



**Fraunhofer**

**ILT**

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR LASERTECHNIK ILT

**JAHRESBERICHT**  
**2015**



---

**JAHRESBERICHT DES  
FRAUNHOFER-INSTITUTS  
FÜR LASERTECHNIK ILT  
2015**

---



Sehr geehrte Leser, liebe Partner des Fraunhofer ILT,

2015 steht unter dem Zeichen des internationalen Jahres des Lichts. Die UNESCO-Kampagne zielt auf eine stärkere Wahrnehmung der optischen Technologien in den unterschiedlichen Einsatzbereichen wie Mobilität, Medizin, Kommunikation und Produktion ab. Das Interesse für den damit verbundenen Nutzen für die Gesellschaft soll in der Breite geweckt werden. Am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik befassen wir uns täglich mit optischen Technologien. Die Faszination für Lasertechnik beschränkt sich dabei nicht auf die professionelle Sicht der Dinge. Vielmehr steht gerade bei kreativen Wissenschaftlern und Ingenieuren eine grundlegende Neugierigkeit und Begeisterung für diese Technologie im Vordergrund. Diese grundlegende Überzeugung spiegelt sich seit vielen Jahren in unseren Leitlinien wieder: »Wir sind fasziniert von den einzigartigen Eigenschaften des Laserlichtes und der daraus resultierenden Vielseitigkeit der Anwendungen. Uns begeistert die Möglichkeit, durch technologische Spitzenleistungen und erstmalige industrielle Umsetzung internationale Maßstäbe zu setzen.« Dieses Credo treibt unsere Mitarbeiter nun schon seit 30 Jahren an. Insofern könnten wir jedes Jahr als ein »Jahr des Lichts« feiern.

In den drei Jahrzehnten des Fraunhofer ILT sind in enger Kooperation mit unseren Industriepartnern zahlreiche Innovationen entstanden: von den ersten Diodenlaser-Einsätzen zum Kunststofffügen über die Entwicklung von Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern für die Materialbearbeitung bis hin zum Selective Laser Melting zur Herstellung individualisierter metallischer Bauteile. Was ist der Schlüssel zu diesen erfolgreichen Innovationen? Sicherlich stehen am Anfang einer Invention die Kreativität und die fachliche Kompetenz der Laserexperten im Vordergrund. Nicht zu vergessen dabei ist der Reiz einer anspruchsvollen Aufgabenstellung mit wirkungsvoller

Lösungsperspektive. Das erzeugt Neugierde, Umsetzungswille und Enthusiasmus. Aber erst durch den kontinuierlichen Dialog und die Zusammenarbeit mit den Produktmanagern, den Produktionsexperten und den Entwicklern unserer industriellen Partner entsteht die katalytische Wirkung hin zu einer konkreten Produkt- oder Verfahrensentwicklung. Entscheidend sind hier die Zielstrebigkeit, die Teamarbeit, die Motivation und letztendlich die Resilienz der Beteiligten in Bezug auf auftretende Probleme. Aber erst durch genügend große Freiräume ohne einschränkende Strukturen und Prozesse können unterschiedliche Lösungswege in angemessener Zeit und mit beschränkten Mitteln eingeschlagen werden. Wenn dann die Umsetzung sich beim Industriepartner rechnet und der Markt eine neue Entwicklung positiv aufnimmt, entsteht eine Innovation. Insofern verstehen wir uns im Fraunhofer ILT immer noch als Partner der Innovatoren.

Auch in diesem Jahr waren unsere Teams auf vielen innovativen Wegen unterwegs. Ob in der Mikro- oder der Makrowelt, in diesem Jahresbericht finden Sie zahlreiche Entwicklungen, die wir zusammen mit unseren Kunden und Partnern vorantreiben. Wenn Sie auch in Ihrem Hause Aufgabenstellungen vorfinden, die Sie gerne mit uns zusammen angehen wollen, dann zögern Sie nicht und kontaktieren Sie uns. Wir lieben kurze Wege und den unmittelbaren Dialog. Ich wünsche Ihnen eine inspirierende Lektüre.

Ihr

Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe

---

## INHALT

---

6	Das Institut im Profil		
7	Leitbild		
8	Technologiefelder		
10	Leistungsangebote		
14	Institutsstruktur		
15	Kuratorium und Gremien		
16	Das Institut in Zahlen		
19	Kundenreferenzen		
20	Kooperationsformen		
22	USA – Center for Laser Applications CLA		
23	Frankreich – Coopération Laser Franco-Allemande CLFA		
24	Fraunhofer-Verbundprojekt »Systemforschung Elektromobilität II«		
26	Fraunhofer-Verbund »Light & Surfaces«		
28	Die Fraunhofer-Gesellschaft auf einen Blick		
30	Lasertechnik an der RWTH Aachen		
33	Exzellenzcluster »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer«		
34	RWTH Aachen Campus		
36	Digital Photonic Production		
		<b>Ausgewählte Forschungsergebnisse</b>	
		39	Lasertechnik und Optik
		59	Lasermaterialbearbeitung
		127	Medizintechnik und Biophotonik
		137	Lasermesstechnik und EUV-Technologie
		152	Patente
		154	Veröffentlichungen und Vorträge
		155	Dissertationen
		155	Bachelorarbeiten
		157	Masterarbeiten
		159	Veranstaltungen
		167	Messen und Kongresse
		171	Auszeichnungen und Preise
		172	Arbeitskreis Lasertechnik AKL e.V.
		173	European Laser Institute ELI
		174	Zuwendungsgeber
		176	Impressum



# DAS INSTITUT IM PROFIL

## KURZPORTRAIT

ILT – dieses Kürzel steht seit 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 über 400 Mitarbeitern und 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-Institut für Lasertechnik 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 Anwenderzentrum des Fraunhofer ILT arbeiten Gastfirmen in eigenen, abgetrennten 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 10 Unternehmen nutzen die Vorteile des Anwenderzentrums. 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*



---

## LEITBILD

---

### **Mission**

Wir nehmen beim Transfer der Lasertechnik in die industrielle Nutzung eine internationale Spitzenposition ein. Wir erweitern nachhaltig Wissen und Know-how unserer Branche und tragen maßgeblich zur Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik bei. Wir schaffen mit unseren Partnern aus Industrie, Wissenschaft und Politik Innovationen auf Basis neuer Strahlquellen und neuer Anwendungen.

### **Kunden**

Wir arbeiten kundenorientiert. Diskretion, Fairness und Partnerschaftlichkeit haben für uns im Umgang mit unseren Kunden oberste Priorität. Unsere Kunden können sich auf uns verlassen. Entsprechend der Anforderung und Erwartung unserer Kunden erarbeiten wir Lösungen und deren wirtschaftliche Umsetzung. Ziel ist die Schaffung von Wettbewerbsvorteilen. Wir fördern den Nachwuchs an Fach- und Führungskräften für die Industrie durch projektbezogene Partnerschaften mit unseren Kunden. Wir wollen, dass unsere Kunden zufrieden sind und gerne wiederkommen.

### **Chancen**

Wir erweitern unser Wissen strategisch im Netzwerk.

### **Faszination Laser**

Wir sind fasziniert von den einzigartigen Eigenschaften des Laserlichts und der daraus resultierenden Vielseitigkeit der Anwendungen.

### **Mitarbeiter**

Das Zusammenwirken von Individuum und Team ist die Basis unseres Erfolgs.

### **Stärken**

Wir haben ein breites Spektrum an Ressourcen und bieten Lösungen aus einer Hand.

### **Führungsstil**

Kooperativ, fordernd und fördernd. Die Wertschätzung unserer Mitarbeiter als Person, ihres Know-hows und ihres Engagements ist 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**

Wir arbeiten in vertikalen Strukturen von der Forschung bis zur Anwendung. Unsere Kompetenzen erstrecken sich entlang der Kette Strahlquelle, Bearbeitungs- und Messverfahren über die Anwendung bis zur Integration einer Anlage in die Produktionslinie des Kunden.



# TECHNOLOGIEFELDER



## 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 Festkörperlaseren, von Hochleistungsw-Lasern bis zu Ultrakurzpulslasern und von single-frequency Systemen bis hin zu breitbandig abstimmbaren Lasern.

Bei den Festkörperlaseren 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.

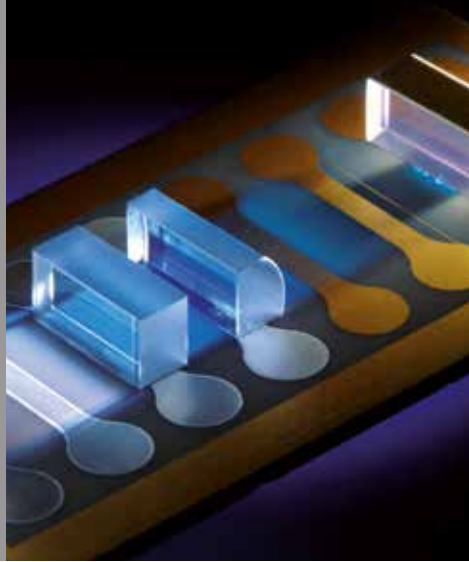
Die Anwendungsgebiete der entwickelten Laser und Optiken reichen von der Lasermaterialbearbeitung und der Messtechnik über Beleuchtungsapplikationen und Medizintechnik bis hin zum Einsatz in der Grundlagenforschung.

## 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 Lötten, 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.

# LEISTUNGSANGEBOTE

	<i>Ansprechpartner</i>	<i>E-Mail-Adresse</i>	<i>Tel.-Durchwahl</i>
<b>LASER UND OPTIK</b>			
<b>Optikdesign</b>	Dipl.-Ing. M. Traub	martin.traub@ilt.fraunhofer.de	Tel. -342
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
<b>Diodenlaser</b>	Dipl.-Ing. M. Traub	martin.traub@ilt.fraunhofer.de	Tel. -342
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
<b>Festkörperlaser</b>	Dipl.-Phys. M. Höfer	marco.hoefer@ilt.fraunhofer.de	Tel. -128
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
<b>Ultrakurzpulslaser</b>	Dr. P. Rußbüldt	peter.russbueldt@ilt.fraunhofer.de	Tel. -303
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
<b>Faserlaser</b>	Dipl.-Phys. O. Fitzau	oliver.fitzau@ilt.fraunhofer.de	Tel. -442
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
<b>UV-, VIS- und abstimmbare Laser</b>	Dr. B. Jungbluth	bernd.jungbluth@ilt.fraunhofer.de	Tel. -414
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
<b>Packaging</b>	Dr. Jens Löhring	jens.loehring@ilt.fraunhofer.de	Tel. -673
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
<b>Freiformoptiken</b>	Dr. R. Wester.	rolf.wester@ilt.fraunhofer.de	Tel. -401
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
<b>Modellierung und Simulationstools</b>	Dr. R. Wester	rolf.wester@ilt.fraunhofer.de	Tel. -401
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
<b>LASERMATERIALBEARBEITUNG</b>			
<b>Laserschneiden</b>	Dr. F. Schneider	frank.schneider@ilt.fraunhofer.de	Tel. -426
	Dr. D. Petring	dirk.petring@ilt.fraunhofer.de	Tel. -210
<b>Laserschweißen</b>	Dipl.-Ing. M. Dahmen	martin.dahmen@ilt.fraunhofer.de	Tel. -307
	Dr. D. Petring	dirk.petring@ilt.fraunhofer.de	Tel. -210



<b>Löten</b>	Dipl.-Ing. S. Britten Dr. A. Olowinsky	simon.britten@ilt.fraunhofer.de alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de	Tel. -322 Tel. -491
<b>Wärmebehandlung</b>	Dr. A. Weisheit Dr. K. Wissenbach	andreas.weisheit@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -403 Tel. -147
<b>Beschichten</b>	Dr. A. Weisheit Dr. K. Wissenbach	andreas.weisheit@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -403 Tel. -147
<b>Laserauftragschweißen</b>	Dr. A. Gasser Dr. K. Wissenbach	andres.gasser@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -209 Tel. -147
<b>Rapid Manufacturing</b>	Dr. W. Meiners Dr. K. Wissenbach	wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -301 Tel. -147
<b>Prozess- und Strahlüberwachung</b>	Dipl.-Ing. P. Abels Dr. A. Gillner	peter.abels@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -428 Tel. -148
<b>Maschinen- und Steuerungstechnik</b>	Dipl.-Ing. P. Abels Dr. A. Gillner	peter.abels@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -428 Tel. -148
<b>Kunststoffschneiden und -schweißen</b>	Dipl.-Wirt.Ing. C. Engelmann Dr. A. Olowinsky	christoph.engelmann@ilt.fraunhofer.de alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de	Tel. -217 Tel. -491
<b>Reinigen</b>	Dr. J. Stollenwerk Dr. K. Wissenbach	jochen.stollenwerk@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -411 Tel. -147
<b>Beschriften</b>	Dr. J. Stollenwerk Dr. K. Wissenbach	jochen.stollenwerk@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -411 Tel. -147
<b>Bohren</b>	Dipl.-Ing. H. Uchtmann Dr. A. Gillner	hermann.uchtman@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -8022 Tel. -148
<b>Mikrofügen</b>	Dr. A. Olowinsky Dr. A. Gillner	alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -491 Tel. -148

<b>3D-Volumenstrukturierung</b>	Dipl.-Phys. S. Nippgen Dr. A. Gillner	sebastian.nippgen@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -470 Tel. -148
<b>Polieren</b>	Dr. E. Willenborg Dr. K. Wissenbach	edgar.willenborg@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -213 Tel. -147
<b>Dünnschichtverfahren</b>	Dr. J. Stollenwerk Dr. K. Wissenbach	jochen.stollenwerk@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -411 Tel. -147
<b>Ultrakurzpulsbearbeitung</b>	Dipl.-Phys. M. Reininghaus Dr. A. Gillner	martin.reininghaus@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -627 Tel. -148
<b>Mikrostrukturierung</b>	Dipl.-Wirt.Ing C. Fornaroli Dr. A. Gillner	christian.fornaroli@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -642 Tel. -148
<b>Nanostrukturierung</b>	Dipl.-Phys. M. Steger Dr. A. Gillner	michael.steger@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -8051 Tel. -148
<b>Simulation</b>	Dr. M. Niessen Prof. W. Schulz	markus.niessen@ilt.fraunhofer.de wolfgang.schulz@ilt.fraunhofer.de	Tel. -8059 Tel. -204

## MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK

<b>Bioanalytik</b>	Dr. C. Janzen Priv.-Doz. Dr. R. Noll	christoph.janzen@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -124 Tel. -138
<b>Lasermikroskopie</b>	Dr. C. Janzen Priv.-Doz. Dr. R. Noll	christoph.janzen@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -124 Tel. -138
<b>Klinische Diagnostik</b>	Dr. A. Lenenbach Priv.-Doz. Dr. R. Noll	achim.lenenbach@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -124 Tel. -138
<b>Mikrochirurgische Systeme</b>	Dr. A. Lenenbach Priv.-Doz. Dr. R. Noll	achim.lenenbach@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -124 Tel. -138
<b>Mikrofluidische Systeme</b>	Dr. A. Olowinsky Dr. A. Gillner	alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -491 Tel. -148

<b>Biofunktionalisierung</b>	Dr. E. Bremus-Köbberling Dr. A. Gillner	elke.bremus@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -396 Tel. -148
<b>Biofabrication</b>	Dr. N. Nottrodt Dr. A. Gillner	nadine.nottrodt@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -605 Tel. -148
<b>Lasertherapie</b>	Dr. M. Wehner Dr. A. Gillner	martin.wehner@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -202 Tel. -148
<b>Implantate</b>	Dipl.-Phys. L. Jauer Dr. W. Meiners	lucas.jauer@ilt.fraunhofer.de wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de	Tel. -360 Tel. -301

## LASERMESSTECHNIK UND EUV-TECHNOLOGIE

<b>Fertigungsmesstechnik</b>	Dr. V. Sturm Priv.-Doz. Dr. R. Noll	volker.sturm@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -154 Tel. -138
<b>Materialanalytik</b>	Dr. C. Fricke-Begemann Priv.-Doz. Dr. R. Noll	cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -196 Tel. -138
<b>Recycling und Rohstoffe</b>	S. Connemann M.Sc. Priv.-Doz. Dr. R. Noll	sven.connemann@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -8050 Tel. -138
<b>Umwelt und Sicherheit</b>	Dr. C. Fricke-Begemann Priv.-Doz. Dr. R. Noll	cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -196 Tel. -138
<b>EUV-Technologie</b>	Dr. K. Bergmann Priv.-Doz. Dr. R. Noll	klaus.bergmann@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -302 Tel. -138

# INSTITUTSSTRUKTUR

## INSTITUTSLEITUNG



**Prof. Dr. Reinhart Poprawe**  
Institutsleiter



**Prof. Dr. Peter Loosen**  
stellvertretender Institutsleiter



**Dr. Vasvija Alagic-Keller MBA**  
kaufmännische Leitung

## VERWALTUNG UND STABSSTELLEN



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



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



**Dr. Alexander Drenker**  
Qualitätsmanagement



**Dr. Bruno Weigl**  
IT-Management

## KOMPETENZFELDER



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



**Dr. Arnold Gillner**  
Abtragen und Fügen



**Dr. Konrad Wissenbach**  
Generative Verfahren  
und funktionale Schichten



**Priv.-Doz. Dr. 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:

- Dr. R. Achatz, ThyssenKrupp Stahl AG
- Dr. Norbert Arndt, Rolls-Royce plc
- C. Baasel (Vorsitzender), Carl Baasel Lasertechnik GmbH
- Dr. Hans Eggers, Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
- Dr. Thomas Fehn, Jenoptik AG (bis September 2015)
- Dr. Ulrich Hefter, Rofin-Sinar Laser GmbH
- Dr. Franz-Josef Kirschfink, Hamburg Aviation Luftfahrtcluster Metropolregion Hamburg e.V.
- Dipl.-Ing. Volker Krause, Laserline GmbH
- Prof. G. Marowsky, Laserlaboratorium Göttingen e. V.
- Manfred Nettekoven, Kanzler der RWTH Aachen
- Dr. Joseph Pankert, Philips Lighting B.V.
- Prof. R. Salathé, Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne
- Dr. Dieter Steegmüller, Daimler AG
- Dr. Ulrich Steegmüller, Osram Opto Semiconductors GmbH & Co. OHG
- Dr. Klaus Wallmeroth, TRUMPF Laser GmbH & Co. KG

Die 30. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 09. September 2015 im Fraunhofer ILT in Aachen statt.

## Institutsleitungsausschuss 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:

Dr. Vasvija Alagic MBA, Dipl.-Phys. A. Bauer, Dr. A. Gillner, Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann, Dr. I. Kelbassa, Prof. P. Loosen, Priv.-Doz. Dr. R. Noll, Dr. D. Petring, Prof. R. Poprawe, Prof. W. Schulz, B. Theisen, Dr. B. Weikl, Dr. K. Wissenbach.

## Arbeitsschutzausschuss ASA

Der Arbeitsschutzausschuss ASA ist für die Lasersicherheit und alle anderen sicherheitstechnischen Fragen im Fraunhofer ILT zuständig. Mitglieder des Ausschusses sind: Dr. V. Alagic-Keller MBA, K. Bongard, M. Brankers, M.Sc. F. Eibl, R. Frömbgen, A. Hilgers, Dipl.-Ing. (FH) S. Jung, E. Neuroth, Prof. R. Poprawe, B. Theisen, F. Voigt, Dipl.-Ing. N. Wolf, Dr. R. Keul (Berufsgenossenschaftlicher Arbeitsmedizinischer Dienst BAD).

## 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, Dipl.-Phys. Dipl.-Volksw. D. Esser, Dr. A. Olowinsky.

## Betriebsrat

Am Fraunhofer ILT gibt es seit März 2003 einen von den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern gewählten Betriebsrat.



# DAS INSTITUT IN ZAHLEN

## MITARBEITER

### Mitarbeiter am Fraunhofer ILT 2015

(Stand: 31.12.2015)

	Anzahl
<b>Stammpersonal</b>	<b>229</b>
- Wissenschaftler und Ingenieure	158
- Mitarbeiter der technischen Infrastruktur	42
- Verwaltungsangestellte	29
<b>Weitere Mitarbeiter</b>	<b>188</b>
- wissenschaftliche Hilfskräfte	182
- externe Mitarbeiter	3
- Auszubildende	3
<b>Mitarbeiter am Fraunhofer ILT, gesamt</b>	<b>417</b>

- 8 Mitarbeiter haben ihre Promotion abgeschlossen.
- 86 Studenten haben ihre Bachelor- oder Masterarbeit am Fraunhofer ILT durchgeführt.

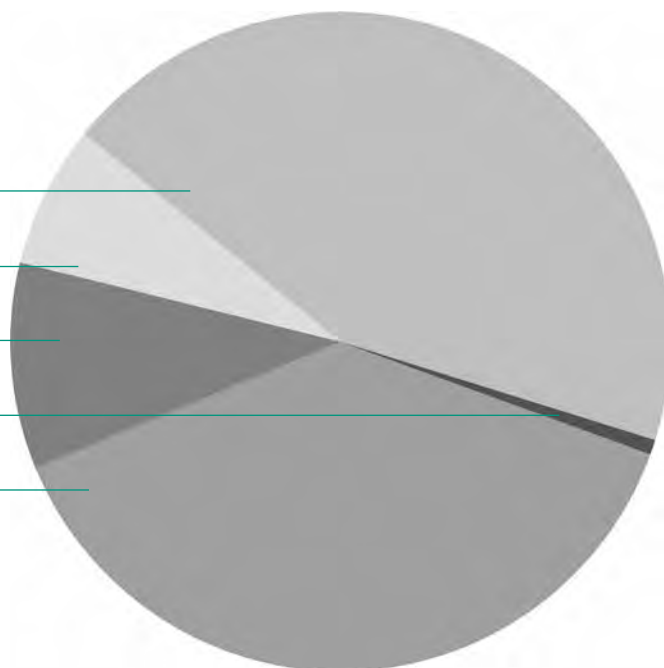
44 % wissenschaftliche Hilfskräfte

7 % Verwaltungsangestellte

10 % technische Infrastruktur

1 % Auszubildende / externe Mitarbeiter

38 % Wissenschaftler und Ingenieure



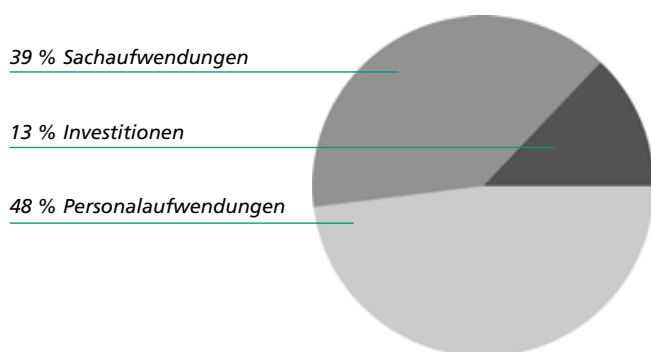
## AUFWENDUNGEN UND ERTRÄGE

Aufwendungen 2015	Mio €
- Personalaufwendungen	17,1
- Sachaufwendungen	13,9
<b>Aufwendungen Betriebshaushalt</b>	<b>31,0</b>
<b>Investitionen</b>	<b>4,6</b>

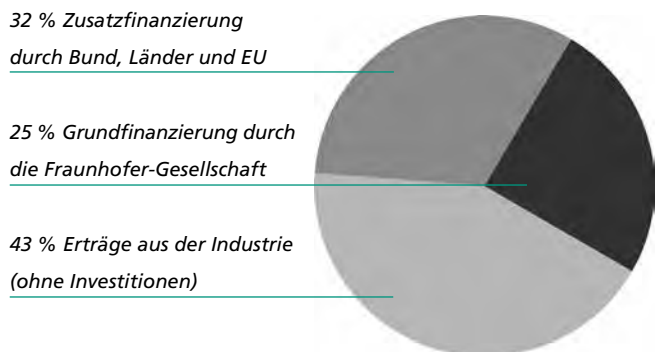
Erträge 2015	Mio €
- Erträge aus der Industrie	13,3
- Zusatzfinanzierung durch Bund, Länder und EU	10,0
- Grundfinanzierung durch die Fraunhofer-Gesellschaft	7,7
<b>Erträge Betriebshaushalt</b>	<b>31,0</b>

**Investitionserträge aus der Industrie** **0,3**

**Fraunhofer Industrie  $\rho_{\text{Ind}}$**  **43,9 %**



(100 % Betriebshaushalt und Investitionen)

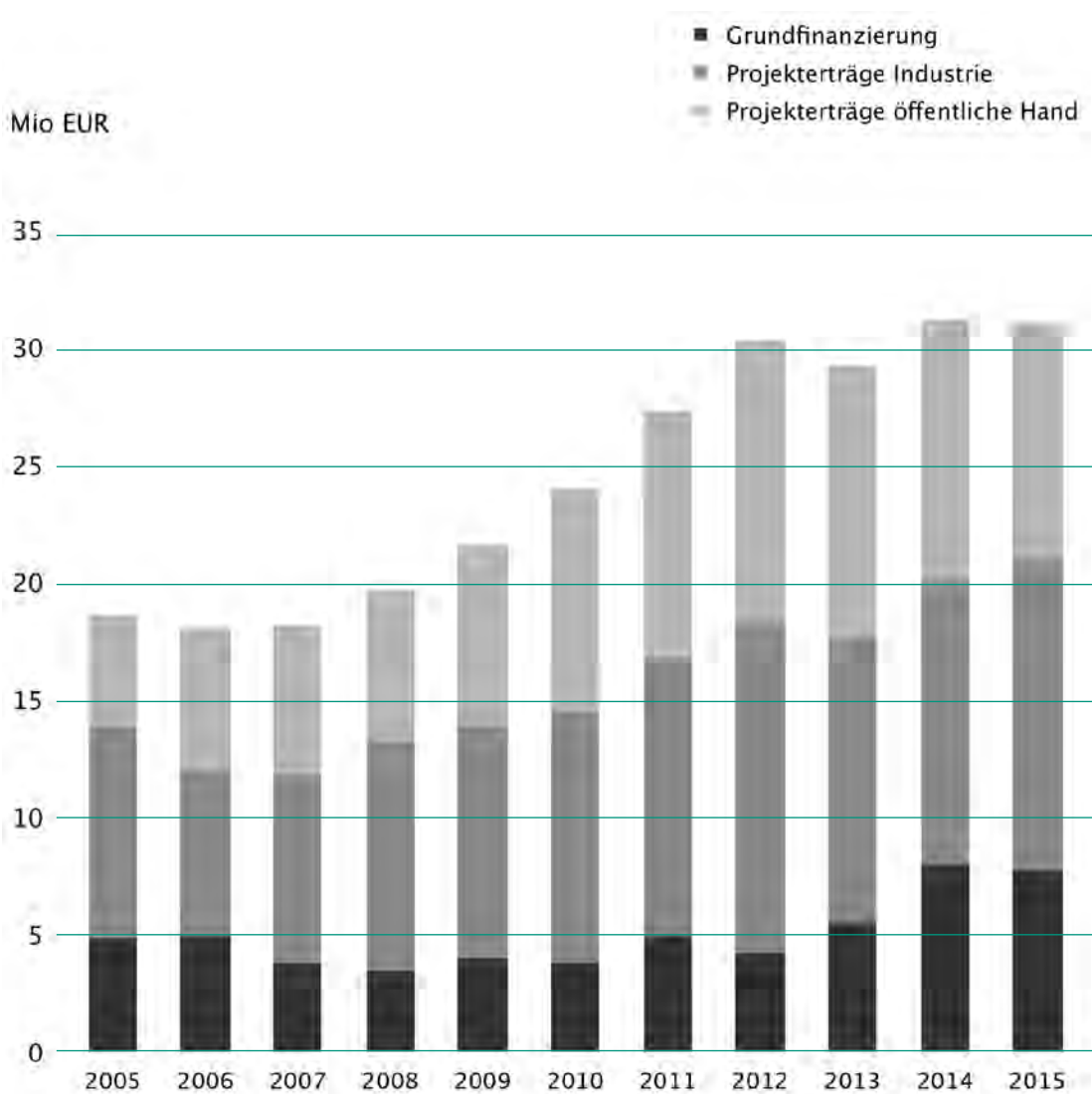


(100 % Betriebshaushalt)

# DAS INSTITUT IN ZAHLEN

## BETRIEBSHAUSHALT

Die Graphik verdeutlicht die Entwicklung des Betriebsshaushalts in den letzten 10 Jahren.



