierte Verkapselung polymerer Mehrschichtfolien im Rolle-zu-Rolle-Prozess

Highlight war die Vorstellung einer laserbasierten Prozesskette zur Herstellung eines mikrofluidischen Chips.

**12.–15.11.2019, München  
productronica 2019**

**Weltleitmesse für Entwicklung und Fertigung von Elektronik**

Auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand präsentierte das Fraunhofer ILT das Lasermikroschweißen mit blauer Laserstrahlung:

- Selbstentwickelte Optiken für anspruchsvolle Schweißaufgaben
- Präzise Steuerung der Energiekopplung durch erhöhte Absorption in Kupferwerkstoffen
- Flexible Nahtauslegung durch Kombination mit galvanometrischem Laserscanner
- Ermöglichung neuartiger und weiterentwickelter Fügeprozesse

**18.–21.11.2019, Düsseldorf  
COMPAMED 2019**

**High-Tech Solutions for Medical Technology**

Auf der COMPAMED präsentierte sich das Fraunhofer ILT auf dem IVAM-Gemeinschaftsstand und stellte zu den folgenden Themen aus:

- Kompakte anwendungsspezifische µFACS-Systeme
- High-Throughput Screening
- 3D-Mikrofluidiken aus Quarzglas
- OptisCell - Prozesskette zur automatisierten Zellisolation & Laserbasierter Zellpicker

Highlight war die laserbasierte Prozesskette zur Herstellung eines mikrofluidischen Chips. Außerdem hielt Maximilian Brosda vom Fraunhofer ILT im COMPAMED High-Tech Forum by IVAM einen Vortrag in der Session »Laser and Photonics Applications – EPIC Tech Watch«.

**19.–22.11.2019, Frankfurt am Main  
formnext 2019**

**International Exhibition and Conference on the Next Generation of Manufacturing Technologies**

Auf der formnext 2019 stellte das Fraunhofer ILT auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand innovative Ergebnisse vor:

- Infrarot (NIR) Vorwärmung beim Laser Powder Bed Fusion (LPBF)
- Additive Fertigung hochreiner Kupfer-Bauteile mit »grünem« und »blauem« Licht
- 3D-Druck von Großbauteilen mit Draht-Laserauftragschweißen (LMD)
- Analyse von Pulvergasströmen mit dem Powder Jet Monitor
- Fraunhofer-Leitprojekt futureAM

Weitere Informationen zu unseren Messen und Veranstaltungen finden Sie im Internet unter: [www.ilt.fraunhofer.de/de/messen-und-veranstaltungen.html](http://www.ilt.fraunhofer.de/de/messen-und-veranstaltungen.html)

# KUNDENREFERENZENZEN

# INFORMATIONEN



Stand Dezember 2019. Mit freundlicher Genehmigung der Kooperationspartner.  
Die aufgelisteten Firmen sind ein repräsentativer Ausschnitt aus der umfangreichen Kundenliste des Fraunhofer ILT.

Aktuelle Informationen des Fraunhofer ILT erhalten Sie auf unserer Webseite oder den unten aufgeführten Social-Media-Kanälen.

→ [www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

Jahresbericht 2019 online



Weiterführende Online-Rubriken

- Profil
- Technologiefelder
- Branchen
- Projekte
- Mediathek
- Presse
- Veranstaltungen
- Jobs / Karriere
- Studium
- Cluster



**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT**

Steinbachstraße 15, 52074 Aachen  
Telefon +49 241 8906-0  
Fax +49 241 8906-121  
info@ilt.fraunhofer.de

## IMPRESSUM

### Redaktion

Dipl.-Phys. Axel Bauer (verantw.)  
M.A. Petra Nolis  
Stefanie Flock

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Axel Bauer  
Telefon +49 241 8906-194  
axel.bauer@ilt.fraunhofer.de

### Gestaltung und Produktion

Dipl.-Des. Andrea Croll  
[www.andrea-croll.de](http://www.andrea-croll.de)

### Bildnachweis

Sofern nicht anders in der jeweiligen Bildunterschrift vermerkt, lautet die Bildquelle: © Fraunhofer ILT, Aachen.

### Druck

Druckspektrum Hirche-Kurth GbR, Aachen  
[www.druck-spektrum.de](http://www.druck-spektrum.de)

Änderungen bei Spezifikationen und anderen technischen Angaben bleiben vorbehalten.

Alle Rechte vorbehalten.  
Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung der Redaktion.

© Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen 2020.