# KUNDENREFERENZENZEN



Stand Dezember 2015. Mit freundlicher Genehmigung der Kooperationspartner. Die aufgelisteten Firmen sind ein repräsentativer Ausschnitt aus der umfangreichen Kundenliste des Fraunhofer ILT.

# KOOPERATIONSFORMEN

## LEISTUNGSSPEKTRUM

Das Leistungsspektrum des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT wird ständig den Erfordernissen der industriellen Praxis angepasst und reicht von der Lösung fertigungstechnischer Problemstellungen bis hin zur Durchführung von Testserien. Im Einzelnen umfasst das Angebot:

- 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
- Entwicklung von Röntgen-, EUV- und Plasmasystemen

## KOOPERATIONEN

Die Kooperation des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT mit FuE-Partnern kann verschiedene Formen annehmen:

- 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 Gaststatus und eigenen Labors und Büros am Fraunhofer ILT (spezielle Kooperationsverträge)
- Firmen mit Niederlassungen im Campus der RWTH Aachen und Kooperation mit dem Fraunhofer ILT über den Cluster »Digital Photonic Production«

Durch Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen und spezialisierten Unternehmen bietet das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT auch bei fachübergreifenden Aufgabstellungen Problemlösungen aus einer Hand. Ein besonderer Vorteil ist in diesem Zusammenhang der direkte Zugriff auf die umfangreichen Ressourcen der Fraunhofer-Gesellschaft.

Während der Einführungsphase neuer Laserverfahren oder -produkte können Unternehmen Gaststatus am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik erwerben und Geräteausstattung, Infrastruktur und Know-how des Instituts nutzen sowie eigene Geräte installieren.

## FRAUNHOFER ILT IM AUSLAND

Das Fraunhofer ILT pflegt seit seiner Gründung zahlreiche internationale Kooperationen. Ziel der Zusammenarbeit ist es, Trends und Entwicklungen rechtzeitig zu erkennen und weiteres Know-how zu erwerben. Dieses kommt den Auftraggebern des Fraunhofer ILT direkt zugute. Mit ausländischen Firmen und Niederlassungen deutscher Firmen im Ausland führt das Fraunhofer ILT sowohl bilaterale Projekte als auch internationale Verbundprojekte durch. Die Kontaktaufnahme kann auch mittelbar erfolgen über:

- Niederlassungen des Fraunhofer ILT im Ausland
- ausländische Kooperationspartner des Fraunhofer ILT
- Verbindungsbüros der Fraunhofer-Gesellschaft im Ausland





## AUSSTATTUNG

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

### Technische Infrastruktur

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

### Wissenschaftliche Infrastruktur

Zur wissenschaftlichen Infrastruktur zählen u. a. eine mit internationaler Literatur bestückte Bibliothek, Literatur- und Patentdatenbanken sowie Programme zur Berechnung wissenschaftlicher Fragestellungen und Datenbanken zur Prozessdokumentation.

### Geräteausstattung

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

#### Strahlquellen

- CO<sub>2</sub>-Laser bis 12 kW
- Lampengepumpte Festkörperlaser bis 3 kW
- Scheibenlaser von 1 bis 10 kW
- Multimode-Faserlaser bis 4 kW
- Singlemode-Faserlaser bis 5 kW
- Diodenlaser von 1 bis 12 kW
- Ultrakurzpuls laser bis 1 kW mit Pulsdauern im Nano-, Pico- und Femtosekundenbereich
- Excimerlaser
- Breitbandig abstimmbare Laser

### Anlagen und Bearbeitungssysteme

- Selective Laser Melting (SLM)-Anlagen mit Laserleistungen bis zu 2 kW
- Fünfsichtige Portalanlagen
- Dreiachsige Bearbeitungsstationen
- Strahlführungssysteme
- Robotersysteme
- Direct-writing und Laser-PVD-Stationen

### Speziallabore

- Reinräume zur Montage von Dioden- und Festkörperlaser sowie Laseroptiken
- Life Science Labor mit S1-Klassifizierung

### Messtechnik und Sensorik

- Sensoren zur Prozessüberwachung für die Lasermaterialbearbeitung
- Geräte zur Verfahrens- und Prozessdiagnostik sowie zur Hochgeschwindigkeits-Prozessanalyse
- Laser-Spektroskopie-Systeme zur chemischen Analyse fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe
- Lasertriangulationssensoren zur Abstands- und Konturvermessung
- Laser-Koordinatenmessmaschine
- Konfokales Laser-Scanning-Mikroskop
- Raster-Elektronen-Mikroskop
- Umfangreiches Equipment zur Strahlendiagnose von Hochleistungslasern
- Shack Hartmann-Sensor zur Charakterisierung von Laserstrahlen und Optiken
- Equipment zur Fertigung integrierter Faserlaser
- Messinterferometer und Autokollimator zur Analyse von Laseroptiken
- Messequipment zur Charakterisierung von Ultrakurzpuls laser: Autokorrelatoren, Multi GHz Oszilloskope und Spektralanalysatoren
- Klimakammern
- Equipment für Vibrationstests

# FRAUNHOFER ILT IM AUSLAND

---

## USA – CENTER FOR LASER APPLICATIONS CLA

---

Die Fraunhofer-Gesellschaft verfolgte in den USA bis Ende 2014 Aktivitäten rund um die Lasertechnik in zwei separaten Zentren: »Fraunhofer Center for Laser Technology CLT« und »Fraunhofer Center for Coatings and Laser Applications CCL-L (Laser Applications Division)«.

Aufgrund der Entwicklungen der letzten Jahre werden seit 01. Januar 2015 die Laseraktivitäten der zwei bisherigen US-Einrichtungen im neu gegründeten »Center for Laser Applications CLA« gebündelt. Somit übernimmt das CLA mit Craig Bratt als Direktor die Fraunhofer-Aktivitäten im Bereich der Lasertechnik auf dem US-Markt. Laserstrahlführung und -formung, Anwendungen im Bereich Generative Verfahren sowie Mikro- und Makrolasermaterialbearbeitung zählen zu den Themenschwerpunkten des CLA.

### Ansprechpartner

Craig Bratt (Direktor)  
Telefon +1 734-738-0550  
cbratt@fraunhofer.org  
www.cla.fraunhofer.org

46025 Port Street  
Plymouth, Michigan 48170-6080, USA





## FRANKREICH – COOPÉRATION LASER FRANCO-ALLEMANDE CLFA

### Kurzportrait

In der Coopération Laser Franco-Allemande (CLFA) in Paris kooperiert das Fraunhofer ILT seit 1997 mit führenden französischen Forschungseinrichtungen wie z. B. CEA, CNRS, DGA und MINES ParisTech. Die wichtigsten Kooperationspartner sind derzeit das Institut de Recherche Technologique (IRT) Jules Verne und die Universität Nantes, die Hochschule für Mechanik und Mikrotechnik (ENSMM) in Besançon sowie die Ingenieurhochschule ECAM in Rennes. Interdisziplinäre Expertenteams aus Deutschland und Frankreich arbeiten gemeinsam am Transfer lasergestützter Fertigungsverfahren in die europäische Industrie. Die CLFA ist Mitglied in der französischen Vereinigung von Laserherstellern und -anwendern, dem Club Laser et Procédés. In 2015 beteiligte sich die CLFA am Fraunhofer-Gemeinschaftsstand der JEC Composites in Paris, war Ausrichter der Laserkonferenz JNPLI in Bordeaux sowie des 1. Deutsch-Französischen Leichtbau-Symposiums in Nantes.

Die Ziele der CLFA sind:

- Einbindung in wissenschaftliche und industrielle Entwicklungen in Frankreich
- Know-how-Zuwachs durch schnelleres Erkennen von Trends im Bereich der europäischen Laser- und Produktionstechnik
- Stärkung der Position im europäischen FuE-Markt
- Aufbau eines europäischen Kompetenzzentrums für Lasertechnik
- Steigerung der Mobilität und Qualifikation der Mitarbeiter

Die CLFA beteiligt sich aktiv an der Realisierung des europäischen Forschungsraums. Die Kooperation des Fraunhofer ILT mit den französischen Partnern ist ein Beitrag zum Ausbau der europaweiten Präsenz der Fraunhofer-Gesellschaft mit Vorteilen für beide Seiten.

Das Interesse der französischen Partner konzentriert sich auf die:

- Nutzung von Kompetenzen der Fraunhofer-Institute für französische Unternehmen
- Nutzung der Erfahrung des Fraunhofer ILT bei der Einführung neuer Technologien
- Verbindung zwischen Industrie und Hochschulen mit praxisnaher Ausbildung von Studenten

### Dienstleistungen

Die CLFA bietet Dienstleistungen im Bereich der Lasermaterialbearbeitung an. Diese umfassen das gesamte Spektrum von anwendungsorientierter Grundlagenforschung und Ausbildung über Machbarkeitsstudien und Prozessentwicklung bis hin zur Vorserienentwicklung und Systemintegration. Hier haben vor allem auch kleine und mittelständische Unternehmen die Möglichkeit, die Vorteile der Lasertechnik in einer unabhängigen Einrichtung kennenzulernen und zu erproben.

### Standort und Ausstattung

Seit Juli 2014 befindet sich die CLFA im Technocampus Composites des IRT Jules Verne in Nantes. Neben der am Fraunhofer ILT zur Verfügung stehenden Ausstattung verfügt die CLFA über eine eigene Infrastruktur am IRT Jules Verne mit Zugriff auf die Labore zur Materialanalyse der Universität Nantes. Kunden- und projektorientiert kann auch die Infrastruktur der französischen Partner genutzt werden.

### Ansprechpartner

Prof. Wolfgang Knapp (Direktor)  
Telefon +33 2 2844 3711  
wolfgang.knapp@ilt.fraunhofer.de

CLFA c/o IRT Jules Verne, Technocampus OCEAN  
5 Rue de L'Halbrane  
44340 Bouguenais, Frankreich

# FRAUNHOFER SYSTEMFORSCHUNG ELEKTROMOBILITÄT II

## Kurzportrait

Seit Beginn des Jahres 2013 arbeiten 16 Fraunhofer-Institute in der »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität II – FSEM II« zu innovativen Forschungsthemen der Elektromobilität eng zusammen. Damit sollen die u. a. im Rahmen der »FSEM I« aufgebauten Kompetenzen und Netzwerke der Fraunhofer-Institute auf dem Gebiet der Elektromobilität weiter ausgebaut werden.

Mit der »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität II« baut die Fraunhofer-Gesellschaft ihre erfolgreichen Arbeiten auf dem Gebiet der Elektromobilität weiter aus. Dabei konzentrieren sich die beteiligten Institute nicht nur auf die Beiträge zur Lösung der wichtigsten technologischen Herausforderungen zur Elektromobilität sondern versuchen, durch direkte Einbeziehung von industriell relevanten Fragestellungen auch bei der Industrialisierung dieser Technologien mitzuwirken. Gerade der verstärkte Fokus auf die Produktion von Komponenten für Elektrofahrzeuge innerhalb des Projekts trägt dem Rechnung.

Ein Ziel liegt in der Entwicklung innovativer Technologien und Komponenten für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Diese sollen dann gemeinsam mit Forschungspartnern aus der Industrie in die Anwendung überführt werden. Gleichzeitig wird damit ein Beitrag zur Fortführung und weiteren inhaltlichen Ausgestaltung des Systemforschungsgedankens durch Kooperation der Fraunhofer-Institute untereinander geleistet.

## Innovative Technologien

Die Komplexität der Fahrzeug- und Komponentenentwicklung wird durch die Aufteilung in drei Cluster abgebildet:

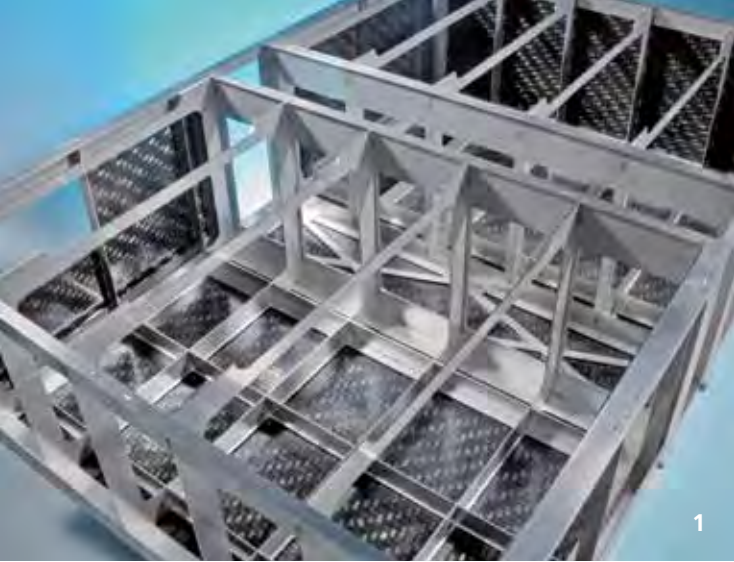
- Antriebsstrang / Fahrwerk
- Batterie / Range Extender
- Bauweisen / Infrastruktur

Hohe Energiedichte, niedrige Produktionskosten und große Eigensicherheit im Crashfall sind die zentralen Herausforderungen für Batteriesysteme in Hybrid- und Elektrofahrzeugen.

Die Entwicklung von Batteriesystemen und Gehäusetechnologien sowie die dazu notwendige Produktionstechnik sind daher essentiell für die sichere und kosteneffiziente Nutzung in elektromobilen Anwendungen.

Das Cluster »Batterie / Range Extender« fokussiert sich auf den Aufbau eines Batteriesystems sowie auf die Realisierung eines Range Extender-Moduls. Acht Fraunhofer-Institute arbeiten in diesem Rahmen an neun Teilprojekten. Im Vordergrund der Arbeiten zum Batteriesystem steht die Weiterentwicklung einzelner Komponenten und Fertigungstechniken in Richtung Leichtbau und Effizienz. Beispiele hierfür sind die Entwicklung eines leichten, aber dennoch crashsicheren Batteriegehäuses, die Kühlung der Batterie mittels PCM oder ein serienfähiges Kontaktierungsverfahren für Batteriepole mittels Laserstrahlschweißen.





Ein weiteres Modul bildet der »Li-Booster«, eine kompakte Hochleistungs-Batterie, die kurzzeitige hohe Leistungsbedarfe im Bordnetz sowohl beim Antrieb als auch bei der Rekuperation decken kann. Dies ermöglicht ein zweiteiliges Hybrid-Batteriesystem mit deutlich verbesserter Lebensdauer, welches aus je einem für den jeweiligen Einsatzzweck optimierten Leistungs- und Energiespeicherteil besteht.

Für die Komponente »Range Extender« werden verschiedene Lösungsansätze verfolgt. Ein kompaktes Brennstoffzellenmodul ergänzt das »Leichtbau-Energiepack« um ein auf den Einsatz im Elektrofahrzeug hin optimiertes System zur lokal emissionsfreien Energiewandlung. Ein weiteres Range Extender-Modul wird für den Einsatz in einem leichten Nutz- bzw. Kommunalfahrzeug hin entwickelt und optimiert. Dieses wird von einem emissionsarmen und zuverlässigen Verbrennungsmotor angetrieben, um sowohl elektrische Energie als auch die in diesem Einsatzfall notwendige hydraulische Energie bereitstellen zu können.

Gleichzeitig werden auch die Fertigungs- und Produktionstechnologien weiterentwickelt, um eine kostengünstige Herstellung zu ermöglichen.

Die Zusammenarbeit der verschiedenen Institute eröffnet gerade in dem innovativen Marktumfeld der Elektromobilität der Fraunhofer-Gesellschaft neue Kooperationsmodelle und vereinfacht für die mittelständisch geprägte Automobilzulieferindustrie in Deutschland den Zugang zu Forschungsleistungen aus dem Portfolio der beteiligten Institute.

### An FSEM II beteiligte Institute

- Fraunhofer ICT, Pfinztal
- Fraunhofer IDMT, Ilmenau
- Fraunhofer IFAM, Bremen
- Fraunhofer IIS, Erlangen / Nürnberg
- Fraunhofer IISB, Erlangen
- Fraunhofer ILT, Aachen
- Fraunhofer IPA, Stuttgart
- Fraunhofer IPT, Aachen
- Fraunhofer ISE, Freiburg
- Fraunhofer ISIT, Itzehoe
- Fraunhofer IVI, Dresden
- Fraunhofer IWES, Kassel
- Fraunhofer IWM, Freiburg
- Fraunhofer IWU, Chemnitz
- Fraunhofer LBF, Darmstadt
- Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen

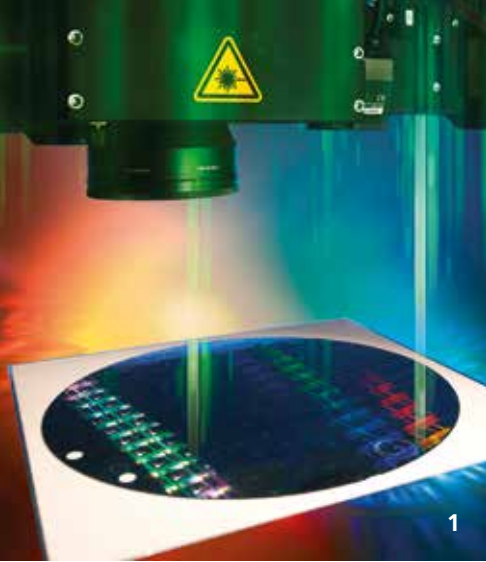
### Ansprechpartner

Dr. Alexander Olowinsky  
 Telefon +49 241 8906-491  
 Clustersprecher »Batterie / Range Extender«  
[alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de](mailto:alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de)

Dr. Arnold Gillner  
 Telefon +49 241 8906-148  
[arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de](mailto:arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de)

- 1 Leichtbau-Energiepack aus einer Kombination von hochfestem Stahl und FVK.  
 2 Technologiedemonstrator »Leichtbau-Energiepack« mit Gehäuse, Batteriemodulen und Elektronik.

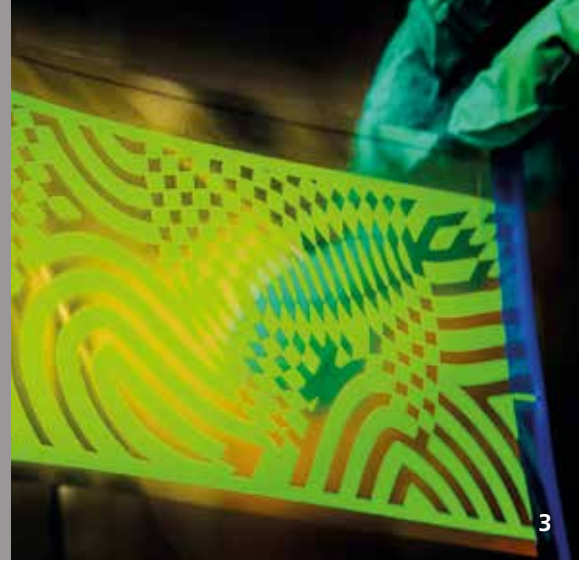




1



2



3

## FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

### Kompetenz durch Vernetzung

Sechs Fraunhofer-Institute kooperieren im Verbund Light & Surfaces. Aufeinander abgestimmte Kompetenzen gewährleisten eine schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an die Erfordernisse in den verschiedensten Anwendungsfeldern zur Lösung aktueller und zukünftiger Herausforderungen, insbesondere in den Bereichen Energie, Umwelt, Produktion, Information und Sicherheit. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Marktes ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten zum Nutzen der Kunden.

### Kernkompetenzen des Verbunds

- Beschichtung und Oberflächenfunktionalisierung
- Laserbasierte Fertigungsverfahren
- Laserentwicklung und Nichtlineare Optik
- Materialien der Optik und Photonik
- Mikromontage und Systemintegration
- Mikro- und Nanotechnologien
- Kohlenstofftechnologie
- Messverfahren und Charakterisierung
- Ultrapräzisionsbearbeitung
- Werkstofftechnologien
- Plasma- und Elektronenstrahlquellen

1 Fraunhofer IWS

2 Fraunhofer IOF

3 Fraunhofer FEP

4 Fraunhofer ILT

5 Fraunhofer IST

6 Fraunhofer IPM

### Geschäftsfelder

- Abtragen und Trennen
- Bildgebung und Beleuchtung
- Fügen und Generieren
- Lichtquellen und Lasersysteme
- Lithographie
- Materialprüfung und Analytik
- Medizintechnik und Biophotonik
- Mikrosysteme und Sensoren
- Optische Systeme und Instrumentierung
- Werkzeuge und Formenbau

### Kontakt

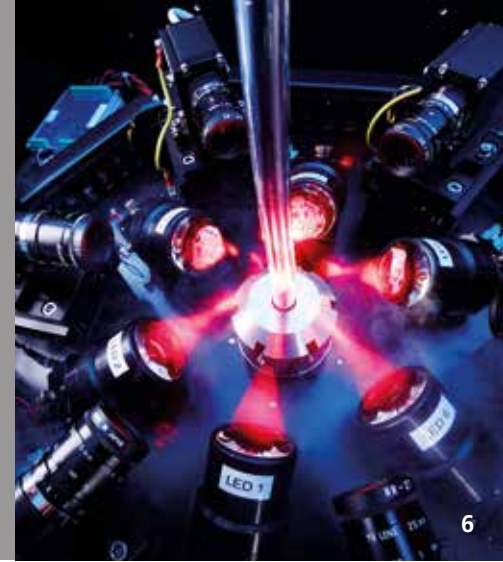
Prof. Dr. Reinhard Poprawe (Verbundvorsitzender)  
Telefon +49 241-8906-110

Gabriela Swoboda (Verbundassistentin)  
Telefon +49 241-8906-8347  
gabriela.swoboda-barthel@ilt.fraunhofer.de

[www.light-and-surfaces.fraunhofer.de](http://www.light-and-surfaces.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 optoelektronischen 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 Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP**

Das Fraunhofer FEP arbeitet an innovativen Lösungen im Bereich der Vakuumbeschichtung, der Oberflächenbehandlung und der organischen Halbleiter. Grundlage dieser Arbeiten sind die Kernkompetenzen Elektronenstrahltechnologie, Sputtern, plasmaaktivierte Hochratebedampfung und Hochrate-PECVD sowie Technologien für organische Elektronik und IC-/Systemdesign. Unsere Technologien und Prozesse finden Anwendung im Maschinenbau, im Transportwesen, der Biomedizintechnik, der Architektur und für den Kulturguterhalt, in der Verpackungsindustrie, im Bereich Umwelt und Energie, der Optik, Sensorik und Elektronik sowie in der Landwirtschaft.

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

### **Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT**

Mit über 400 Patenten seit 1985 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 das Rapid Manufacturing. 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 Schicht- und Oberflächentechnik IST**

Das Fraunhofer IST bietet als innovativer FuE-Partner Lösungen in der Oberflächentechnik, die gemeinsam mit Kunden aus Industrie und Forschung erarbeitet werden. Das »Produkt« ist die Oberfläche, die durch Modifizierung, Strukturierung

und/oder Beschichtung für Anwendungen primär in den folgenden Geschäftsfeldern optimiert: »Maschinenbau, Werkzeuge und Fahrzeugtechnik«; »Luft- und Raumfahrt«; »Energie und Elektronik«; »Optik« und »Life Science und Umwelt«. Die Kompetenzen des Fraunhofer IST in der Schichtherstellung und Schichtanwendung werden unterstützt durch eine entsprechende Schicht- und Oberflächenanalytik sowie durch die Simulation der vakuumbasierten Beschichtungsprozesse. [www.ist.fraunhofer.de](http://www.ist.fraunhofer.de)

### **Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM**

Das Fraunhofer IPM entwickelt maßgeschneiderte Messtechniken, Systeme und Materialien für die Industrie. Dadurch ermöglichen wir unseren 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 und funktionalen Materialien bilden die Basis für Hightech-Lösungen in der Produktionskontrolle, der Materialcharakterisierung und -prüfung, der Objekt- und Formerfassung, der Gas- und Prozesstechnologie sowie im Bereich Funktionelle Materialien und Systeme. [www.ipm.fraunhofer.de](http://www.ipm.fraunhofer.de)

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

Das IWS steht für Innovationen in den Geschäftsfeldern Fügen, Trennen sowie Oberflächentechnik und Beschichtung. Geschäftsfeldübergreifende Querschnittsthemen sind Energiespeicher, Energieeffizienz, Additive Fertigung, Leichtbau und Big Data. Die Besonderheit des Fraunhofer IWS liegt in der Kombination eines umfangreichen werkstofftechnischen Know-hows mit weitreichenden Erfahrungen in der Entwicklung von Technologien und Systemtechnik. Zahlreiche Lösungen im Bereich der Lasermaterialbearbeitung und Schichttechnik finden jedes Jahr Eingang in die industrielle Fertigung. [www.iws.fraunhofer.de](http://www.iws.fraunhofer.de)

# DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT AUF EINEN BLICK

## Die Fraunhofer-Gesellschaft

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 67 Institute und Forschungseinrichtungen. 24 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2,1 Milliarden Euro. Davon fallen über 1,8 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Mehr als 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und

Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten 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 Forschungsgebiete

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

- Werkstofftechnik, Bauteilverhalten
- Produktionstechnik, Fertigungstechnologie
- Informations- und Kommunikationstechnik
- Mikroelektronik, Mikrosystemtechnik
- Sensorsysteme, Prüftechnik
- Verfahrenstechnik
- Energie- und Bautechnik, Umwelt- und Gesundheitsforschung
- Technisch-Ökonomische Studien, Informationsvermittlung

## Die Zielgruppen

Die Fraunhofer-Gesellschaft ist sowohl der Wirtschaft und dem einzelnen Unternehmen als auch der Gesellschaft verpflichtet. Zielgruppen und damit Nutznießer der Forschung der Fraunhofer-Gesellschaft sind:

- Die Wirtschaft: Kleine, mittlere und große Unternehmen in der Industrie und im Dienstleistungssektor profitieren durch Auftragsforschung. Die Fraunhofer-Gesellschaft entwickelt konkret umsetzbare, innovative Lösungen und trägt zur breiten Anwendung neuer Technologien bei. Für kleine und mittlere Unternehmen ohne eigene FuE-Abteilung ist die Fraunhofer-Gesellschaft wichtiger Lieferant für innovatives Know-how.
- Staat und Gesellschaft: Im Auftrag von Bund und Ländern werden strategische Forschungsprojekte durchgeführt. Sie dienen der Förderung von Spitzen- und Schlüsseltechnologien oder Innovationen auf Gebieten, die von besonderem öffentlichen Interesse sind, wie Umweltschutz, Energietechniken und Gesundheitsvorsorge. Im Rahmen der Europäischen Union beteiligt sich die Fraunhofer-Gesellschaft an den entsprechenden Technologieprogrammen.

## Das Leistungsangebot

Die Fraunhofer-Gesellschaft entwickelt Produkte und Verfahren bis zur Anwendungsreife. Dabei werden in direktem Kontakt mit dem Auftraggeber individuelle Lösungen erarbeitet. Je nach Bedarf arbeiten mehrere Fraunhofer-Institute zusammen, um auch komplexe Systemlösungen zu realisieren. Es werden folgende Leistungen angeboten:

- Optimierung und Entwicklung von Produkten bis hin zur Herstellung von Prototypen
- Optimierung und Entwicklung von Technologien und Produktionsverfahren

- Unterstützung bei der Einführung neuer Technologien durch:
  - Erprobung in Demonstrationszentren mit modernster Geräteausstattung
  - Schulung der beteiligten Mitarbeiter vor Ort
  - Serviceleistungen auch nach Einführung neuer Verfahren und Produkte
- Hilfe zur Einschätzung von Technologien durch:
  - Machbarkeitsstudien
  - Marktbeobachtungen
  - Trendanalysen
  - Ökobilanzen
  - Wirtschaftlichkeitsberechnungen
- Ergänzende Dienstleistungen, z. B.:
  - Förderberatung, insbesondere für den Mittelstand
  - Prüfdienste und Erteilung von Prüfsiegeln

## Die Standorte der Forschungseinrichtungen





# LASERTECHNIK AN DER RWTH AACHEN

## GEMEINSAM ZUKUNFT GESTALTEN

Die RWTH Aachen bietet mit den Lehrstühlen für Lasertechnik LLT und für Technologie Optischer Systeme TOS sowie den Lehr- und Forschungsgebieten Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD, Experimentalphysik Nano-Optik und Metamaterialien sowie Experimentalphysik des Extrem-Ultraviolett EUV 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 fünf Lehrstühle und das Fraunhofer ILT Zukunft gestalten.

### Lehrstuhl für Lasertechnik LLT

Der Lehrstuhl für Lasertechnik ist seit 1985 an der RWTH Aachen in der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung in den Bereichen Ultrakurzpulsbearbeitung, 3D-Volumenstrukturierung, Bohren, generative Verfahren und integrative Produktion tätig.

Die Entwicklung von Fertigungsverfahren zur Bearbeitung von transparenten Dielektrika mittels Femtosekunden-Laserstrahlung für die Erzeugung von mikrooptischen und mikromechanischen Komponenten steht im Fokus der Aktivitäten in der Gruppe 3D-Volumenstrukturierung. Die Integration von optischen Technologien in die Fertigung sowie die Herstellung von optischen Systemen sind wesentlicher Bestandteil des Exzellenzclusters »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer« innerhalb des Bereichs »Digital Photonic Production«. Mit Ultrakurzpuls-Laserstrahlung werden sowohl Grundlagenexperimente durchgeführt als auch praxisrelevante Nano- und Mikrobauteile durch Abtragen, Modifizieren oder Schmelzen bearbeitet. Beim Bohren werden Metalle sowie Mehrschichtsysteme aus zumeist Metallen und Keramiken mittels Einzelpuls-, Perkussions- und Wendelbohren sowie dem Trepanieren bearbeitet. Anwendungen finden sich beispielsweise bei Bohrungen in Turbinenschaufeln für die Luft- und Raumfahrt. Arbeitsthemen im Bereich generative Verfahren sind u. a. neue Werkstoffe, kleinere Strukturgrößen, größere Aufbauten, das Mikrobeschichten, die Prozesskontrolle und -regelung sowie die Neu- und Weiterentwicklung der eigenen Anlagen- und Systemtechnik.

### Kontakt

Prof. Reinhart Poprawe (Leiter des Lehrstuhls)  
Telefon +49 241 8906-109  
reinhart.poprawe@ilt.rwth-aachen.de



### **Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme TOS**

Mit dem Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme trägt die RWTH Aachen 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 Strahformung. Im Bereich Hochleistungsdiodenlaser werden mikro- und makrooptische Komponenten entwickelt und zu Systemen kombiniert. Weiterhin werden Montagetechniken optimiert.

#### **Kontakt**

Prof. Peter Loosen (Leiter des Lehrstuhls)  
Telefon +49 241 8906-162  
peter.loosen@tos.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, 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. Mit den Hinweisen aus der Diagnose und der numerischen Berechnung wird eine mathematisch begründete Reduktion der Modellgleichungen durchgeführt. Die Lösungseigenschaften der reduzierten Gleichungen sind vollständig in den Lösungen der Ausgangsgleichungen enthalten und weisen keine unnötige Komplexität auf.

#### **Kontakt**

Prof. Wolfgang Schulz  
(Leiter des Lehr- und Forschungsgebiets)  
Telefon +49 241 8906-204  
wolfgang.schulz@nld.rwth-aachen.de

# LASERTECHNIK AN DER RWTH AACHEN

## Lehr- und Forschungsgebiet Experimentalphysik Nano-Optik und Metamaterialien

Im Rahmen der Exzellenzinitiative wurde an der RWTH Aachen im Jahr 2008 die Juniorprofessur Nano-Optik und Metamaterialien geschaffen. Mit diesem Themengebiet erweitert Prof. Thomas Taubner die Forschungsaktivitäten im Fachbereich Physik um neue abbildende Verfahren mit nanometrischer Ortsauflösung.

Basis hierfür ist die sogenannte »Feldverstärkung« an metallischen oder dielektrischen Nanostrukturen: lokal überhöhte elektrische (Licht-)Felder ermöglichen neuartige Sensoren zur Detektion von organischen Substanzen, aber auch neuartige Abbildungsmethoden wie z. B. die optische Nahfeldmikroskopie oder Superlinsen, welche die beugungsbegrenzte Auflösung von konventionellen Mikroskopen weit übertreffen.

Der Schwerpunkt der Aktivitäten liegt im Spektralbereich des mittleren Infrarot. Hier kann die Infrarotspektroskopie chemische Information über molekulare Verbindungen, Kristallstruktur von polaren Festkörpern und Eigenschaften von Ladungsträgern liefern.

Diese Grundlagenforschung an der RWTH ergänzt die ebenfalls von Prof. Taubner geleitete ATTRACT-Nachwuchsgruppe am Fraunhofer ILT, in der mögliche Anwendungen von neuen nano-optischen Konzepten in der Lasertechnik evaluiert werden.

### Kontakt

Prof. Thomas Taubner  
Nano-Optik und Metamaterialien  
Telefon +49 241 80-20260  
taubner@physik.rwth-aachen.de

## Lehr- und Forschungsgebiet Experimentalphysik des Extrem-Ultraviolett EUV

Der Spektralbereich der extrem ultravioletten Strahlung (Extrem-Ultraviolett, EUV oder XUV, 1 - 50 nm) bietet die Vorteile kleiner Wellenlängen und starker Licht-Materie-Wechselwirkungen mit atomaren Resonanzen. Dies ermöglicht sowohl laterale als auch Tiefenauflösungen im Nanometerbereich mit elementspezifischen Kontrasten.

Am 2012 im Fachbereich Physik gegründeten Lehr- und Forschungsgebiet »Experimentalphysik des Extrem-Ultraviolett EUV« der RWTH Aachen werden verschiedene Aspekte der EUV-Strahlung untersucht. Das Spektrum reicht von der Strahlungserzeugung und Charakterisierung über Wellenausbreitung und Wechselwirkungen mit Materie bis hin zu konkreten Anwendungen und deren Methodenentwicklungen. Dabei stehen insbesondere zwei Bereiche im Vordergrund: hochbrillante Quellen und Interferenzlithographie.

Die Arbeiten erfolgen in Kooperation mit dem Peter Grünberg Institut PGI des Forschungszentrums Jülich, speziell dem PGI-9 Halbleiter-Nanoelektronik (Prof. Detlev Grützmacher), dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen und dem im Maschinenbau angesiedelten Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme TOS der RWTH Aachen (Prof. Peter Loosen) und sind eingebettet in die Sektion JARA-FIT der Jülich-Aachen-Research Alliance.

### Kontakt

Prof. Larissa Juschkina  
Experimentalphysik des Extrem-Ultraviolett EUV  
Telefon +49 241 8906-313  
larissa.juschkina@rwth-aachen.de



# EXZELLENZCLUSTER

## Exzellenzcluster

### »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer«

Im Exzellenzcluster »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer« entwickeln Aachener Produktions- und Materialwissenschaftler Konzepte und Technologien für eine nachhaltige wirtschaftliche Produktion.

Insgesamt sind 18 Lehrstühle bzw. Institute der RWTH Aachen sowie das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT an dem bis Ende 2017 angelegten Projekt beteiligt.

Der mit ca. 40 Mio € dotierte Exzellenzcluster ist somit die umfassendste Forschungsinitiative in Europa mit dem Ziel, die Produktion in Hochlohnländern zu halten.

### Produktion in Hochlohnländern

Der Wettbewerb zwischen Produzenten in Hochlohn- und Niedriglohnländern spielt sich typischerweise in zwei Dimensionen ab: in der Produktionswirtschaftlichkeit und in der Planungswirtschaftlichkeit.

Produktionswirtschaftlich fokussieren Niedriglohnländer rein auf die Erschließung von Volumeneffekten in der Produktion (Economies of Scale); in Hochlohnländern erfolgt notwendigerweise eine Positionierung zwischen Scale und Scope, also der Befriedigung kundenspezifischer Produkthanforderungen bei gleichzeitiger Sicherung von Mindeststückzahlen in der Produktion.

In der zweiten Dimension, der Planungswirtschaftlichkeit, bemühen sich die Hersteller in Hochlohnländern um eine immer weitergehende Optimierung der Prozesse mit entsprechend anspruchsvollen, kapitalintensiven Planungsmethoden und -instrumenten sowie technologisch überlegenen Produktionssystemen, während in Niedriglohnländern einfache, robuste wertstromorientierte Prozessketten die Lösung sind.

Um einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil für Produktionsstandorte in Hochlohnländern zu erzielen, reicht eine bessere Positionierung innerhalb der beiden gegensätzlichen Alternativen Scale-Scope sowie planungsorientiert-wertorientiert nicht mehr aus. Die Forschungsfragen müssen vielmehr auf eine weitgehende Auflösung dieser Gegensätze abzielen. Es müssen Wege gefunden werden, gleichzeitig die Variabilität in den Produkten zu steigern und trotzdem zu Kosten einer Massenproduktion produzieren zu können. Dies erfordert produktgerechte, wertoptimierte Prozessketten, deren Wirtschaftlichkeit nicht durch überhöhte planerische Aufwände gefährdet wird.

Die Produktionstechnik von morgen benötigt daher ein grundlegend neues Verständnis dieser elementaren Zusammenhänge, die im Rahmen des Exzellenzclusters in den vier Forschungsfeldern Individualisierte Produktion, Virtuelle Produktion, Hybride Produktion und Selbstoptimierende Produktion erarbeitet werden.

Im Bereich der Produktionswirtschaftlichkeit wurde am Fraunhofer ILT z. B. die Prozesseffizienz des Selective Laser Melting (SLM) um den Faktor 10 gesteigert und damit ein wesentlicher Beitrag zur Aufhebung des Scale-Scope Dilemmas geleistet. Mit der Erforschung von Methoden zur Selbstoptimierung beim Laserstrahlschneiden und in der automatisierten Montage von Festkörperlasern liefert das Fraunhofer ILT wesentliche Beiträge zur Überwindung des Gegensatzes zwischen planungsorientierten und wertorientierten Konzepten.

### Ansprechpartner

Fraunhofer ILT  
Dipl.-Phys. Christian Hinke  
Telefon +49 241 8906-352  
christian.hinke@ilt.fraunhofer.de

# RWTH AACHEN CAMPUS

## **RWTH Aachen Campus**

Nach dem Vorbild der Stanford University und des Silicon Valleys wird die RWTH Aachen auf einem Gesamtareal von ca. 2,5 km<sup>2</sup> einen der größten technologieorientierten Campusbereiche Europas und damit eines der national und international bedeutendsten Wissens- und Forschungszentren schaffen. Standort werden das ehemalige Hochschulerweiterungsgelände in Aachen Melaten sowie ein Teilareal des Aachener Westbahnhofs sein. 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 an Schwerpunktthemen der Kompetenz-Cluster sowie an Forschung, Entwicklung und Lehre – mit eigenen Fragestellungen und Ressourcen. Zugleich wird so der Zugang zu qualifiziertem Nachwuchs gesichert und schnelle praxisorientierte Promotionsverfahren werden ermöglicht.

Die Ansiedelung der interessierten Unternehmen auf dem RWTH Aachen Campus kann zur Miete oder mit einem eigenen Gebäude erfolgen. So wird eine einzigartige, intensive Form der Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Unternehmen entstehen.

Hinter allem steht das ganzheitliche Konzept: Forschen, Lernen, Entwickeln, Leben; denn der RWTH Aachen Campus schafft nicht nur die ideale Arbeitsumgebung für mehr als 10.000 Mitarbeiter mit Forschungseinrichtungen, Büros und Weiterbildungszentrum sondern wird zudem durch Hotel, Gastronomie, Wohnen, Einkaufsmöglichkeiten, Kinderbetreuung und vielfältige Service- und Transfereinrichtungen ein hohes Maß an Lebensqualität bieten.

## **Entwicklung und Zeitplan**

Der RWTH Aachen Campus entsteht in drei Etappen. Die erste Etappe wurde 2010 mit der Erschließung und Bebauung von Campus Melaten mit 6 Clustern gestartet. In der zweiten Etappe findet die Erschließung und Bebauung von Campus Westbahnhof mit 4 Clustern statt. Die dritte Etappe konzentriert sich auf das Wachsen und Verdichten auf 19 Cluster in Melaten und Westbahnhof sowie die Erweiterung der Infrastruktur beispielsweise durch den Bau von Kongresshalle, Bibliothek und Hotels.



## Cluster Photonik

In bis zu 19 Clustern werden die relevanten Zukunftsthemen der Industrie gemeinsam bearbeitet – in der Produktionstechnik, Energietechnik, Automobiltechnik, Informations- und Kommunikationstechnologie sowie Werkstofftechnik.

Mehr als 100 Unternehmen, davon 18 internationale Key-Player, haben sich zusammen mit 30 Lehrstühlen der RWTH Aachen University zu einer langfristigen Kooperation auf dem RWTH Campus in Melaten verpflichtet. In der ersten Phase sollen acht bis zehn Gebäudekomplexe mit insgesamt 60.000 m<sup>2</sup> Bruttogrundfläche in den folgenden sechs Clustern entstehen:

- Cluster Integrative Produktionstechnik
- Cluster Logistik
- Cluster Schwerlastantriebstechnik
- Cluster Photonik
- Cluster Bio-Medizintechnik
- Cluster Nachhaltige, umweltfreundliche Energietechnik

Im Cluster Photonik werden Verfahren zur Erzeugung, Formung und Nutzung von Licht, insbesondere als Werkzeug für die industrielle Produktion, erforscht und entwickelt. Der erste Gebäudekomplex des Clusters Photonik umfasst 7000 Quadratmeter Büro- und Laborfläche in unmittelbarer Nähe des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT. Die Eröffnung des Gebäudes findet am 28. April 2016 statt.

Leiter des Clusters Photonik ist Prof. Reinhart Poprawe vom Fraunhofer ILT bzw. vom Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University.

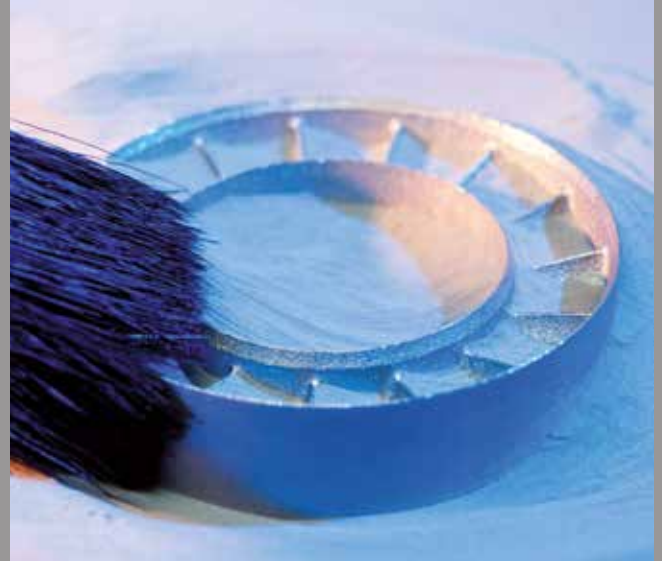
## Ansprechpartner

Cluster Photonik  
 Dipl.-Phys. Christian Hinke  
 Telefon +49 241 8906-352  
 christian.hinke@ilt.fraunhofer.de



- 1 3D-Skizze des »Cluster Photonik«,  
 Quelle: KPF, New York.
- 2 RWTH Aachen Campus II - Melaten,  
 Skizze: rha reicher haase + assoziierte, Aachen.

# DIGITAL PHOTONIC PRODUCTION



## 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-Ultrakurzpuls-Laser 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 als Koordinator eines Antragskonsortiums als einer von 9 Gewinnern aus dem nationalen Wettbewerb hervor. Mehr als 30 Unternehmen und wissenschaftliche Institute arbeiten im Rahmen dieser neuen 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.





### Maßgeschneiderte Produkte in Serie

Die Produktionsbedingungen für Wirtschaftsunternehmen unterliegen wie die Produkte selbst einem ständigen Wandel. Kunden fordern immer komplexere und oft sogar maßgeschneiderte Produkte. Die bestellten Stückzahlen schwanken in einigen Branchen zwischen mehreren Tausend und der Losgröße Eins. Unter dem Druck wirtschaftlicher Optimierung von Geschäftsprozessen sind Konstrukteure und Produktionsverantwortliche heute angehalten, Bauteile so individuell und gleichzeitig so kostengünstig wie möglich auszulegen und zu fertigen. Dies gilt etwa in der Luftfahrt- oder dem Werkzeugbau, wo Gewichtersparnisse zur Reduzierung des Treibstoffverbrauchs sowie die Variantenvielfalt zur Erfüllung der Kundenwünsche immer wichtiger werden. Um Skaleneffekte zu realisieren, werden heute viele Bauteile überdimensioniert. Die Herausforderung besteht in der Auslegung dieser Bauteile auf die tatsächlichen Beanspruchungen, was klassischerweise meist mit einer Erhöhung der Komplexität einhergeht. Digital Photonic Production bietet die Möglichkeit, Bauteile funktionsgerecht zu gestalten, ohne dabei die Produktionskosten zu erhöhen.

So werden beispielsweise in der Medizintechnik auf den jeweiligen Patienten angepasste Implantate benötigt. Dies erfordert komplexere Teile, die darüber hinaus zu vertretbaren Kosten individuell gefertigt werden müssen. Neue Materialien, wie im Körper resorbierbare Werkstoffe, erfordern darüber hinaus eine erhöhte Flexibilität in den Fertigungsverfahren. Ob in der Medizintechnik oder im Flugzeugbau: Teure Bauteile werden überwiegend noch durch konventionelle Verfahren hergestellt. Teilweise erzeugt dies bis zu 90 Prozent Abfall. Neben den vermeidbaren Kosten führt auch der Ruf nach einem nachhaltigen Umgang mit den verfügbaren Ressourcen zu einem Umdenken in der produzierenden Industrie.

### Individualität und Co-Creation

Auch der Endkunde ist heute anspruchsvoller und fordert individuelle Produkte, mit denen er sich von der breiten Masse abhebt. Im Idealfall würde er gerne vor der Bestellung sein Bauteil selbst entwerfen. Auf Herstellerseite führt dies zwangsläufig zu einer Steigerung der Komplexität der Produkte und zu einer höheren Flexibilität in der Fertigung. Die herkömmlichen, meist mechanischen Bearbeitungsverfahren und die standardisierten Produktionsabläufe stoßen hier an ihre Grenzen – sowohl technologisch als auch wirtschaftlich. Auf dem Weg zur vierten industriellen Revolution wachsen Individualisierung und Serienproduktion sowie die gestaltungs-offene virtuelle und die produzierende reale Welt zunehmend zusammen. Das Werkzeug Licht stellt dabei das Bindeglied zwischen diesen beiden Welten dar. Digital Photonic Production bietet dem Kunden die Möglichkeit, aktiv am Gestaltungs- und Produktionsprozess teilzunehmen. Mit Hilfe des Lasers werden am Computer entworfene und optimierte Produkte zu vertretbaren Kosten in Serie produziert.

### From Bits to Photons to Atoms

In der industriellen Praxis steigen die Produktionskosten eines Werkstücks mit seiner Komplexität und seiner Einzigartigkeit. Dieser Scale-Scope-Problematik begegnen die verschiedenen Prozesse der Digital Photonic Production, indem sie zu konstanten Kosten jedes Bauteil als Unikat erstellen – unabhängig von Komplexität und Losgröße. Nur noch das Gewicht des Bauteils und damit der Materialverbrauch bestimmen die Kosten. So werden bei den generativen lasergestützten Fertigungsverfahren Werkstücke unmittelbar aus den vorhandenen CAD-Daten produziert. Das Werkzeug Licht wird flexibel, berührungslos und bauteilspezifisch durch den Computer gesteuert. Die CAD-Information wird mittels Licht auf die Materie übertragen: From bits to photons to atoms.

# FORSCHUNGSERGEBNISSE 2015

## **Ausgewählte Forschungsergebnisse aus den Technologiefeldern des Fraunhofer ILT**

- Laser und Optik 39 - 58
- Lasermaterialbearbeitung 59 - 126
- Medizintechnik und Biophotonik 127 - 136
- Lasermesstechnik und EUV-Technologie 137 - 151

### ***Anmerkung der Institutsleitung***

*Wir weisen explizit darauf hin, dass die Offenlegung der nachfolgenden Industrieprojekte mit unseren Auftraggebern abgestimmt ist. Grundsätzlich unterliegen unsere Industrieprojekte der strengsten Geheimhaltungspflicht. Für die Bereitschaft unserer Industriepartner, die aufgeführten Berichte zu veröffentlichen, möchten wir an dieser Stelle herzlich danken.*

---

## TECHNOLOGIEFELD LASER UND OPTIK

---

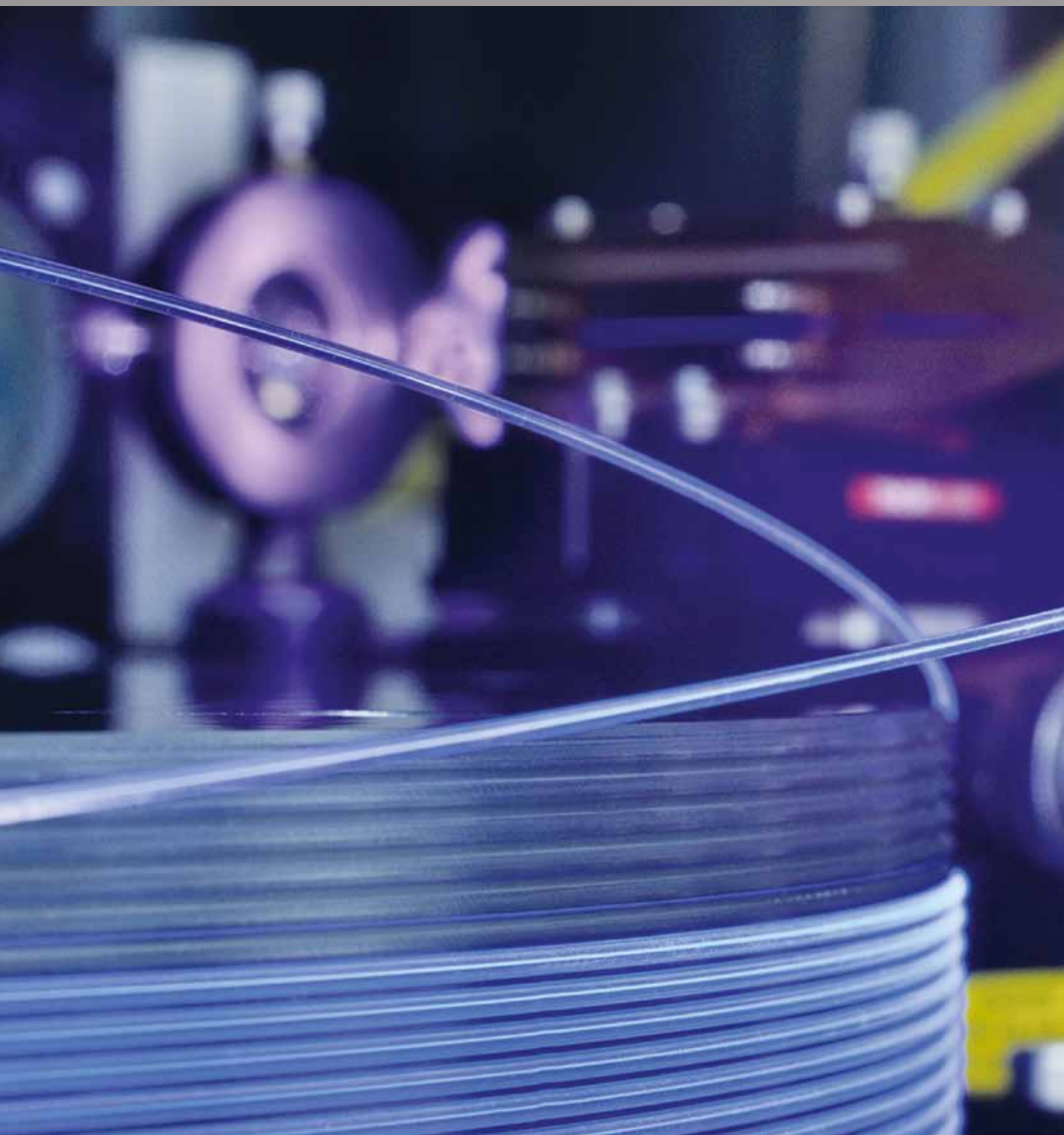
Das Technologiefeld Laser und Optik steht für innovative Laserstrahlquellen und hochwertige optische Komponenten und Systeme. Das Team der erfahrenen Laserexperten entwickelt Strahlquellen mit maßgeschneiderten räumlichen, zeitlichen und spektralen Eigenschaften und Ausgangsleistungen im Bereich  $\mu\text{W}$  bis  $\text{GW}$ . Das Spektrum der Laserstrahlquellen reicht von Diodenlasern bis zu Festkörperlasern, von Hochleistungs-cw-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 der Grundlagenforschung.



## LASER UND OPTIK

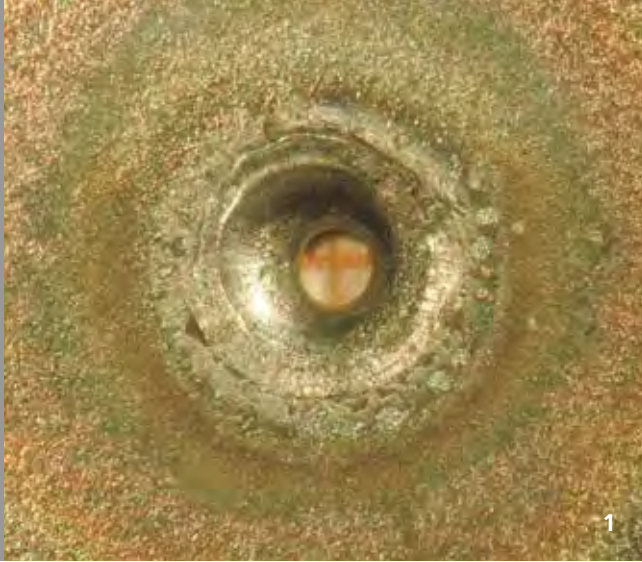


---

## INHALT

---

Laseroptik für das humanitäre Minenräumen	42
Hochleistungsoptiken aus monokristallinem Diamant	43
Fasergekoppeltes Diodenlasermodul mit dichter Wellenlängenüberlagerung	44
Leistungskalierbarer UKP-Verstärker nach dem MULTIROD-Konzept	45
Hybrider 1,5 kW UKP-Laser: Faser – INNOSLAB – Scheibe	46
Kombinierter Piko-/Nanosekunden-Laser	47
Qualifikation einer LIDAR-Strahlquelle für den Betrieb auf einem Helikopter	48
Flugkampagne »CHARM-F«	49
Laser für satellitenbasierte LIDAR-Systeme	50
Labordemonstrator einer LIDAR-Strahlquelle für »MERLIN«	51
Skalierung der Pulsenergie von INNOSLAB-Verstärkern Gütegeschalteter single-frequency	52
Doppelpuls-Oszillator bei 2 $\mu\text{m}$	53
Strahlungstests an $\text{TM}^{3+}$ - und $\text{HO}^{3+}$ -dotierten Fluoridkristallen	54
Gepulste Hochleistungslaser mit adressierbarer Wellenlänge im Infrarot	55
Packaging von Laserkristallen	56
Pockelszellen für den Einsatz in gepulsten Hochleistungsfaserlasern	57
Faraday-Isolator für den Weltraumeinsatz	58



## LASEROPTIK FÜR DAS HUMANITÄRE MINENRÄUMEN

### Aufgabenstellung

In vielen ehemaligen Kriegsgebieten liegen noch lange nach Beendigung der Auseinandersetzungen Minen, Streumunition und Blindgänger im Boden. Dadurch besteht eine hohe Gefährdung der Bevölkerung, und die landwirtschaftliche Nutzung der Gebiete ist stark eingeschränkt. Viele dieser Sprengkörper sind teilweise korrodiert und befinden sich in einem undefinierten Zustand. Eine manuelle Entschärfung ist hier mit einem hohen Risiko verbunden.

### Vorgehensweise

Eine berührungslose Neutralisierung der Sprengkörper kann durch Laserstrahlung aus sicherer Entfernung erfolgen. Durch das Anbohren der Ummantelung kann das Gehäuse geöffnet und die Ladung entzündet werden, so dass der Sprengstoff abbrennt und die Verbrennungsgase ohne Initiierung einer Detonation austreten können.

Für die Fernfokussierung eines beugungsbegrenzten Laserstrahls wurde eine Optik für den Wellenlängenbereich um  $1 \mu\text{m}$  entworfen, mit der aus einer Entfernung von 100 m auf einen Spotdurchmesser kleiner 2 mm fokussiert werden kann. Damit sollen Bohrungen mit einigen mm Durchmesser in die Gehäuse von Antipersonenminen und Blindgängern möglich werden.

1 Laborversuch an einer Stahlplatte mit 1,5 mm Dicke.

2 Prototyp der Fernfokussieroptik auf einem Stativ.

### Ergebnis

In Labortests wurde die Wirkung der Laserstrahlung auf Gehäusematerialien wie Bakelit und Stahlblech untersucht. Je nach Material und Wandstärke werden Laserleistungen zwischen etwa 200 W und 1000 W benötigt, um innerhalb von Sekunden Öffnungen mit einigen Millimetern Durchmesser zu erzeugen (Bild 1).

Die Fernfokussieroptik wurde prototypisch aufgebaut (Bild 2) und wird jetzt im Hinblick auf ihre optische Abbildungsqualität und die zulässige Laserleistung charakterisiert. Damit steht in Kürze eine Optik zur Erprobung des lasergestützten Minenräumens bereit.

### Anwendungsfelder

Die Laserneutralisierung von Minen und Sprengkörpern rechtfertigt den Aufwand dann, wenn eine manuelle Räumung mit einem hohen Risiko verbunden ist. Darüber hinaus kann das lasergestützte Defragmentieren von Sprengkörpern den Zugang an die Zündeinrichtungen ermöglichen oder für geplante Sprengungen die Menge des detonationsfähigen Materials reduzieren.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des EU-Projekts »Demining toolbox for humanitarian mine clearing (D-Box)« unter der Nummer »FP7-Security No. 284996« gefördert.

### Ansprechpartner

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

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



## HOCHLEISTUNGSOPTIKEN AUS MONOKRISTALLINEM DIAMANT

### Aufgabenstellung

In der Lasertechnik geraten konventionelle Optikmaterialien bedingt durch immer größere Leistungsdichten sowie Anforderungen an Leichtbau und Materialbeständigkeit an ihre Grenzen. Der Einsatz von monokristallinem synthetischem CVD-Diamant als Optikmaterial bietet aufgrund des extrem großen Brechungsindex, der hervorragenden Wärmeleitfähigkeit, der großen Härte und Medienbeständigkeit, darunter die Strahlungsresistenz gegenüber kurzwelliger Strahlung, ein einzigartiges Potenzial für zukünftige Hochleistungslaseranwendungen. Während sich multikristalliner Diamant für den langwelligen Bereich (d.h. für CO<sub>2</sub>-Laser) bereits als Optikmaterial etabliert hat, sind refraktive sphärische oder asphärische Optiken aus monokristallinem Diamant auch für den Bereich um 1 µm geeignet, bislang aber nicht kommerziell erhältlich.

### Vorgehensweise und Ergebnisse

Im Rahmen der Fraunhofer-internen marktorientierten Vorlaufforschung »Diamond4Optics« wird in Zusammenarbeit von Fraunhofer ILT, IAF und IPT das Potenzial von Diamant als optisches Material für Laserhochleistungsanwendungen untersucht. Dazu werden monokristalline Diamanten mit Abmessungen bis zu 7 x 7 mm<sup>2</sup> in einem Plasma aus der Gasphase abgeschieden (CVD) und zu sphärischen und asphärischen Optiken zur Strahlführung und -formung verarbeitet. Die synthetischen Diamanten weisen optische Qualität, geringe Doppelbrechung und Absorption auf und können parallel mit Gesamtraten von bis zu 30 µm/h (60 Substrate simultan) abgeschieden werden. Erste Demonstratoroptiken

zeigen im Einsatz bei 2 kW Laserleistung aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit und der geringen Absorption keine Fokusbereicheverschiebung durch thermisch induzierte Brechungsindexgradienten und ermöglichen eine beugungsbegrenzte Fokussierung.

### Anwendungsfelder

Ziel ist die Entwicklung einer Prozesskette von der Auslegung über die Produktion bis hin zu dem Einsatz und der Qualifizierung von optischen Komponenten aus monokristallinem CVD-Diamant für Hochleistungsanwendungen. Durch die Optimierung des Diamantabscheideverfahrens am Fraunhofer IAF entstehen fundamental neue Möglichkeiten für Diamantanwendungen. Die monokristallinen Diamantlinsen zielen auf den Markt der Strahlführungssysteme für Hochleistungslaser mit kurzer Wellenlänge (VIS bis NIR). Die Optiken sollen aufgrund ihrer überragenden mechanischen und optischen Materialeigenschaften zukünftig Einzug in Anwendungen der Lasermaterialbearbeitung, der Weltraumtechnik, der Medizintechnik und der Messtechnik erhalten.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Carlo Holly M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-509  
carlo.holly@ilt.fraunhofer.de

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

- 3 *Sphärische Linse aus monokristallinem Diamant.*
- 4 *Messeinrichtung für Diamantsubstrate in Hochleistungsversuchen.*





## FASERGEKOPPELTES DIODENLASERMODUL MIT DICHTER WELLENLÄNGEN- ÜBERLAGERUNG

### Aufgabenstellung

Dichtes Wellenlängen-Multiplexing (DWDM) ist eine etablierte Technik zur gleichzeitigen Skalierung von Ausgangsleistung und Strahldichte. Im Rahmen des von der EU geförderten Forschungsvorhabens »BRIDLE« werden Konzepte entwickelt, auf deren Basis kompakte Module im mittleren Leistungssegment von 10 W bis 100 W Ausgangsleistung aus einer Faser mit einem Kerndurchmesser von 35  $\mu\text{m}$  und einer N.A. von 0,2 realisiert und erprobt werden.

### Vorgehensweise

Zur Kopplung in niedrig-modige Fasern werden Emitter verwendet, deren Streifenbreite und Strahlparameterprodukt mit 35  $\mu\text{m}$  und 1,8 mm mrad gegenüber dem Stand der Technik reduziert wurden. Ultrasteile dielektrische Kantenfilter, die am Fraunhofer ILT charakterisiert werden, dienen zur Überlagerung bei einem Wellenlängenabstand von 2,5 nm. Die gechirpte Wellenlängenstabilisierung der Minibarren erfolgt sowohl intern als auch extern.

### Ergebnis

Die Strahlung eines Diodenlaserbarrens, bei dem jeder Einzel-emitter auf Chiplevel auf eine eigene Wellenlänge stabilisiert ist, wurde erstmalig überlagert. Das gleiche opto-mechanische Design wurde ebenfalls zur simultanen externen Stabilisierung und Überlagerung verwendet. Dabei auftretende Verlust-mechanismen wurden detailliert analysiert. Bislang wurde mit zwei Barren eine Ausgangsleistung von 26 W aus einer Faser mit 35  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser realisiert. In diesem Leistungsbereich können durch den Einsatz intern stabilisierter Diodenlaser deutlich kompaktere und robustere Systeme bei niedrigeren Kosten als mit den bislang bekannten Konzepten zum DWDM realisiert werden. Zur weiteren Leistungsskalierung in den Bereich von 50 W bis 100 W werden die aufgetretenen Verluste durch Optimierung der Barren, des Optikdesigns und der Montage reduziert sowie eine Polarisationskopplung in den Aufbau integriert.

### Anwendungsfelder

Mit hochbrillanten Quellen mittlerer Ausgangsleistung können zukünftig neue Anwendungsfelder im Bereich des Pumpens breitbandiger Laserkristalle und der additiven Fertigung (z. B. Multi-Spot-SLM) adressiert werden. Darüber hinaus ist eine weitere Leistungsskalierung für das Laserstrahlschweißen möglich.

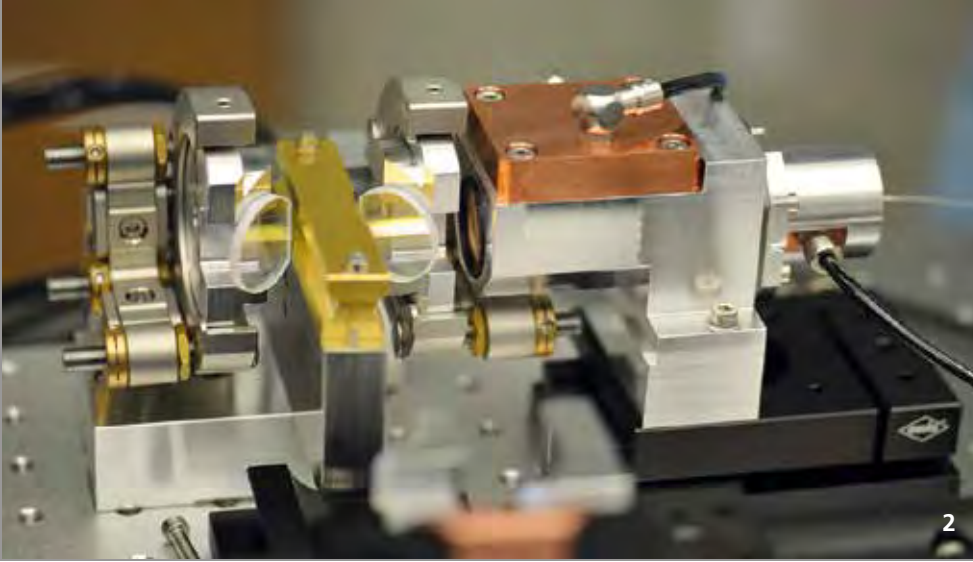
Die Arbeiten wurden im Rahmen des EU-Projekts »BRIDLE« unter dem Förderkennzeichen 314719 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Ulrich Witte  
Telefon +49 241 8906-8012  
ulrich.witte@ilt.fraunhofer.de

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

1 Diodenlasermodul (ohne Faserkopplung).



## LEISTUNGSSKALIERBARER UKP-VERSTÄRKER NACH DEM MULTIROD-KONZEPT

### Aufgabenstellung

Ein linearer Laserverstärker für den Ausgangsbereich unter 200 W, der geeignet ist, ultrakurze Pulse mit Pulsdauern um 700 fs bei beugungsbegrenzter Strahlqualität ( $M^2 < 1,2$ ) bereitzustellen, soll entwickelt werden. Damit kostengünstige Seeder verwendet werden können, soll die Verstärkung mindestens um 100 oder höher liegen. Ohne CPA sollen Pulsenergien von einigen  $\mu\text{J}$  erreicht werden. Die Yb:INNOSLAB-Plattform des Fraunhofer ILT erreicht ihre maximale Wirtschaftlichkeit bei Laserleistungen über etwa 200 W. Deshalb soll ein angepasstes Verstärkerkonzept entwickelt werden.

### Vorgehensweise

Endgepumpte Stablasere stellen eine etablierte Lösung für Ultrakurzpulsverstärker dar. Im Fall von Yb:YAG als Verstärkermaterial ist die mittlere Ausgangsleistung pro Stab auf etwa 20 - 40 W begrenzt. Die Verwendung mehrerer sequentieller Stabverstärker ist ein erprobtes Konzept, das allerdings mit zunehmender Zahl von Laserkristallen aufwendig hinsichtlich der Anzahl der Komponenten und des Justageaufwands wird. Eine Lösung stellt das MULTIROD-Konzept dar, in dem nur ein Slab-förmiger Laserkristall und jeweils eine gemeinsame Optik zur Formung der Strahlenbündel von Pumpquelle und Verstärkerstrahlengang eingesetzt werden. Auf diese Weise kann die Anzahl optischer Komponenten minimiert und eine erhebliche Reduktion der Komplexität erreicht werden. Insbesondere für den Verstärkerstrahlengang kann das Fraunhofer ILT unterschiedliche kundenspezifische Detaillösungen anbieten.

### Ergebnis

Im aufgebauten Demonstrator werden bis zu 7 fasergekoppelte Pumpmodule mit je 50 W Nennleistung bei 940 nm eingesetzt. Verstärkungsfaktoren zwischen 5 und 400 wurden realisiert. Die optische Effizienz beträgt je nach Verstärkung 20 - 40 Prozent. Bei einer Pulsdauer von einer Pikosekunde kann eine Pulsenergie von mehr als 10  $\mu\text{J}$  bei einem B-Integral von 2 ohne CPA erreicht werden. Die maximal demonstrierte Ausgangsleistung beträgt 150 W. Der Laserstrahl ist rotationssymmetrisch (Elliptizität unter 5 Prozent). Bei einer Leistung von 120 W wurde eine Strahlqualität von  $M^2 < 1,12$  gemessen. Der Aufbau ist äußerst kompakt und hat keine Beschränkung der Repetitionsrate zu hohen Pulsfrequenzen.

### Anwendungsfelder

Der MULTIROD-Verstärker ermöglicht es, die Produktivität von Ultrakurzprozessoren für industrielle Anwendungen zu skalieren.

Die diesem Bericht zugrundeliegenden FuE-Vorhaben wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13N11628, 13N12715 sowie im Auftrag der Firmen AMPLITUDE Systems GmbH und ROFIN-BAASEL Lasertech GmbH & Co. KG durchgeführt.

### Ansprechpartner

Jan Schulte M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-371  
jan.schulte@ilt.fraunhofer.de

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

2 Detailansicht des MULTIROD-Verstärkers.





## HYBRIDER 1,5 KW UKP-LASER: FASER – INNOSLAB – SCHEIBE

### Aufgabenstellung

Die Steigerung der mittleren Ausgangsleistung von Ultrakurzpulslasern (UKP-Laser) ist ein Weg, um die Herausforderung wirtschaftlicher Prozessgeschwindigkeiten in der Ultrakurzpulsbearbeitung anzunehmen. Grundlegend neue Möglichkeiten eröffnen sich außerdem durch die Kombination von UKP- und Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.

### Vorgehensweise

In einem Ytterbium-basierten UKP-Laser werden Faser-Oszillatoren und -Vorverstärker kleiner Leistung, INNOSLAB-Verstärker mit hoher Verstärkung und ein Scheibenverstärker mit hoher mittlerer Leistung kombiniert.

Ein kommerzieller UKP-Faserlaser mit 7 W Ausgangsleistung und 400 fs Pulsdauer wird mit zwei INNOSLAB-Verstärkern auf 630 W Ausgangsleistung und  $M^2 = 1,2$  verstärkt. Die nachgeschaltete Scheibenendstufe ermöglicht es, die Leistung in den Multi-kW-Bereich zu erhöhen. Die Verstärkung der dünnen Yb:YAG-Scheibe von ~5 Prozent pro Durchgang erfordert eine mehrfache Faltung der zu verstärkenden Strahlung über die Scheibe. Die entwickelte, kompakte Multipassanordnung ermöglicht 18 Durchgänge der Scheibe bei einem vergleichsweise geringen Gesamtstrahlweg von 22 m. Eine Drehung des Seedstrahls zwischen jedem Durchgang stellt ein Abräumen der Inversion der Scheibe des leicht elliptischen (1:1,2) Seedstrahls sicher.

1 *Detailansicht der Multipassanordnung  
des Scheibenverstärkers.*

### Ergebnis

Mit dem beschriebenen System konnte bei ersten Versuchen eine mittlere Leistung von 1,5 kW erreicht werden. Die Pulsdauer beträgt 710 fs, die Strahlqualität ist  $M^2 = 1,5 \times 2,0$ . Dies ist die bisher höchste erreichte mittlere Leistung eines Ultrakurzpulslasers. Bei einer Pulsrepetitionsrate von 40 MHz entspricht das einer Pulsenergie von 37,5  $\mu$ J. Die Gesamtverstärkung der Scheibenendstufe beträgt zurzeit 2,4 und ist nicht durch die Pumpleistung sondern nur durch die maximale Verstärkung pro Durchgang begrenzt. Durch einen Doppeldurchgang durch die Verstärkeranordnung lässt sich die Leistung theoretisch auf > 3 kW steigern. Die hierfür notwendige Verbesserung der Isolation der Verstärkerstufen untereinander ist in Vorbereitung.

### Anwendungsfelder

Lasersysteme der Leistungsklasse > 1 kW eignen sich für das schadigungsarme Schneiden von Verbundwerkstoffen, den Abtrag von Dielektrika oder das Schwärzen von Metallen und Halbleitern durch Erzeugung von Oberflächenstrukturen. Die Scheibe und das zugehörige Pumpmodul wurden von der Firma TRUMPF Laser GmbH für die Experimente zur Verfügung gestellt.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N11628 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Thomas Sartorius  
Telefon +49 241 8906-615  
thomas.sartorius@ilt.fraunhofer.de

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



## KOMBINIERTER PIKO-/ NANOSEKUNDEN-LASER

### Aufgabenstellung

Mit Nanosekunden- und Pikosekunden-Pulsen strukturierte Metallflächen sollen im Rahmen des europäischen Projekts »EMLACS« untersucht werden. Applikationsziel ist die Verbesserung der Haftung von Beschichtungen, die im Anschluss an die Laserstrukturierung mittels »Cold-Spray-Verfahren« aufgebracht werden bei wirtschaftlichen Flächenraten. Bei diesem Verfahren werden feste Partikel des aufzubringenden Werkstoffs mit etwa 10 - 50  $\mu\text{m}$  Durchmesser hoch beschleunigt, so dass sie beim Auftreffen auf der Oberfläche eine feste, formschlüssige Verbindung bilden. Das aufzubauende, flexible Lasersystem soll vor allem eine gute Vergleichbarkeit der Strukturierungsergebnisse und das Finden vorteilhafter Parameterbereiche ermöglichen.

### Vorgehensweise

Je ein an die Aufgabenstellung angepasster kommerzieller ns- und ps-Laser wird räumlich überlagert, so dass beide Strahlen koaxial liegen und anschließend dieselbe Bearbeitungsoptik nutzen können. Die ps-Quelle hat bis zu 80 W Ausgangsleistung bei 1 MHz Pulsrepetitionsrate und bis zu 80  $\mu\text{J}$  Pulsenergie bei einer Pulsdauer von 12 ps. Die ns-Quelle hat ebenfalls bis zu 80 W Ausgangsleistung bei 100 kHz Pulsrepetitionsrate und bis zu 0,8 mJ Pulsenergie bei einer optionalen Pulsdauer von 1,5 ns oder 8 ns. Vor der Überlagerung wird mittels einer Strahlformungsoptik die Strahlung der beiden Quellen symmetrisiert und hinsichtlich der Propagationsparameter aneinander angepasst.

### Ergebnis

Es steht eine flexible Strahlquelle mit überlagerten Laserpulsen unterschiedlicher Pulsdauer zur Verfügung. In der Grundkonfiguration weisen beide Strahlen denselben Fokussdurchmesser auf. Bei Bedarf kann dieser für beide Strahlen unterschiedlich gewählt werden. Die beiden Strahlquellen können sowohl gleichzeitig gepulst als auch mit einstellbarem zeitlichem Versatz der Laserpulse betrieben werden.

### Anwendungsfelder

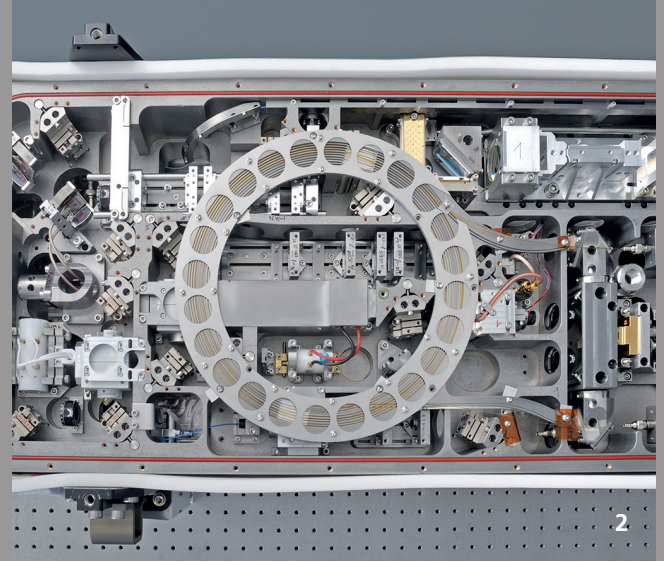
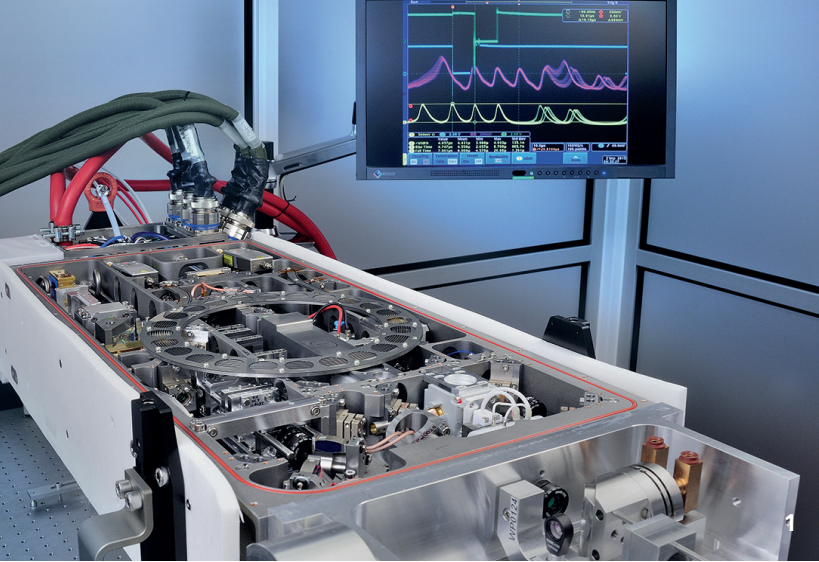
Das aufgebaute System eignet sich für die systematische Untersuchung vorteilhafter zeitlicher und räumlicher Parameterbereiche für Aufgaben im Bereich der Strukturierung von Oberflächen. Da kommerzielle Laserplattformen als Entwicklungsbasis dienen, können sowohl die Einzelstrahlquelle als auch das Gesamtsystem durch den Industriepartner direkt oder in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ILT bereitgestellt werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben »EMLACS« wurde von der Europäischen Union unter dem Förderkennzeichen 606567 durchgeführt.

### Ansprechpartner

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

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



## QUALIFIKATION EINER LIDAR-STRAHLQUELLE FÜR DEN BETRIEB AUF EINEM HELIKOPTER

### Aufgabenstellung

Das Helikopter-basierte LIDAR-System »CHARM®« wird seit einigen Jahren von der Firma Open Grid Europe zur Leckdetektion an Gaspipelines eingesetzt. Das Fraunhofer ILT hat basierend auf dem INNOSLAB-Konzept eine leistungsfähigere Strahlquelle mit 10-fach höherer Pulsrepetitionsrate und weiteren vorteilhaften Eigenschaften – wie einem in weiten Bereichen einstellbaren Doppelpuls-Betrieb – entwickelt und aufgebaut. Der Einsatz auf einem Helikopter erfordert neben einer kompakten, gewichtssparenden Aufbauweise eine hohe Robustheit, sowohl operationell als auch bei Transport und Lagerung. Der Nachweis dieser Eigenschaften wird im Rahmen mehrerer Messkampagnen erbracht.

### Vorgehensweise

Nach Überprüfung der spezifizierten Lasereigenschaften wird zunächst ein belastungsfreier Dauertest in Laborumgebung durchgeführt, bei dem relevante zeitliche, räumliche und energetische Parameter überwacht werden. Anschließend werden mit der Strahlquelle bei einem Dienstleistungsanbieter Vibrations- und Schocktests in allen Raumachsen durchgeführt. Es werden operationelle und nichtoperationelle Belastungsszenarien (d. h. Anregungsfrequenzen und -Bandbreiten, Stöße) simuliert und nach bzw. während der Belastung relevante Laserparameter gemessen.

### Ergebnis

Die Strahlquelle hat alle Tests erfolgreich überstanden und zeigt keine relevanten Änderungen der Strahleigenschaften. Damit wurde die grundsätzliche Eignung für den geplanten Einsatz nachgewiesen. Die Strahlquelle wird nach der Durchführung von Temperaturtests durch den Auftraggeber um einen Frequenzkonverter für die Methan-Detektion ergänzt und anschließend in das CHARM-2 LIDAR-System integriert.

### Anwendungsfelder

Strahlquellen dieses Typs und die eingesetzte Aufbautechnik können für zahlreiche LIDAR-Messaufgaben, zum Beispiel der Messung von Windgeschwindigkeiten, der Detektion von Wasserdampf, Methan, CO<sub>2</sub> sowie der Messung von Schadstoffen aus Industrieanlagen und Verkehr, eingesetzt werden. Diese Applikationen erfordern in der Regel einen mobilen Einsatz mit den damit verbundenen Belastungen der Strahlquelle. Die Ergebnisse sind auch für die Weiterentwicklung von Lasern für den Einsatz in der Industrie und der Medizintechnik relevant.

### Ansprechpartner

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

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

1 LIDAR-Strahlquelle im Testbetrieb.

2 Detailansicht der LIDAR-Strahlquelle.





## FLUGKAMPAGNE »CHARM-F«

### Aufgabenstellung

Im Rahmen des »CHARM-F«-Projekts (CH<sub>4</sub> Airborne Remote Monitoring – Flugzeug) wurden für ein flugzeuggetragenes LIDAR-System zur Vermessung der klimarelevanten Gase CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> zwei Pump Laser auf Nd:YAG-Basis sowie deren Steuerung und Versorgung durch das Fraunhofer ILT entwickelt. Mit den Pump Lasern werden optisch parametrische Konverter des Instituts für Physik der Atmosphäre (DLR-IPA) betrieben. Das LIDAR-System ist speziell für den Betrieb auf dem Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) ausgelegt und soll für die simultane Messung beider Spurengase eingesetzt werden. Das »CHARM-F«-System kann die Gasmenge in einer Säule zwischen Flugzeug und Boden messen.

### Vorgehensweise

Beide Pumpquellen beinhalten je einen Single-Frequency-Oszillator, der mit einer Wiederholrate von 50 Hz Doppelpulspaire von je etwa 30 ns Pulsdauer bei einer Pulsenergie von je 8 mJ bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität liefert. In beiden Systemen werden diese in einer INNOSLAB-Stufe auf 75 mJ hochverstärkt. In dem CO<sub>2</sub>-System werden die Pulse in einer zweiten INNOSLAB-Stufe auf 150 mJ hochverstärkt. Die Versorgung der Pump Laser befindet sich in einem eigenen Rack. Die Konvertierung in die Messwellenlängen von 1645 nm für das CH<sub>4</sub>- und 1572 nm für das CO<sub>2</sub>-System sowie das gesamte Messsystem liegen in der Verantwortung des Projektpartners DLR-IPA. Sowohl Laser als auch Rack sind so ausgelegt, dass sie die Anforderungen an Geräte für den Flugbetrieb im DLR-Jet erfüllen.

### Ergebnis

Im Rahmen der ersten Testflugkampagne im Frühling 2015 konnten in fünf Flügen bei insgesamt 22 Flugstunden mit beiden Systemen erfolgreich Messungen beider Gase über Polen, Italien und Deutschland durchgeführt werden.

### Anwendungsfelder

Das CHARM-F-System wird in Zukunft bei unterschiedlichen Klimaforschungsmissionen zum Einsatz kommen. Derartige Messungen sind ein wichtiger Schritt hin zu satellitengestützten Systemen, wie sie aktuell auch im Rahmen des MERLIN-Vorhabens am Fraunhofer ILT entwickelt werden. Die Technologie kann zudem prinzipiell auch für die Bestimmung anderer atmosphärischer Parameter wie der Windgeschwindigkeit oder der Verteilung anderer Spurengase angepasst werden. Derartige Parameter spielen neben der Klimaforschung z. B. auch bei der Bewertung von Windparkflächen, bei der industriellen Abgasüberwachung oder z. B. bei der Vermessung von Turbinen eine wichtige Rolle.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens »CHARM-F« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung mit dem Förderkennzeichen 01LK0905B sowie des Vorhabens »NIRLI« des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie mit dem Förderkennzeichen 50EE1228 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dr. Jens Löhning  
Telefon +49 241 8906-673  
jens.loehring@ilt.fraunhofer.de

3 Laser und Versorgungsrack im Flugzeug HALO.  
4 Messflug mit Blick auf den Tagebau  
Hambach und Düren.



## LASER FÜR SATELLITEN- BASIERTE LIDAR-SYSTEME

### Aufgabenstellung

Bei der globalen Überwachung von Klimaparametern sollen in Zukunft satellitengetragene LIDAR-Systeme eingesetzt werden. Dafür werden maßgeschneiderte Laserstrahlquellen benötigt, die einen wartungsfreien Betrieb über mehrere Jahre trotz Vibrationslasten und Temperaturschwankungen beim Transport und im Betrieb sicherstellen.

### Vorgehensweise

Um die Anforderungen zu erfüllen, wurde eine optomechanische Aufbaumethode entwickelt, bei der die optischen Komponenten auf Subeinheiten gelötet und diese mit der zentralen Trägerplatte verschraubt werden. Die Justage erfolgt nur im Lot, das gezielt über Stromzufuhr aufgeschmolzen wird. Dieser Arbeitsschritt erfolgt mit Hilfe eines Montageportals. Die Verbindungstechnik stellt eine hohe Stabilität sicher, vermeidet organische Stoffe sowie deren Ausgasungen und ermöglicht komfortabel mehrfache Justage oder Tausch der Komponenten. Um die Machbarkeit nachzuweisen, wird aktuell im Rahmen des Projekts »FULAS« (Future Laser System) ein Technologiedemonstrator aufgebaut.

### Ergebnis

In den FULAS-Demonstrator konnten sowohl Laseroszillator als auch Laserverstärkereinheit erfolgreich integriert werden. Die Eigenschaften der Laserpulse entsprechen oder übertreffen vorangegangene Laborstudien. Optomechanische Subeinheiten wurden vor der Integration in einem Thermalzyklustest qualifiziert.

### Anwendungsfelder

Der erfolgreiche Betrieb des FULAS-Demonstrators ist ein wichtiger Baustein für die Entwicklungslogik ähnlicher Systeme. Auf Basis der FULAS-Plattform wird aktuell die Laserstrahlquelle für das MERLIN-Instrument entwickelt. Im Rahmen der deutsch-französischen MERLIN-Mission ist vorgesehen, einen Satelliten zur Messung globaler Verteilungen des klimarelevanten Gases Methan zu entwickeln. Der Start ist für 2020 geplant.

Die Arbeiten wurden im Rahmen der Vorhaben »Optomech I/II/III« des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie mit den Förderkennzeichen 50EE0904 und 50EE1235 sowie des ESA-Vorhabens »FULAS« mit dem Förderkennzeichen COO-8/09/FF durchgeführt.

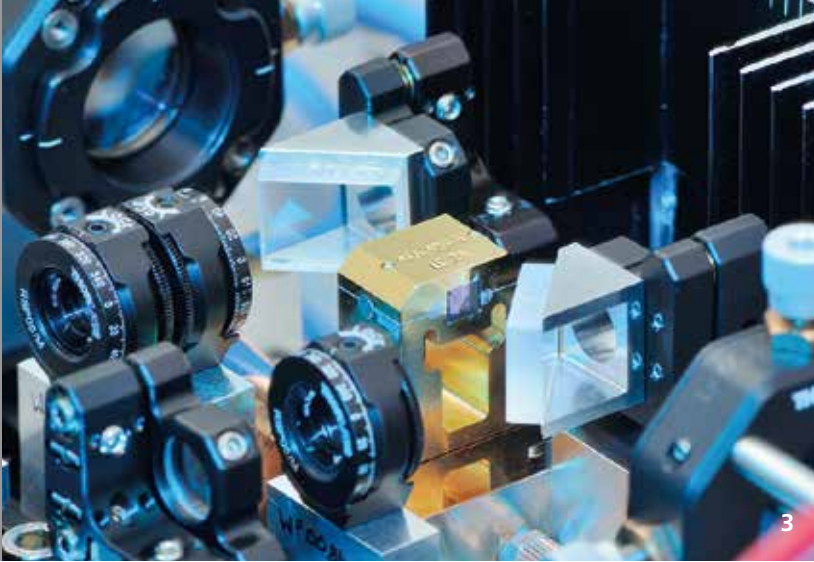
### Ansprechpartner

Dr. Jens Löhring  
Telefon +49 241 8906-673  
jens.loehring@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Jörg Luttmann  
Telefon +49 241 8906-576  
joerg.luttmann@ilt.fraunhofer.de

1 Vorläufiges Design des MERLIN-Lasers.

2 Montageportal.



## LABORDEMONSTRATOR EINER LIDAR-STRAHLQUELLE FÜR »MERLIN«

### Aufgabenstellung

Im Rahmen der deutsch-französischen Klimamission »MERLIN« wird eine Laserstrahlquelle entwickelt, die in einem satellitengestützten LIDAR-System zur globalen Kartierung des klimarelevanten Methans in der Atmosphäre eingesetzt werden soll. Parallel zur Entwicklung des entsprechenden kompakten optomechanischen Aufbaus soll anhand eines Labordemonstrators das optische Konzept validiert werden.

### Vorgehensweise

Die Strahlquelle besteht aus einem diodengepumpten Laser-Oszillator und INNOSLAB-Verstärker auf Nd:YAG-Basis und einem nachgeschalteten OPO zur Erzeugung von Laserpulsen mit 9 mJ Pulsenergie bei der Messwellenlänge von 1645 nm. Zur Erzeugung von Pulsen im longitudinalen Einmodenbetrieb sind sowohl der OPO als auch der Laseroszillator »injection seeded« und aktiv längengeregelt. Der Aufbau wurde mit Standard-Laborkomponenten realisiert und bildet hinsichtlich aller relevanten Designgrößen wie Resonatorlänge, Pumpfleckgröße etc. das aktuelle Optikdesign des späteren Flugmoduls ab.

### Ergebnis

Im Oszillator werden Laserpulse mit Pulsenergien um 5 mJ bei einer Pulsdauer von 16 ns erzeugt, die in der INNOSLAB-Stufe auf 34 mJ verstärkt werden. Diese werden im OPO in Pulse mit 11 mJ bei 1645 nm konvertiert. Die geforderten 9 mJ können bereits aus etwa 28 mJ Pumpenergie erzeugt werden. Die Pulsdauer beträgt dann 11 ns. Die optische Effizienz des

Oszillators liegt bei 28 Prozent, des INNOSLAB-Verstärkers bei 22 Prozent und des OPO bei 32 Prozent. Bislang hat der Gesamtaufbau einen Dauertest von 500 Stunden erfolgreich absolviert. Weitere Tests folgen.

### Anwendungsfelder

Bei dem Risikomanagement in der Entwicklung komplexer Prototypen spielt die Verifikation von optischen Parametern mit Hilfe flexibler Laboraufbauten eine wichtige Rolle. Dies gilt insbesondere für Laserquellen, die hinsichtlich aller optischen Parameter wie Pulsdauer, Pulsenergie, Effizienz, Strahlqualität, spektrale Breite aber auch Masse, Volumen, Stromverbrauch usw. eng budgetiert sind. Die hier verwendete Laserplattform ist flexibel und eignet sich zur Erzeugung von Laserpulsen in einem breiten Parameterfeld.

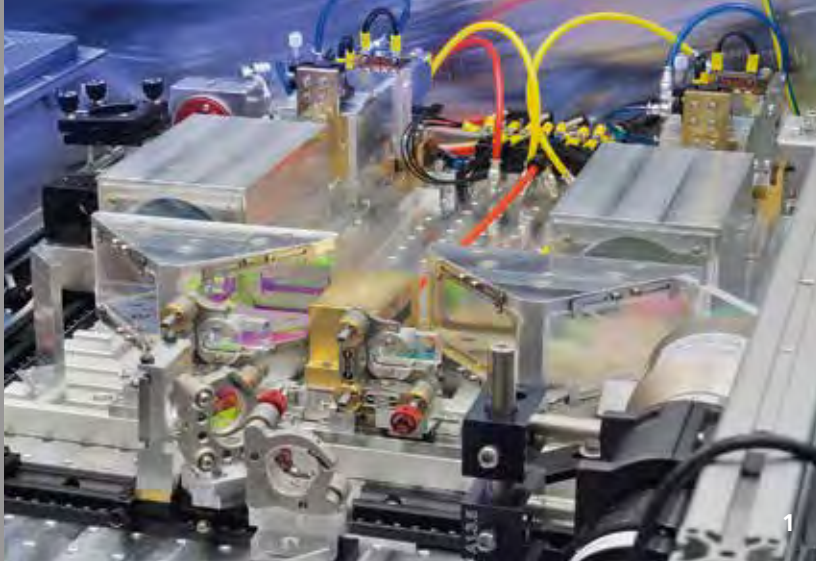
Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben »MERLIN Phase B« wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 50EP1301 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dr. Jens Löhring  
Telefon +49 241 8906-673  
jens.loehring@ilt.fraunhofer.de

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





## SKALIERUNG DER PULSENERGIE VON INNOSLAB-VERSTÄRKERN

### Aufgabenstellung

Bei der Detektion von Spurengasen oder der Messung von Windgeschwindigkeiten in der Atmosphäre mit LIDAR-Verfahren ist das Signal/Rausch-Verhältnis linear von der verfügbaren Laserpulsenergie abhängig. Für satellitengetragene Messsysteme werden typischerweise Pulsenergien von einigen mJ bis zu einigen 100 mJ bei Pulsfrequenzen von ca. 100 Hz und einer an die konkrete Messaufgabe angepassten Wellenlänge angestrebt. Um orts aufgelöste Messungen der Luftsäule bei akzeptablem Signal/Rauschverhältnis zu erreichen, wird bei 1  $\mu\text{m}$  Wellenlänge eine Pulsenergie von mehr als 400 mJ benötigt. Damit eine solche Strahlquelle auf einem Satelliten eingesetzt werden kann, muss sie bei hoher Strahlqualität effizient sein und ein kompaktes und robustes Aufbaukonzept ermöglichen.

### Vorgehensweise

Der Demonstrator einer Oszillator-Verstärkerkette wird ausgelegt und aufgebaut. Zwei INNOSLAB-Verstärkerstufen werden genutzt, um die angestrebte Gesamtverstärkung und Pulsenergie zu erreichen. Die Aufbautechnik des Demonstrators orientiert sich an den Entwicklungen des Fraunhofer ILT zu hochstabilen optomechanischen Komponenten für den Satelliteneinsatz. Das Konzept ist kompatibel zur robusten und kompakten »FULAS«-Plattform (Future Laser System), deren Entwicklung von der ESA für zukünftige satellitengetragene Laser gefördert wird.

### Ergebnis

Der Demonstrator erzeugt longitudinal einmodige Laserpulse mit Pulsenergien von über 500 mJ und bandbreitenlimitierten Pulsdauern von 30 ns bei 100 Hz Pulsfrequenz und einer Wellenlänge von 1064 nm basierend auf Nd:YAG als Laserkristall. Die Pulsenergie wird in nur zwei INNOSLAB-Verstärkerstufen aus 8 mJ Pulsenergie des Oszillators erzeugt. Die optische Effizienz der Kette liegt bei über 22 Prozent. Der Strahl nach dem zweiten Verstärker ist bei maximaler Pulsenergie in beiden Richtungen nahezu beugungsbegrenzt ( $M^2 < 1,5$ ).

### Anwendungsfelder

Nach erfolgreicher Demonstration der Skalierbarkeit der FULAS-Plattform wird die Strahlquelle derzeit unter anderem als Pumpquelle für einen optisch-parametrischen Konverter mit einer Ausgangswellenlänge von 1,65  $\mu\text{m}$  genutzt. Das Gesamtsystem soll zukünftig als Prüflaser für einen Messplatz zur Bestimmung der laserinduzierten Zerstörungsschwelle optischer Komponenten bei 1  $\mu\text{m}$  und 1,65  $\mu\text{m}$  eingesetzt werden.

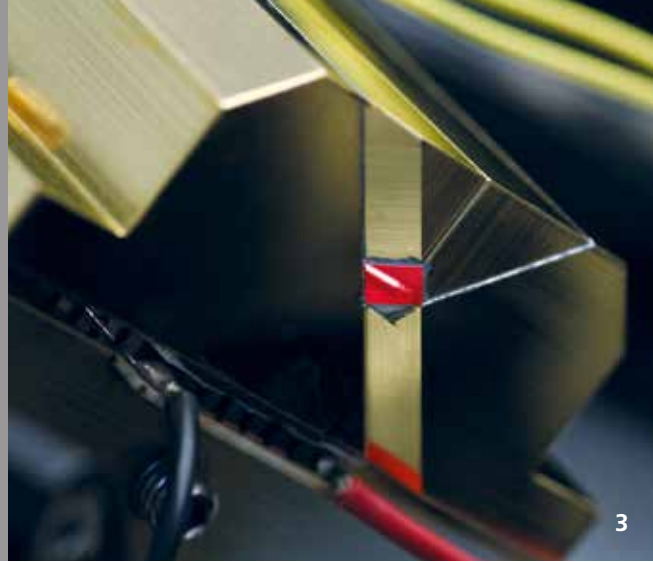
Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 50EE1228 durchgeführt.

### Ansprechpartner

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

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

1 500 mJ INNOSLAB-Verstärker.



## GÜTEGESCHALTETER SINGLE-FREQUENCY DOPPEL- PULS-OSZILLATOR BEI 2 $\mu\text{m}$

### Aufgabenstellung

Laserstrahlquellen im Wellenlängenbereich um 2  $\mu\text{m}$  und mit Pulslängen im Nanosekundenbereich haben viele Anwendungsfelder: Materialbearbeitung, Fernerkundung, Wissenschaft und Medizintechnik machen sich die besonderen Absorptionseigenschaften von 2  $\mu\text{m}$  Strahlung zunutze. Im Rahmen des DLR-Projekts »CHOCLID« und des ESA-Projekts »HOLAS« wird eine gepulste, spektral schmalbandige Strahlquelle mit einer Wellenlänge von 2,051  $\mu\text{m}$  zur Detektion von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre mittels LIDAR-Methoden entwickelt.

### Vorgehensweise

Zur Erzeugung der geforderten Doppelpulse mit 45 mJ und 15 mJ Pulsenergie und einer Repetitionsrate von 50 Hz wurde mittels numerischer Simulationen ein Ho:YLF-MOPA-System auf INNOSLAB-Basis entworfen, das von diodengepumpten Tm:YLF-Lasern gepumpt wird. Im Oszillator sollen Pulse mit einer konstanten Energie von 2 mJ erzeugt werden. Besonderes Augenmerk bei der Auslegung galt der elektrooptischen Effizienz und der Einhaltung kritischer Energiedichten, um eine laserinduzierte Zerstörung von Optiken zu vermeiden.

### Ergebnis

Als Pumpquelle für den Ho:YLF-Oszillator wurde ein Tm:YLF-Stablasers mit einer cw-Leistung von 15 W aufgebaut, welcher abstimbar zwischen 1870 nm und 1892 nm emittiert und dessen Leistung durch die verwendeten Pumpdioden beschränkt ist. Der damit gepumpte Ho:YLF-Oszillator erzeugt

longitudinal einmodige, beugungsbegrenzte Doppelpulse mit einem zeitlichen Abstand von 750  $\mu\text{s}$  bei 50 Hz Wiederholrate, 2 mJ Pulsenergie und mit einer Pulsdauer von 25 ns. Die spektrale Bandbreite beträgt 1 MHz (RMS) und das Zeit-Bandbreite-Produkt ist mit ca. 0,44 bandbreitenbegrenzt. Bei Einzelpulsen mit einer Wiederholrate von 100 Hz werden 11 mJ erzielt. Das Testen bei hohen Pulsenergien zeigt, dass beim Arbeitspunkt von 2 mJ ein großer Abstand zur Zerstörschwelle besteht.

### Anwendungsfelder

Außer als Master-Oszillator für die folgenden Verstärker kann der Oszillator in der Materialbearbeitung eingesetzt werden. Die Ausgangswellenlänge von 2  $\mu\text{m}$  ist weiterhin vorteilhaft für die Anwendung als Pumpquelle effizienter optisch-parametrischer Frequenzkonverter für den langwelligen Infrarot-Spektralbereich.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 50EE1222 durchgeführt.

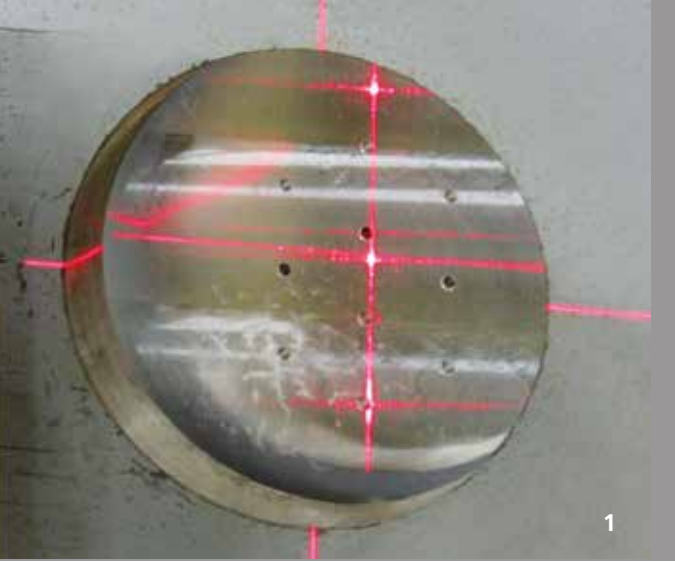
### Ansprechpartner

Philipp Kucirek M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8108  
philipp.kucirek@ilt.fraunhofer.de

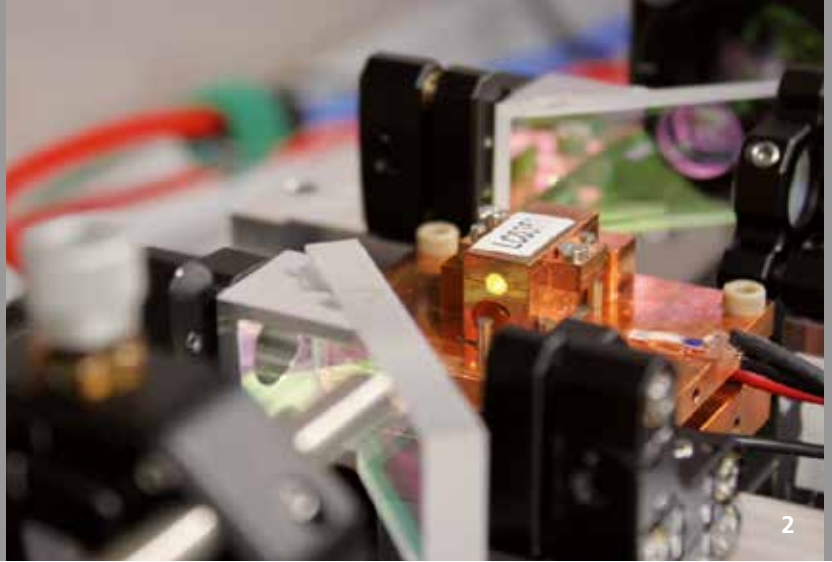
Dipl.-Phys. Marco Höfer  
Telefon +49 241 8906-128  
marco.hoefler@ilt.fraunhofer.de

2 Tm:YLF-Stablasers.

3 Ho:YLF-Oszillator.



1



2

## STRAHLUNGSTESTS AN $\text{Tm}^{3+}$ UND $\text{Ho}^{3+}$ -DOTIERTEN FLUORIDKRISTALLEN

### Aufgabenstellung

Für die globale und dauerhafte Vermessung von  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in der Atmosphäre sind satellitenbasierte LIDAR-Systeme geeignet. Ein mögliches Konzept für die Laserstrahlquelle eines solchen Systems ist ein Festkörperlaser mit einer Emissionswellenlänge von 2051 nm basierend auf  $\text{Tm}^{3+}$ - und  $\text{Ho}^{3+}$ -dotierten Laserkristallen verschiedener Stöchiometrie. Zu diesen Kristallen gibt es bislang noch keine publizierten Studien bezüglich ihrer Strahlungshärte gegenüber Protonen- und Gammabestrahlung.

### Vorgehensweise

Verschiedene Kristallproben aus YLF und LLF mit  $\text{Tm}^{3+}$ - oder  $\text{Ho}^{3+}$ -Dotierung und  $\text{Ce}^{3+}$ -Kodotierung werden mit Protonen und Gammastrahlen entsprechend einem gegebenen Missionsszenario bestrahlt. Die strahlungsinduzierten Verluste für die einzelnen Prüflinge werden auf verschiedenen Wegen ermittelt: Vor und nach der Bestrahlung werden Transmissionspektren der Prüflinge gemessen. Außerdem wird ein Test-Laseroszillator aufgebaut und alle Prüflinge vor und nach der Bestrahlung in diesem Oszillator als Lasermedium eingesetzt. Die Laserschwellen und Steigungseffizienzen vor und nach der Bestrahlung werden für jeden einzelnen Prüfling gemessen und daraus strahlungsinduzierte Verluste berechnet.

### Ergebnis

Strahlungsinduzierte Transmissionsverluste in der Größenordnung von bis zu 7 Prozent/cm für  $\text{Ho}^{3+}$ -dotierte und 2 Prozent/cm für  $\text{Tm}^{3+}$ -dotierte Prüflinge werden im Spektralbereich  $< 1000 \text{ nm}$  bei zehnfacher Missionsdosis gemessen. Bei der nominalen Missionsdosis sowie im Spektralbereich um  $2 \mu\text{m}$  werden im Rahmen der Messfehler (Detektionsgrenze ca. 0,6 Prozent/cm) keine strahlungsinduzierten Verluste gemessen. Die Kodotierung mit Cer begünstigt zusätzlich in  $\text{Ho}:\text{LLF}$  die Strahlungshärte.

### Anwendungsfelder

Die Ergebnisse zeigen, dass  $\text{Tm}^{3+}$  und  $\text{Ho}^{3+}$ -dotierte YLF- und LLF-Kristalle in strahlungsintensiven Umgebungen eingesetzt werden können. Neben der Luft- und Raumfahrt kommen beispielsweise auch Teilchenbeschleuniger in Betracht.

Das Projekt wurde von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) gefördert.

### Ansprechpartner

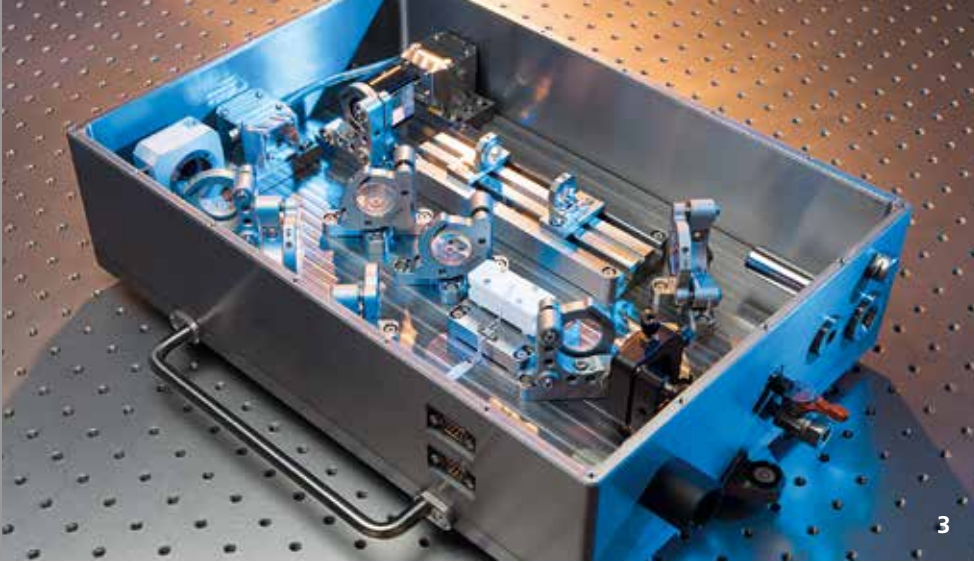
Dipl.-Phys. Ansgar Meissner  
Telefon +49 241 8906-8232  
ansgar.meissner@ilt.fraunhofer.de

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

1 Prüfling im Test-Laseroszillator.

2 Aufbau für die Protonenbestrahlung.





## GEPULSTE HOCHLEISTUNGS- LASER MIT ADRESSIERBARER WELLENLÄNGE IM INFRAROT

### Aufgabenstellung

Viele technisch und wirtschaftlich interessante Materialklassen weisen im IRB ( $\lambda = 1,5 - 3,5 \mu\text{m}$ ) eine deutlich ansteigende Absorption auf. Der Zahl innovativer Applikationsideen, die dies ausnutzen würden, steht ein Mangel an hinreichend leistungsstarken Kurzpulslasern in diesem Wellenlängenbereich gegenüber.

### Vorgehensweise

Auf Basis periodisch gepulster, nichtlinear optischer Kristalle werden am Fraunhofer ILT optisch parametrische Generatoren (OPG) für die Erzeugung prozessangepasster Laserwellenlängen im IRB entwickelt. Als Treiberlaser werden dabei etablierte Laserplattformen mit einer Ausgangswellenlänge um  $1 \mu\text{m}$  eingesetzt. Im OPG wird die kurzwellige Strahlung des Treiberlasers beim einfachen Durchgang durch den nichtlinear optischen Kristall in zwei langwellige Strahlungsfelder (Signal- und Idlerwelle) konvertiert. Durch Manipulation der sog. Phasenanpassung, z. B. mittels Heizen des nichtlinearen Kristalls, kann das Wellenlängenpaar von Signal- und Idlerwelle durchgestimmt werden. Das optische Design des Konverters kann an Pulsdauern von Femto- bis Nanosekunden angepasst werden. Durch Seeden mit einem kontinuierlichen, leistungsschwachen Strahlungsfeld kann die Emissionsbandbreite des Konverters optional gezielt auf spezielle Applikationsanforderungen abgestimmt werden.

### Ergebnis

Auf Basis von OPG wurden am Fraunhofer ILT im Wellenlängenbereich zwischen  $1,6 \mu\text{m}$  und  $3,0 \mu\text{m}$  Ausgangsleistungen bis über  $20 \text{ W}$  mit Pulsdauern zwischen  $900 \text{ fs}$  und  $1,5 \text{ ns}$  realisiert. Aktuelle Projekte adressieren die Leistungsskalierung auf mehr als  $50 \text{ W}$ . Für den Einsatz als Testsystem in verschiedenen Applikationsversuchen ist das experimentelle Setup als eigenständige, staubdicht gekapselte Box gestaltet. Durch variable Optiksätze kann der Konverter an die Strahleigenschaften verschiedener Treiberlaser angepasst werden und so eine große Bandbreite verschiedener Applikationsparameter bereitstellen.

### Anwendungsfelder

Die vorgestellte Lösung ermöglicht erste Machbarkeitsuntersuchungen für ein breites Anwendungsspektrum von wellenlängenflexiblen IRB-Lasern mit kurzen Pulsen. Darüber hinaus ermöglicht sie die kommerzielle Bereitstellung von innovativen, prozessoptimierten Strahlparametern im IRB auf Basis etablierter  $1 \mu\text{m}$ -Laserplattformen, wenn angepasste Spezialquellen noch nicht verfügbar sind oder deren Entwicklung aufgrund eines limitierten Marktvolumens nicht wirtschaftlich ist.

### 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

3 Konverterbox für Applikationsuntersuchungen mit IRB-Wellenlängen.



## PACKAGING VON LASERKRISTALLEN

### Aufgabenstellung

Die stetige Entwicklung von Festkörperlasern stellt insbesondere das Packaging der einzelnen Komponenten vor immer neue Aufgaben. Laserkristalle verschiedenster Formen und Materialien müssen dazu robust, spannungsfrei und thermisch stabil fixiert werden.

### Vorgehensweise

Zur Verbindung von Laserkristallen mit speziell abgestimmten Wärmesenken werden zunehmend die am Fraunhofer ILT etablierten Reflow-Löttechniken eingesetzt. Dazu werden mittels PVD-Verfahren (physical vapour deposition) erzeugte Lötsschichten genutzt, um die Kristalle spannungsfrei und mit niedrigem thermischen Widerstand anzubinden. Bei besonders großen Abmessungen müssen zunächst angepasste Lötparameter wie z. B. Durchwärmzeiten sowie Heiz- und Kühlraten ermittelt werden.

### Ergebnis

Die Reflowlöttechnik eignet sich neben typischen Laserkristallen (z. B. Nd:YAG, 5 mm x 5 mm x 10 mm) auch für spezielle stab- oder quaderförmige Geometrien. Es konnten Nd:YAG-Kristalle mit den Abmessungen 45 mm x 40 mm x 9 mm verlötet werden. Messungen im Polarisationsmessgerät zeigten vernachlässigbar geringe Verspannungen im Inneren des Kristalls.

### Anwendungsfelder

Im Rahmen des »Nirli«-Projekts (»NIR Laserstrahlquelle hoher Pulsenergie als Technologie-Demonstrator und LIDT-Prüfquelle«) wurde ein Demonstrator mit zwei INNOSLAB-Verstärkerstufen aufgebaut. In der zweistufigen Slab-Anordnung werden Pulsenergien von über 500 mJ bei einer Wiederholrate von 100 Hz bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität erzeugt.

Das Lötverfahren kann auf unterschiedliche Kristallmaterialien und -geometrien angepasst werden und findet vor allem auch bei Lasern hoher mittlerer Leistung Anwendung. Das Lötverfahren lässt sich auf andere Komponenten wie Spiegel, Linsen oder auch nichtlineare Kristalle übertragen.

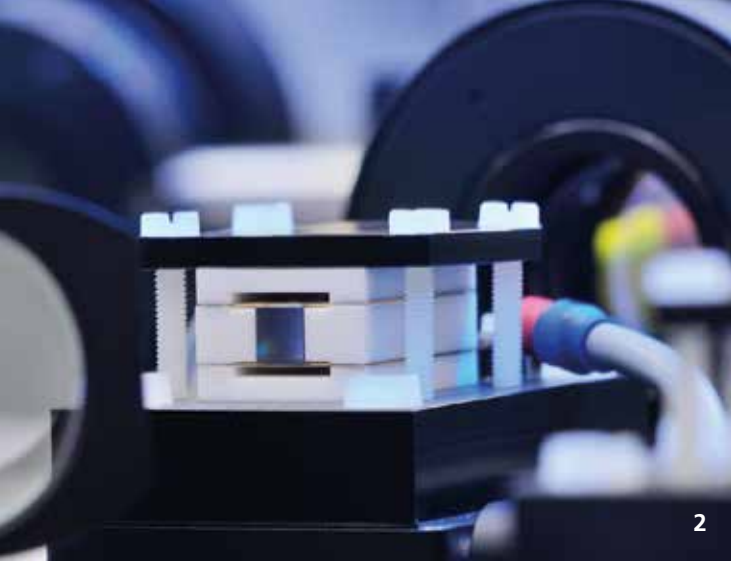
Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 50EE1228 durchgeführt.

### Ansprechpartner

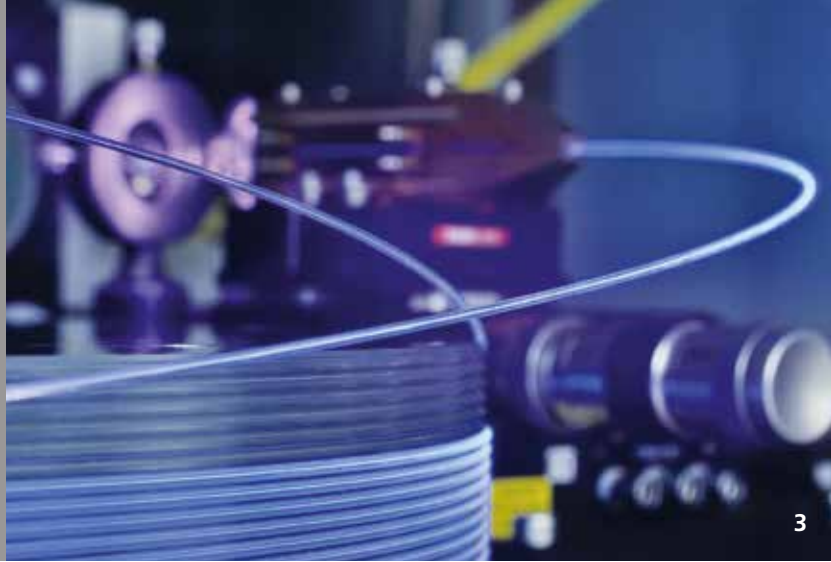
Dipl.-Ing. (FH) Matthias Winzen  
Telefon +49 241 8906-173  
matthias.winzen@ilt.fraunhofer.de

Dr. Jens Löhring  
Telefon +49 241 8906-673  
jens.loehring@ilt.fraunhofer.de





2



3

## POCKELSZELLEN FÜR DEN EINSATZ IN GEPULSTEN HOCHLEISTUNGSFASERLASERN

### Aufgabenstellung

Am Fraunhofer ILT wurden mechanisch und thermisch stabile kleberfreie Pockelszellen für satellitenbasierte LIDAR-Systeme für die Atmosphärenforschung entwickelt, bei denen die Kristalle in ihre Halterung gelötet sind. Dabei kann im Gegensatz zu kommerziell verfügbaren Pockelszellen durch den Einsatz der Löttechnologie auf Elastomerkontakte und Kleber verzichtet werden, so dass sie auch für Hochleistungsanwendungen mit mittleren Leistungen in der Kilowatt-Klasse geeignet sind. Im Rahmen eines BMBF-Projekts sollen die am Fraunhofer ILT entwickelten Pockelszellen jetzt als Güteschalter in einem gepulsten Hochleistungsfaserlaser verwendet werden.

### Vorgehensweise

Für den Einsatz in einem gepulsten Faserresonator müssen die Güteschalter aufgrund der hohen Verstärkung pro Durchlauf im Repetitionsratenbereich von 10 bis 100 kHz ein hohes Kontrastverhältnis aufweisen. Da das effektive Kontrastverhältnis durch piezoelektrische Schwingungen des Pockelszellenkristalls beeinflusst werden kann, wurde ein optischer Messplatz realisiert, mit dem das statische Kontrastverhältnis und der optische Einfluss der piezoelektrischen Schwingungen unterschiedlicher Pockelszellen getestet werden können.

### Ergebnis

Bei den gelöteten Pockelszellen konnte ein extrem hohes Kontrastverhältnis im spannungsfreien Zustand von ca. 43 dB (1:20.000) gemessen werden. Bei den getesteten Pockelszellen konnte durch die Lotanbindung der Kristalle eine deutliche Verringerung der piezoelektrischen Schwingungen im Bereich der Resonanzfrequenzen im Vergleich zu kommerziell verfügbaren Pockelszellen gemessen werden.

### Anwendungsfelder

Mit den gelöteten Pockelszellen konnte ein gütegeschalteter Multimode-Faserlaser mit einer mittleren Ausgangsleistung von 500 W und Pulsdauern um 100 ns demonstriert werden.

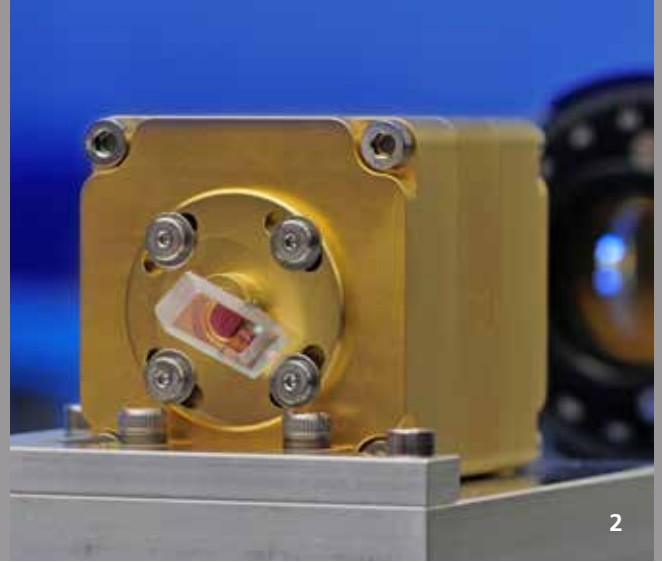
Diese Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N12930 sowie durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 50EE1235 gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Martin Giesberts  
Telefon +49 241 8906-341  
martin.giesberts@ilt.fraunhofer.de

Dr. Jens Löhring  
Telefon +49 241 8906-673  
jens.loehring@ilt.fraunhofer.de

- 2 *Gelötete Pockelszelle.*
- 3 *Aktive Multimodefaser des gepulsten Faserlasers.*



## FARADAY-ISOLATOR FÜR DEN WELTRAUMEINSATZ

### Aufgabenstellung

Auf Satelliten eingesetzte Lasersysteme (z. B. im Bereich der Atmosphärenforschung) erfordern mechanisch und thermisch stabile sowie ausgasungsfreie Optikkomponenten. Die Montage von TGG-Kristallen in Faraday-Isolatoren ist aufgrund mechanischer Verspannungen und daraus resultierender Doppelbrechung anspruchsvoll. Kommerziell verfügbare Isolatoren sind hinsichtlich Stabilität und Ausgasungsverhalten ungeeignet. Aus diesem Grund soll die Montage der TGG-Kristalle durch ein Lötverfahren erfolgen. Für den Weltraumeinsatz ist durch Tests nachzuweisen, dass die Komponenten für den Einsatz unter den entsprechenden Umweltbedingungen (Vibrationen von  $14 g_{\text{rms}}$ , thermische Wechsellasten von  $-30\text{ °C}$  bis  $+50\text{ °C}$ ) geeignet sind.

### Vorgehensweise

Ein TGG-Kristall wird in einen Halter aus Aluminium eingelötet. Um die mechanischen Spannungen im Kristall zu reduzieren, kommt ein Weichlot zum Einsatz. Weiterhin werden die Verspannungen durch die Geometrie der Lötverbindung reduziert. Im gleichen Montageschritt wird ein Polarisator auf den Kristallhalter gelötet. Anschließend wird ein zweiter Polarisator auf das Gegenstück des Halters mittels Lot montiert. Danach können der Kristallhalter und sein Gegenstück im kleberfreien

Magnetfeld platziert werden. Die Justage der Polarisatoren auf maximale Dämpfung bzw. maximale Transmission findet anschließend über eine Schraubverbindung statt.

### Ergebnis

Die Isolatoren erreichen einen Isolationsgrad von mehr als 34 dB und eine Einfügedämpfung von kleiner 0,2 dB. Nach Umwelttests an einzelnen Exemplaren zeigen sich keine Änderungen. Die gelöteten Kristalle weisen kleinere mechanische Spannungen als geklebte Baugruppen auf. Zur Ermittlung des Potenzials der Löttechnologie finden im nächsten Schritt Langzeituntersuchungen statt.

### Anwendungsfelder

Die mit dem beschriebenen Verfahren aufgebauten Faraday-Isolatoren eignen sich neben Raumfahrtanwendungen insbesondere für industrielle Festkörperlaser-Systeme, bei denen Ausgasung und laserinduzierte Kontamination eine wichtige Rolle spielen. Dies gilt insbesondere für Ultrakurz- und UV-Laser.

Teile der Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie im Rahmen des FuE-Vorhabens »OPTOMECH III« unter dem Förderkennzeichen 50EE1235 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dr. Heinrich Faidel  
 Telefon +49 241 8906-592  
[heinrich.faidel@ilt.fraunhofer.de](mailto:heinrich.faidel@ilt.fraunhofer.de)

Dr. Jens Löhring  
 Telefon +49 241 8906-673  
[jens.loehring@ilt.fraunhofer.de](mailto:jens.loehring@ilt.fraunhofer.de)

1 Gelötete Optiken des Faraday-Isolators.

2 Faraday-Isolator im Messaufbau.

---

## TECHNOLOGIEFELD LASERMATERIALBEARBEITUNG

---

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.

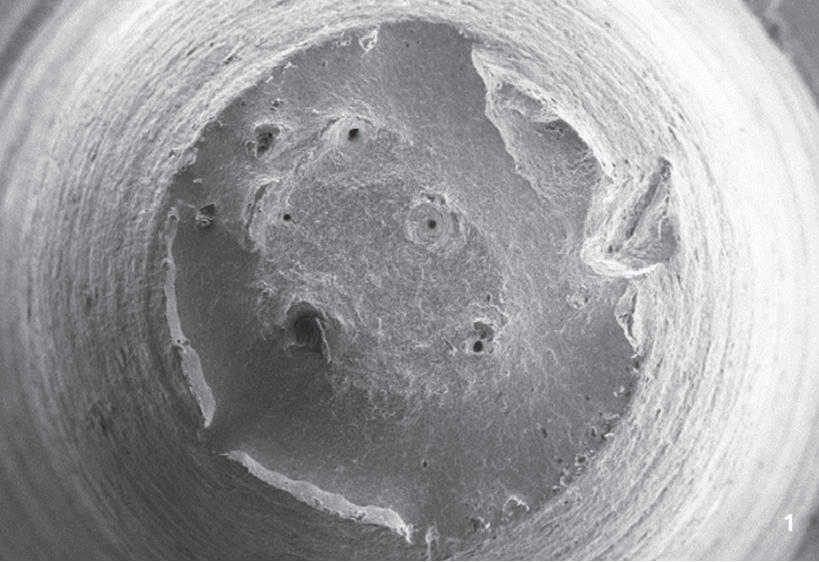
Der Kunde erhält somit laserspezifische Lösungen, die Werkstoff, Produktdesign, Konstruktion, Produktionsmittel und Qualitätssicherung mit einbeziehen. Das Technologiefeld spricht Laseranwender aus unterschiedlichen Branchen an: vom Maschinen- und Werkzeugbau über Photovoltaik und Feinwerktechnik bis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

# LASERMATERIALBEARBEITUNG



Verarbeitung von Einsatz- und Vergütungsstählen mittels SLM	62	Transfer des Selective Laser-Induced Etching-Prozesses	
Herstellung von Werkzeugen aus 1.2709 mittels High Power	63	auf neue Materialien	98
Selective Laser Melting – HP-SLM		Laserstrahlbohren von CFK-Preforms	99
Leitschaufel-Prototypen für die Produktentwicklung	64	Modulare Wendelstrahloptik	100
Einfluss der Schutzgasführung auf die Bauteilqualität beim SLM	65	Muschelausbruchfreie Laserbearbeitung von Spiegelsubstraten	
Optiksystem für das Hochleistungslasersintern	66	zur geometrischen Separation von Strahlenbündeln	101
Prozesssimulation zum Selective Laser Melting	67	Interaktive Simulation des Bohrens mit Laserstrahlung	102
Modulare Benchmark-Software für das Selective Laser Melting (SLM)	68	Simulation der zeitlichen Evolution der Bohrungskontur	
Nachbearbeitung von SLM-gefertigten Bauteilen	69	beim Bohren mit Laserstrahlung	103
Laserpolieren von SLM-gefertigten 3D-Bauteilen	70	Simulation der asymptotischen Bohrungskontur	
Reduzierung der Oberflächenrauheit von SLM- Bauteilen		beim Bohren mit Laserstrahlung	104
mittels modulierter Laserstrahlung	71	Laserstrahlmikroschweißen zur Kontaktierung	
Goldkontaktierung mit Inline-Qualitätskontrolle	72	von Lithium-Ionen-Zellen	105
Online-Schichtdickenmessung durch integriertes	73	Gezielte Beeinflussung der Nahtgeometrie	
Interferometer Online Monitoring INCLAD-Prozess	74	beim Laserstrahlmikroschweißen	106
Additive Fertigung einer Triebwerksaufhängungskomponente		Schnelle Temperaturfeldberechnung beim Mikroschweißen	107
mittels LMD	75	Simulation der Nahtform für das Schweißen	
»Multi-BLIR«-Reparatur durch Laserauftragschweißen	76	mit örtlicher Leistungsmodulation	108
Roboterbasiertes Laserauftragschweißen mit CAD/CAM-Kopplung	77	Laserbonden in der Batterietechnik	109
Automatisierte Vermessung von Pulverdüsen	78	Laser-Impuls-Schmelzbonden	110
Additive Fertigung im Werkzeug- und Automobilbau		Glasfritbonden – Ein Verfahren für Mikro- und Makroanwendungen	111
mit LMD und SLM	79	Laserprozesse in der Kunststoffbearbeitung	112
Intrinsische Wärmebehandlung bei der additiven Fertigung	80	Verkapselung durch Laserschweißen	
Additive Fertigung mit Eisenaluminid-Legierungen	81	von Multilayer-Kunststofffolien	113
Funktionsangepasste Bauteile durch Werkstoffgradierung	82	Quasi-Simultanschweißen absorberfreier Thermoplaste	114
Schutzschichten aus Wolfram für Hochtemperaturanwendungen	83	Form- und stoffschlüssiges Fügen von CFK und GFK	115
Datenbank zum Laserauftragschweißen	84	Schweißen hochmanganhaltiger Stähle in artungleichen	
Laserumschmelzstrukturierung (LUST) auf CoCr28Mo	85	Verbindungen	116
Laserformkorrektur von Optiken	86	Sensitivierung in der Schweißzone pressgehärteter	
Laserbasierte Vorbehandlung metallischer Oberflächen		martensitischer Chromstähle	117
zur Erhöhung der Haftung	87	Reparatur von Triebwerkskomponenten	
Funktionalisierung warmaushärtender Lacke mit VCSEL	88	durch Laserstrahlschneiden und -schweißen	118
Elektronische Multi-Materialsysteme für bauteilverbundene Sensorik	89	In-Situ-Prozessdiagnose beim Laserstrahlschmelzschnneiden	119
Laserbasiertes Inline-Verfahren zur Trocknung		Simulation der Gasströmung für die Besäumschnitt-In-Situ-Diagnose	120
von Batterieelektrodenschichten	90	Beeinflussung des Laserstrahlschneidens durch Strahlformung	121
Laserstrukturieren und Laserschneiden von Solid-State-Batterien	91	Prozessoptimierung des Laserstrahlschneidens	
Strukturieren dünner Schichten im Rolle-zu-Rolle-Verfahren	92	mit dem Simulationstool »CALCut«	122
Werkzeugstrukturierung für hydrophobe Bauteile	93	Hochgeschwindigkeitsschneiden von Langlocharrays	
Hochrate-UKP-Abtrag durch zweistufige Prozessführung	94	im Sub-Millimeterbereich	123
Multistrahlbearbeitung	95	Formschneiden spröder Carbonmaterialien	124
Hochproduktive UKP-Laserbearbeitung mit Multistrahloptiken	96	Laserschneiden von CFK	125
Pump-Probe-Mikroskopie bei der Bearbeitung von Glas		Dispersionsfreie, kontinuierliche Aufweitung	
mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung	97	von Hochleistungslaserstrahlung	126





## VERARBEITUNG VON EINSATZ- UND VERGÜTUNGS- STÄHLEN MITTELS SLM

### Aufgabenstellung

Das Selective Laser Melting (SLM) gehört zu den additiven Fertigungstechnologien und hat sich durch die Möglichkeit, hochkomplexe Geometrien aus metallischen Werkstoffen herzustellen, in der Fertigungstechnik etabliert. Um die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens zu erweitern, liegen die Forschungsschwerpunkte zurzeit u. a. bei der Steigerung der Wirtschaftlichkeit und der Erweiterung des Spektrums der verarbeitbaren Werkstoffe. Zu den bisher nicht mit SLM verarbeiteten Werkstoffen gehören der Einsatzstahl 16MnCr5 und der Vergütungsstahl 42CrMo4, die vor allem im Automobil- und Maschinenbau verwendet werden. Diese gelten als rissanfällig und somit schwer schweißbar. Ziel der Entwicklungsarbeit ist die Ermittlung stabiler Verfahrensparameter für die rissfreie und möglichst defektfreie Verarbeitbarkeit dieser Werkstoffe, um die Vorteile des Fertigungsverfahrens wie Geometriefreiheit und Topologieoptimierung optimal zu nutzen.

### Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT wird die Verarbeitbarkeit dieser beiden Werkstoffe mittels SLM untersucht. Zu diesem Zweck werden zunächst die prozessbedingten Parameter in Zusammenhang mit einer Vorheizstrategie angepasst. Das in die Anlagentechnik integrierte Vorheizsystem ermöglicht durch eine

Vorheiztemperatur von etwa 500 °C eine starke Reduzierung der thermischen Gradienten und Spannungen. In einem zweiten Schritt werden die entstandenen Gefüge untersucht und die mechanischen Kennwerte im Zugversuch ermittelt.

### Ergebnis

Durch die erfolgreichen Versuchsreihen kann die Verarbeitung der Werkstoffe 16MnCr5 und 42CrMo4 im Labormaßstab nachgewiesen werden. Die Anpassungen der Verfahrensparameter ermöglichen einen rissfreien Aufbau von Probekörpern mit einer Dichte von nahezu 100 Prozent.

In weiteren Schritten wird eine passende Wärmebehandlung ermittelt und die Vorwärmtemperatur reduziert, um die Parameterübertragung auf konventionelle Anlagen anzustreben.

### Anwendungsfelder

Durch die Vorteile der Topologieoptimierung und der Funktionsintegration bieten sich Einsatzbereiche vor allem im Automobil- und Maschinenbau an. Mögliche Anwendungen sind Getriebekomponenten, Zahnräder und Nockenwellen.

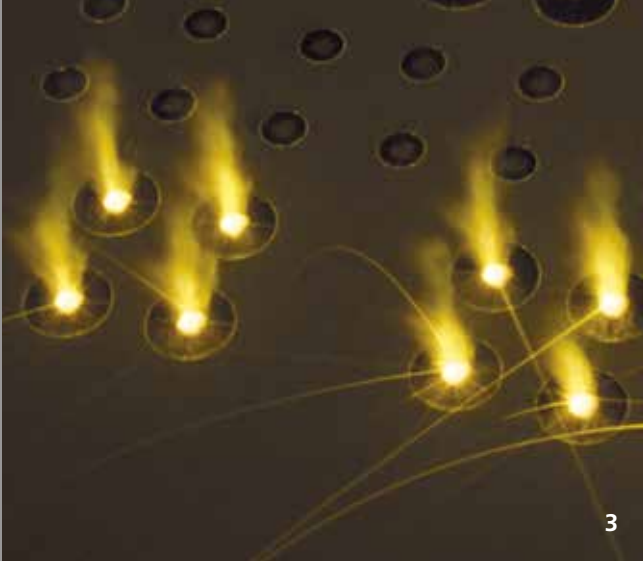
### Ansprechpartner

Dawid Ziebura M.Eng.  
Telefon +49 241 8906-8172  
dawid.ziebura@ilt.fraunhofer.de

Dr. Wilhelm Meiners  
Telefon +49 241 8906-301  
wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de

1 Bruchstelle einer Zugprobe aus 16MnCr5.

2 Schliffbild einer Zugprobe aus 16MnCr5.



## HERSTELLUNG VON WERKZEUGEN AUS 1.2709 MITTELS HIGH POWER SELECTIVE LASER MELTING – HP-SLM

### Aufgabenstellung

Der martensitaushärtende Werkzeugstahl 1.2709 (X3NiCo-MoTi18-9-5) wird in der kunststoffverarbeitenden Industrie aufgrund seiner ausgeprägten mechanischen Festigkeit und Zähigkeit zur Herstellung von Werkzeugformen mit komplexen Freiformflächen in geringen Stückzahlen verwendet. Das additive Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM) bietet aufgrund seiner nahezu uneingeschränkten Designfreiheit die Möglichkeit, solche komplexen Freiformflächen aus serienidentischen Werkstoffen wie bspw. 1.2709 herzustellen. Allerdings besteht ein erheblicher Bedarf, die Fertigung mittels SLM zu beschleunigen.

### Vorgehensweise

Zur beschleunigten Herstellung der Werkzeuge mittels SLM werden gesteigerte Laserleistungen ( $P_L \leq 2 \text{ kW}$ ) in Kombination mit einer angepassten Prozessführung (Hülle-Kern-Strategie) verwendet. Dazu wird das Bauteil in Hüll- und Kernbereiche unterteilt und der Kernbereich mit einem vergrößerten Fokusbereich (ca.  $720 \mu\text{m}$ ) in Verbindung mit Laserleistungen von bis zu  $2 \text{ kW}$  hergestellt. Dadurch wird eine Erhöhung der Schichtdicke (bis  $180 \mu\text{m}$ ) und des Spurbereichs (bis  $600 \mu\text{m}$ ) erreicht, woraus eine gesteigerte Aufbaurrate resultiert.

### Ergebnis

Bei der Herstellung von Probekörpern konnte gezeigt werden, dass die theoretische Aufbaurrate von  $V_{th} = 3 \text{ mm}^3/\text{s}$  bei der konventionellen Prozessführung mit  $P_L = 300 \text{ W}$  auf bis zu  $V_{th} = 18 \text{ mm}^3/\text{s}$  bei der HP-SLM-Prozessführung mit  $P_L = 2 \text{ kW}$  gesteigert werden kann. Im nächsten Schritt wurden die ermittelten Verfahrensparameter zur Herstellung eines Werkzeugs zur Profilextrusion verwendet. Die Fertigungszeiten, die im Vergleich zur theoretischen Aufbaurrate auch Zeiten für Delays enthalten, wurden zwischen konventioneller SLM-Fertigung ( $P_L = 300 \text{ W}$ ) und HP-SLM Fertigung verglichen. Durch den Einsatz der HP-SLM-Prozessführung mit  $P_L = 1 \text{ kW}$  konnte die Fertigungszeit um 46 Prozent gesenkt werden.

### Anwendungsfelder

Die durchgeführten Arbeiten finden im Rahmen des Exzellenzclusters »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer« statt. Die Ergebnisse finden eine direkte Anwendung bei der Herstellung von funktionsangepassten Werkzeugen für den Kunststoffspritzguss bzw. für die Profilextrusion.

### Ansprechpartner

Dipl.-Wirt.Ing. Sebastian Bremen  
 Telefon +49 241 8906-537  
 sebastian.bremen@ilt.fraunhofer.de

Dr. Wilhelm Meiners  
 Telefon +49 241 8906-301  
 wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de

3 Aufnahme des High Power SLM-Prozesses.  
 4 HP-SLM-gefertigtes Profilextrusionswerkzeug aus 1.2709.



## LEITSCHAUFEL- PROTOTYPEN FÜR DIE PRODUKTENTWICKLUNG

### Aufgabenstellung

In der Entwicklung von Komponenten stationärer Gasturbinen bietet die schnelle Verfügbarkeit formgetreuer und endkonturnaher Prototypen erhebliches Anwendungspotenzial. Die zeitnahe Validierung von z. B. Strömungssimulationen unter Betriebsbedingungen oder Testläufe der Fertigungskette anhand solcher Prototypen ermöglichen die parallele Verfolgung unterschiedlicher Entwicklungsansätze und damit größere Leistungssprünge und eine signifikante Verkürzung der Entwicklungszeit. Im Rahmen eines bilateralen Projekts mit der Siemens AG wird die Fertigung von Leitschaufel-Prototypen mittels Selective Laser Melting (SLM) untersucht. Ziele sind eine möglichst genaue Abbildung der heißgasführenden Flächen der Schaufel und Plattformen und der internen Kühlstruktur der Schaufeln.

### Vorgehensweise

Die Nickelbasis-Superlegierung Inconel® 718 wird aufgrund der zum Serienwerkstoff ähnlichen thermophysikalischen Eigenschaften für die Fertigung der Leitschaufel-Prototypen mittels SLM verwendet. Zur Fertigung werden zwei Varianten betrachtet: die monolithische Fertigung ohne (Bild 1) und die modulare Fertigung in Segmenten mit nachgeschaltetem Fügeprozess (Bild 2). In beiden Varianten wird bei der Bauteilorientierung die möglichst einfache Referenzierung zur Nachbearbeitung berücksichtigt.

*Leitschaufel aus Inconel® 718...*

*1 ... monolithisch hergestellt nach dem SLM.*

*2 ... modular hergestellt nach dem Hochtemperaturlöten.*

### Ergebnis

Die aufgrund der Bauteilabmessungen ( $> 200$  mm) und Wandstärken ( $> 10$  mm) entstehenden großen Eigenspannungen werden sowohl durch geeignete Stützkonzepte als auch eine angepasste Bauteilorientierung aufgenommen. Mittels der monolithischen Fertigung können die heißgasführenden Flächen zwar abgebildet werden, allerdings verbleiben nicht entfernbare Stützstrukturen im Schaufelinneren. Durch die getrennte Fertigung von Schaufel und Plattformen ermöglicht die modulare Variante die Auswahl der geeignetsten Orientierung für die jeweiligen Segmente. Dadurch können sowohl die interne Kühlstruktur der Schaufeln ohne Stützen gefertigt als auch die heißgasführenden Flächen bestmöglich abgebildet werden. Die Segmente können mittels Hochtemperaturlöten anschließend gefügt werden. Resultierende Maßabweichungen der heißgasführenden Strömungsflächen betragen bei beiden Varianten ca.  $< 0,4$  mm und erfüllen damit die Anforderungen.

### Anwendungsfelder

Die untersuchten Vorgehensweisen und erzielten Ergebnisse sind sowohl übertragbar auf andere Komponenten im Turbomaschinenbau als auch auf andere Anwendungsgebiete.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Jeroen Risse  
Telefon +49 241 8906-135  
jeroen.risse@ilt.fraunhofer.de

Dr. Wilhelm Meiners  
Telefon +49 241 8906-301  
wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de



---

## EINFLUSS DER SCHUTZ- GASFÜHRUNG AUF DIE BAUTEILQUALITÄT BEIM SLM

---

### Aufgabenstellung

Die Schutzgasströmung in SLM-Anlagen hat die Aufgabe, im Prozess entstehenden Rauch und Spritzer von der Laser-Werkstoff-Wechselwirkungszone abzuführen. Geschieht dies nicht oder nur unzureichend, so wird die gewünschte Bauteildichte nicht erreicht. Bislang ist allerdings nicht bekannt, welche Strömungsbedingungen für einen optimalen SLM-Prozess vorliegen müssen. Für ein grundlegendes Verständnis der Korrelation der Strömungscharakteristik mit der resultierenden Bauteilqualität soll die Strömung in SLM-Anlagen visualisiert werden. Auf Grundlage der Ergebnisse kann dann eine Optimierung der Schutzgasströmung entwickelt werden.

### Vorgehensweise

Zur Visualisierung der Strömung in SLM-Anlagen werden zwei Verfahren eingesetzt. Mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) ist es möglich, an Nachbauten von SLM-Prozesskammern die Schutzgasströmung nach Betrag und Richtung ortsaufgelöst darzustellen. Diese Ergebnisse lassen sich aufgrund der maßstabsgerechten Modelle direkt auf die Anlagen und damit den Prozess übertragen. Darüber hinaus wird mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie der Einfluss der Schutzgasströmung auf die Abführung des Rauchs während der Bearbeitung ermittelt.

### Ergebnis

Es konnte gezeigt werden, dass die Schutzgasströmung in SLM-Anlagen mittels PIV abbildbar ist. Auf diese Weise ist es erstmals möglich, eine ortsaufgelöste Darstellung von Betrag und Richtung der Schutzgasströmung in SLM-Anlagen zu erhalten. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass die Hochgeschwindigkeitsvideographie ein geeignetes Instrument zur Visualisierung des Einflusses der Schutzgasströmung auf den im SLM-Prozess entstehenden Rauch darstellt.

### Anwendungsfelder

Die Ergebnisse liefern einen Beitrag zur Prozessrobustheit und -reproduzierbarkeit beim SLM. Diese können vor allem zur Herstellung von sicherheitsrelevanten Bauteilen, beispielsweise in der Luft- und Raumfahrtindustrie, angewendet werden.

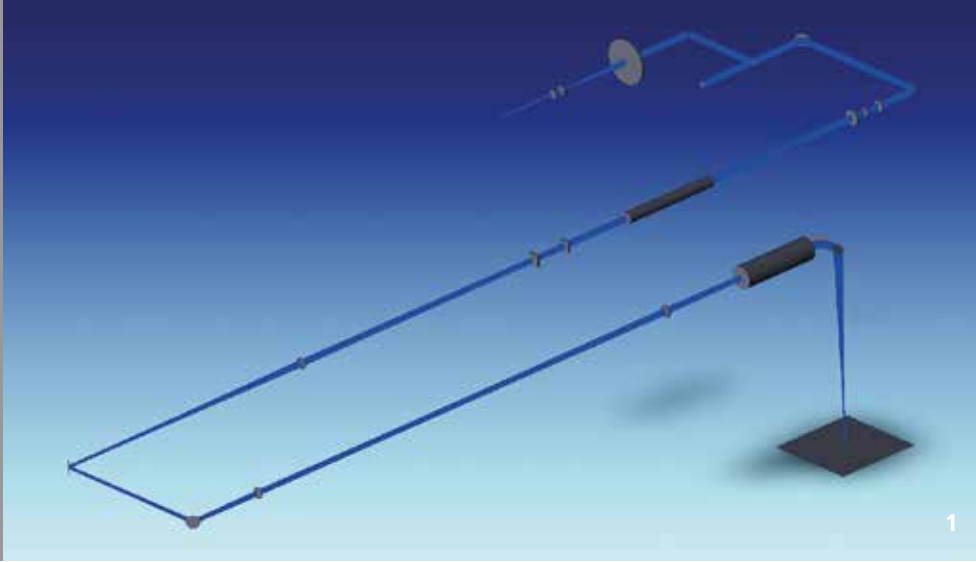
Die Arbeiten werden im Rahmen des LuFo-Projekts »GenFly« unter dem Förderkennzeichen 20W1305H durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Maximilian Schniedenharn  
Telefon +49 241 8906-8111  
maximilian.schniedenharn@ilt.fraunhofer.de

Dr. Wilhelm Meiners  
Telefon +49 241 8906-301  
wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de





## OPTIKSYSTEM FÜR DAS HOCHLEISTUNGS- LASERSINTERN

### Aufgabenstellung

Das Selektive Lasersintern (SLS) von Kunststoffen hat sich als additives Fertigungsverfahren insbesondere zur Herstellung von komplexen Prototypen und Kleinserien etabliert. Allerdings fordern Anwender sowohl eine höhere Produktivität durch höhere Aufbauraten als auch eine größere Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften. Daher sollen sowohl Produktivität als auch Reproduzierbarkeit des SLS durch die Auslegung eines neuartigen Optiksystms für CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung gesteigert werden.

### Vorgehensweise

Die Produktivität soll durch eine Erhöhung der Laserleistung in Kombination mit einer Vergrößerung des Laserstrahldurchmessers gesteigert werden. Mit dem großen Laserstrahldurchmesser können großvolumige Kernbereiche des Bauteils in Analogie zum High Power Selective Laser Melting von Metallen zeitsparend belichtet werden (z. B. durch Vergrößerung der Schichtdicke). Um im Bereich der Bauteilkontur dennoch eine hohe Detailauflösung und Oberflächengüte zu wahren, soll die Bauteilkontur mit kleinem Strahldurchmesser belichtet werden. Um diese unterschiedlichen Strahldurchmesser zu realisieren, wird ein 3D-Fokussiersystem verwendet, welches eine dynamische und nahezu stufenlose Variation des Strahldurchmessers ermöglicht.

Die Steigerung der Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften soll durch eine Homogenisierung der Temperaturverteilung in der Belichtungsebene erfolgen. Dies soll sowohl durch den Einsatz einer homogenisierten Intensitätsverteilung als auch durch die Verwendung eines akustooptischen Modulators (AOM) zur Vermeidung von Leistungsspitzen beim Einschalten des Lasers erreicht werden.

### Ergebnis

Die Konzeptionierung des Optiksystms zur dynamischen und variablen Anpassung des Strahldurchmessers und der Intensitätsverteilung wurde abgeschlossen. Auf Basis von Simulationsergebnissen wird bei Laserleistungen von bis zu 600 W (statt der üblichen 30 -70 W) ein variabler Gauß-Strahldurchmesser von 0,5 - 4 mm realisiert. Zudem können Strahlformungsoptiken in das Gesamtsystem integriert werden, um homogenisierte Intensitätsverteilungen (Top-Hat oder Linienverteilung) zu erzeugen. Im nächsten Schritt soll der Aufbau und die experimentelle Charakterisierung des Systems erfolgen.

### Anwendungsfelder

Das Optiksystm kann in Hochleistungslasersinteranlagen der nächsten Generation eingesetzt werden.

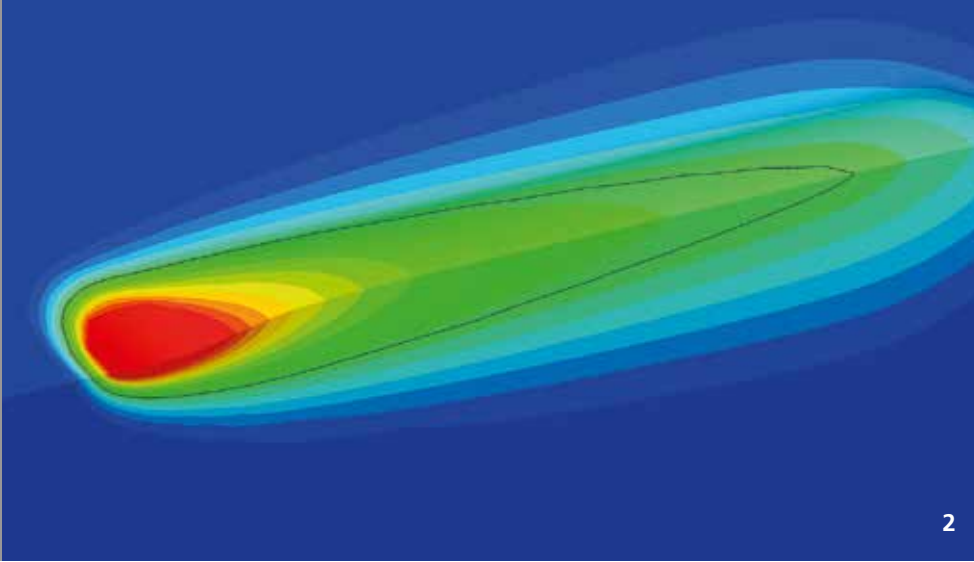
Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02PN2091 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Christoph Gayer M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8019  
christoph.gayer@ilt.fraunhofer.de

1 Schema des Optiksystm-Strahlengangs.





2

## PROZESSSIMULATION ZUM SELECTIVE LASER MELTING

### Aufgabenstellung

Zur systematischen Analyse der Wirk-Einfluss-Zusammenhänge beim Selective Laser Melting (SLM) wird standardmäßig ein Design of Experiment (DOE) verwendet. Der Versuchsaufwand für ein vollfaktorielles DOE im SLM ist aufgrund der vielen, teils abhängigen Parameter groß. In der Praxis wird die Anzahl der Versuchspunkte durch zwei Faktoren reduziert. Erstens wird Fachwissen dazu verwendet, das DOE zu reduzieren und Versuchspunkte geschickter zu wählen. Zweitens dient das (weiter-)entwickelte Mikromodell zum SLM dazu, den Prozess für verschiedene Parametereinstellungen zu simulieren und so die möglichen Versuchspunkte vorab rechnerisch einzuschränken. Weiterhin sollen aus dem Vergleich zwischen Modell und Experiment die für den Prozess relevanten physikalischen Phänomene identifiziert und verstanden werden. Zwischen den mit dem Modell kalkulierten Erstarrungsbedingungen und dem im Experiment entstandenen Gefüge und der resultierenden Mikrostruktur soll ein Wirkzusammenhang abgeleitet werden.

### Vorgehensweise

Das SLM stellt mathematisch ein freies Randwertproblem dar. Dessen Lösung basiert auf einer Integration der transienten Wärmeleitungsgleichung und der Druckbilanz (Young-Laplace) Gleichung unter Berücksichtigung des Dampfdrucks und der Massenbilanz aus der pro Zeitintervall aufgeschmolzenen Pulverschicht. In einem gesonderten Modell wird die Wechselwirkung der Laserstrahlung mit der Pulverschicht

in Abhängigkeit der gemessenen Partikelgrößenverteilung simuliert. Aus diesen Modellen werden zeitaufgelöst die Spurgeometrie und die Temperaturverteilung (Bild 2) als Funktion der Prozessparameter und der thermophysikalischen Materialeigenschaften berechnet.

### Ergebnis

Das weiterentwickelte Simulationstool befindet sich zurzeit in der Validierungsphase, aufgrund der zu klein berechneten Schmelzbadtiefen müssen weitere physikalische Effekte implementiert werden. Sobald Experiment und Modell gut übereinstimmen, werden erste Versuchspläne reduziert.

### Anwendungsfelder

Die durch Simulationen gewonnenen Ergebnisse können bei einer werkstoff-/bauteilspezifischen Adaption der Prozessführung und/oder zum Generieren eines verbesserten Prozessverständnisses eingesetzt werden.

### Ansprechpartner

Jonas Zielinski M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8054  
jonas.zielinski@ilt.fraunhofer.de

Dr. Wilhelm Meiners  
Telefon +49 241 8906-301  
wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de



## MODULARE BENCHMARK-SOFTWARE FÜR DAS SELECTIVE LASER MELTING (SLM)

### Aufgabenstellung

Nicht nur für die Optimierung bereits bestehender Prozesse sondern insbesondere auch für die Modifikation oder sogar Neuentwicklung von Anlagen für das SLM ist eine genaue Vorhersage der Prozesszeit für ein Bauteil sowie deren Aufteilung auf ihre einzelnen Bestandteile von hoher Bedeutung. Darüber hinaus kann ein solches Vorhersagemodell auch zum Vergleich unterschiedlicher Anlagen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Bauteilfertigung verwendet werden. Ziel ist die Entwicklung einer modularen, datenbankbasierten Benchmark-Software zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit von SLM-Anlagen, -konzepten und -prozessen.

### Vorgehensweise

Die Software besteht aus den Modulen »Anlage«, »Material«, »Bauteil«, »Betrieb« und »Prozess«. Aufbauend auf einem Fraunhofer ILT-eigenen Buildprozessor für die kommerzielle Datenaufbereitungssoftware »Magics« der Firma Materialise werden die Bauteildaten in einem eigenen Dateiformat der Benchmarksoftware zur Verfügung gestellt und können, analog zum Fertigungsalltag, zu einem sog. Baujob zusammengestellt werden. Auf Grundlage der in den Modulen »Anlage«, »Material«, »Bauteil« und »Betrieb« abgelegten Daten werden im Modul »Prozess« sämtliche anlagenseitigen

Fertigungsschritte (Schmelzprozess, Medien (Pulver, Gas), Hardware (Scanner, Bauplattform) abgebildet und zugehörige Kennzahlen ermittelt. Darunter fallen beispielsweise Fertigungszeiten, Bauteilstückkosten oder die Stillstandszeit der Anlage, woraus sich bezogen auf die Anschaffungs- und laufenden Kosten u. a. die Produktivität oder der Wertschöpfungsgrad ergibt.

### Ergebnis

Der aktuelle Entwicklungsstand erlaubt die Berechnung der Prozessdauer für kommerzielle Anlagen mit einem max. Fehler von 3,5 Prozent sowie der Bauteilstückkosten inkl. der zugrundeliegenden Kostenstruktur (anteilige Anlagen-, Personal-, Flächen-, Energie-, Schutzgas- und Materialkosten).

### Anwendungsfelder

Die Software wird aktuell insbesondere zur Bewertung neuer, am Fraunhofer ILT entwickelter Anlagenkonzepte verwendet. Möglich ist darüber hinaus der Einsatz in bilateralen Beratungs- und Entwicklungsprojekten, z. B. zum Vergleich der Fertigungszeiten verschiedener Bauteildesigns, sowie in generellen Wirtschaftlichkeitsanalysen der additiven Fertigung.

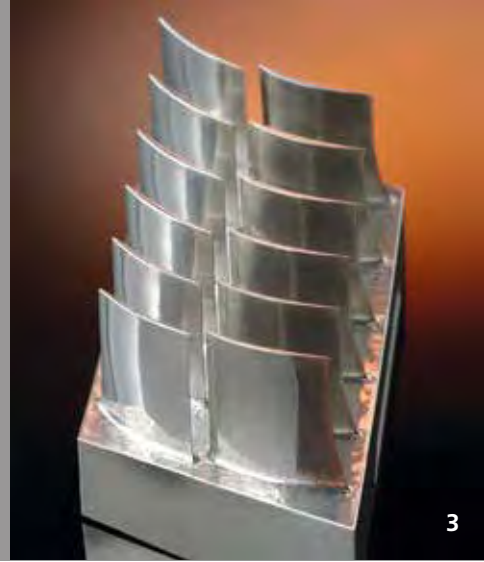
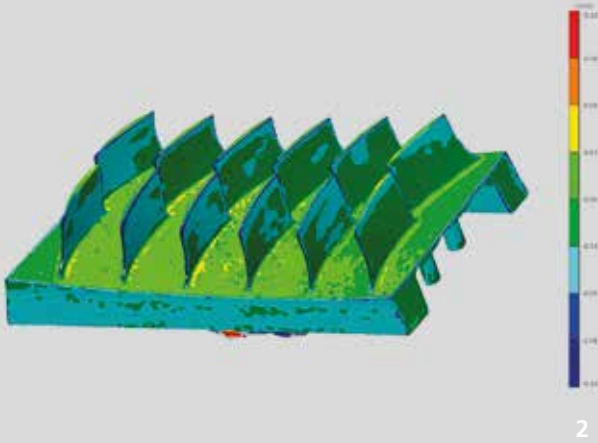
Teile der Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Forschungscampus »Digital Photonic Production« unter dem Kennzeichen 13N13710 gefördert.

### Ansprechpartner

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

Florian Eibl M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-193  
florian.eibl@ilt.fraunhofer.de

1 Einsatz der modularen  
Benchmarksoftware in der Praxis.



## NACHBEARBEITUNG VON SLM-GEFERTIGTEN BAUTEILEN

### Aufgabenstellung

Das additive Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM) besitzt aufgrund der verfahrenstypischen hohen Geometriefreiheit großes Potenzial für den Einsatz in der Fertigung von kleinen bis mittleren Losgrößen für den Turbomaschinenbau. Jedoch besteht in der charakteristischen hohen Rauheit ( $R_a \geq 5 \mu\text{m}$ ) von SLM-gefertigten Bauteilen ein limitierender Faktor. Damit die Vorteile des Verfahrens im Umfeld des Turbomaschinenbaus genutzt werden können, ist eine Kombination mit entsprechenden Nachbearbeitungsverfahren erforderlich, um die Anforderung an Oberflächenrauheit ( $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$ ) und Formgenauigkeit zu erfüllen. Daraus ergibt sich die Aufgabenstellung, potenzielle Nachbearbeitungsverfahren zu identifizieren und diese in Kombination mit SLM hinsichtlich Oberflächenrauheit und Formgenauigkeit zu untersuchen.

### Vorgehensweise

Der erste Schritt besteht in der Identifizierung von potenziellen Verfahren zur Nachbearbeitung von SLM-erzeugten schwer zugänglichen Flächen. In einem zweiten Schritt werden schaufelförmige Probekörper mittels SLM gefertigt. Diese werden mit den identifizierten Nachbearbeitungsverfahren bearbeitet. Vor und nach der jeweiligen Nachbearbeitung wird der Probekörper messtechnisch erfasst. So wird mittels dem auf der Fokusvariation basierenden »InfiniteFocus« von der Firma Alicona sowohl die Eingangs- als auch die Ausgangsrauheit bestimmt und mittels Streifenlichtprojektion der Abtrag über den Vergleich zwischen der erfassten Eingangs- und Ausgangsgeometrie ermittelt.

### Ergebnis

Die Nachbearbeitungsverfahren Gleitschleifen, Strömungsschleppscheifen, Plasmapolieren und Mikro Machining Prozess wurden untersucht. Alle untersuchten Verfahren reduzieren die Eingangsrauheit von ca.  $R_a \approx 10 \mu\text{m}$  auf mindestens  $R_a \leq 4 \mu\text{m}$ . Die geringste Rauheit mit  $R_a = 0,1 \dots 0,3 \mu\text{m}$  wurde mit dem Mikro Machining Prozess erzielt. Dabei wurde ein lokaler Abtrag von  $40 \pm 20 \mu\text{m}$  ermittelt.

### Anwendungsfelder

Die aktuellen Forschungen zum Thema Nachbearbeitung von SLM-gefertigten Bauteilen adressieren den Turbomaschinenbau und können auf andere Branchen der Serienfertigung (z. B. Automobilindustrie) übertragen werden.

Der Fraunhofer-Innovationscluster »AdaM« wurde durch den Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) »Investition in Zukunft« gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Anders Such  
Telefon +49 241 8906-511  
anders.such@ilt.fraunhofer.de

Dr. Wilhelm Meiners  
Telefon +49 241 8906-301  
wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de

- 2 Falschfarbenvergleich zwischen gemessener Eingangs- und Ausgangsgeometrie beim Plasmapolieren.  
3 Mittels Mikro Machining Prozess nachbearbeitetes Leitschaufelcluster.



1



2

## LASERPOLIEREN VON SLM-GEFERTIGTEN 3D-BAUTEILEN

### Aufgabenstellung

Das additive Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM) bietet aufgrund seiner nahezu uneingeschränkten Designfreiheit die Möglichkeit, komplexe und individuelle Bauteile aus serienidentischen Werkstoffen herzustellen. Allerdings weisen mittels SLM hergestellte Bauteile aufgrund der schichtweisen Herstellung aus pulverförmigem Material, im Vergleich zur zerspanenden Bearbeitung, große Oberflächenrauheiten auf ( $S_a$  ca. 10 - 30  $\mu\text{m}$ ). Nach derzeitigem Stand der Technik ist daher häufig eine aufwendige spanende Nacharbeit der Funktionsflächen zur Verbesserung der Oberflächenqualität der Bauteile notwendig.

### Vorgehensweise

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts »AMAZE« (FP7-FoF.NMP.2012-4) wird am Fraunhofer ILT die Anwendung des Verfahrens Laserpolieren für die Nachbearbeitung von mittels SLM hergestellten Bauteilen aus der Nickelbasislegierung Inconel® 718 entwickelt. Die Rauheit  $S_a$  der Oberfläche nach dem SLM-Prozess wird mit dem auf der Fokusvariation basierenden »Infinite Focus« von Alicona bestimmt. An würfelförmigen Probekörpern wird die Parameterermittlung zum Laserpolieren durchgeführt. Zur Übertragung der Laserpolierergebnisse von den ebenen Würfelkörpern auf

3D-Demonstratorbauteile werden Strategien zur Bearbeitung bei nicht senkrechtem Einstrahlwinkel und zur Kantenbearbeitung erarbeitet. Die Rauheit der laserpolierten Oberfläche wird mit dem Tastschnittverfahren bestimmt.

### Ergebnis

Erste Laserpolierergebnisse an einer Komponente aus einer Flugzeugtriebwerksaufhängung aus IN718 zeigen, dass die Oberflächenrauheit der SLM-Oberfläche von  $S_a = 10 - 15 \mu\text{m}$  auf bis zu  $S_a = 0,25 \mu\text{m}$  verkleinert werden kann. Die Flächenrate beim Laserpolieren der ausgewählten Bauteilgeometrie beträgt 3,8  $\text{cm}^2/\text{min}$ . Im nächsten Schritt werden weiterführende Untersuchungen zur Reduzierung der Oberflächenrauheit und Vergrößerung der Flächenrate sowie der Strategie- und Parameteranpassung für kleine Wandstärken durchgeführt.

### Anwendungsfelder

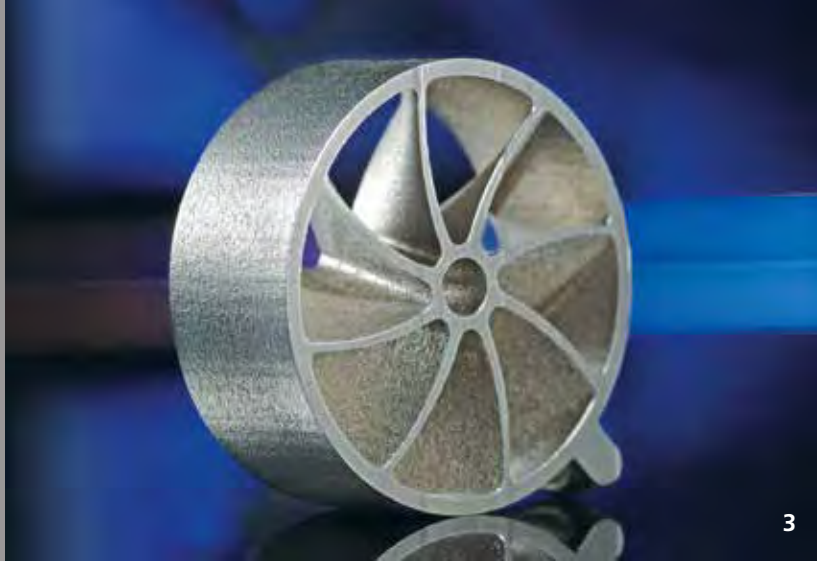
Die SLM-Fertigung von Bauteilen aus IN718 findet insbesondere in der Luftfahrt und im Turbomaschinenbau Anwendung.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing Ingo Ross  
Telefon +49 241 8906-8196  
ingo.ross@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Wirt.Ing Sebastian Bremen  
Telefon +49 241 8906-537  
sebastian.bremen@ilt.fraunhofer.de

- 1 Mittels SLM gefertigte Pylon-Brackets aus IN718.  
2 Laserpolierte Teilsegmente eines Pylon-Brackets aus IN718.



## REDUZIERUNG DER OBERFLÄCHENRAUHEIT VON SLM-BAUTEILEN MITTELS MODULIERTER LASERSTRAHLUNG

### Aufgabenstellung

Für den industriellen Einsatz von SLM-Bauteilen ist in der Regel eine Nachbearbeitung der Bauteiloberflächen zur Reduzierung der Rauheit erforderlich. Dabei hängt die Oberflächenrauheit nicht nur vom SLM-Prozess allein sondern auch von der Geometrie des Bauteils ab. So ist die Rauheit an Überhangbereichen im Allgemeinen größer als an senkrecht aufgebauten Flächen. Beispielsweise wird an Bauteilen aus dem Werkstoff Inconel® 718 beim Aufbau in Schichtdicken von 30 µm an senkrechten Flächen eine Oberflächenrauheit von  $R_a \approx 15 \mu\text{m}$  erreicht. In Überhangbereichen wird dagegen trotz angepasster Parameter (downskin) nur eine Rauheit von  $R_a \geq 30 \mu\text{m}$  erreicht.

Für eine effiziente Nachbearbeitung der komplexen SLM-Bauteile ist eine möglichst geringe und homogen verteilte Oberflächenrauheit erforderlich. Durch den Einsatz modulierter Laserstrahlung konnte im Mikro-SLM-Verfahren eine signifikante Reduzierung der Oberflächenrauheit an kleinen Bauteilen ( $\leq 10 \text{ mm}$ ) erreicht werden. Ziel ist es, Parameter für das SLM-Verfahren mit modulierter Laserstrahlung zu identifizieren, mit der sich die Oberflächenrauheit in allen Bereichen makroskopischer Bauteile reduzieren und homogenisieren lässt.

### Vorgehensweise

Die SLM-Prozessführung zur Reduzierung der Rauheit wird mittels modulierter Laserstrahlung für die oberflächennahen Bauteilbereiche (Kontur und Überhangbereiche) angepasst. Durch die diskontinuierliche Energieeinbringung sollen Form und Größe des erzeugten Schmelzbads kontrolliert und eine signifikante Reduzierung der Oberflächenrauheit erreicht werden. Für die Experimente stehen eine SLM-Laboranlage mit einer 400 W-Strahlquelle und der Pulverwerkstoff Inconel 718 in den Partikelfractionen  $d_{100} = 15 - 45 \mu\text{m}$  zur Verfügung.

### Ergebnis

Erste, mittels modulierter Laserstrahlung hergestellte Proben zeigen eine deutliche Reduzierung der Rauheit an Flächen, die direkt auf dem Pulverbett (Überhangwinkel =  $90^\circ$ ) aufgebaut werden. Die Ra- und Rz-Werte sind im Vergleich zu Referenzproben, welche mit cw-Parametern hergestellt wurden, um den Faktor 2 kleiner.

### Anwendungsfelder

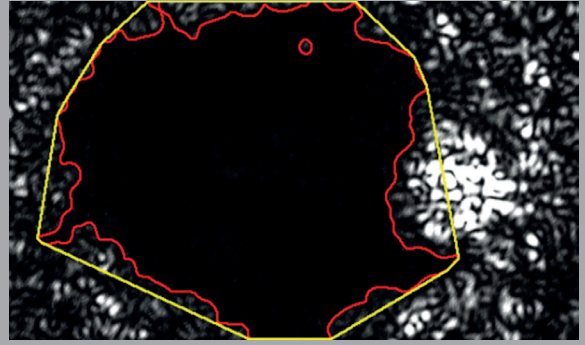
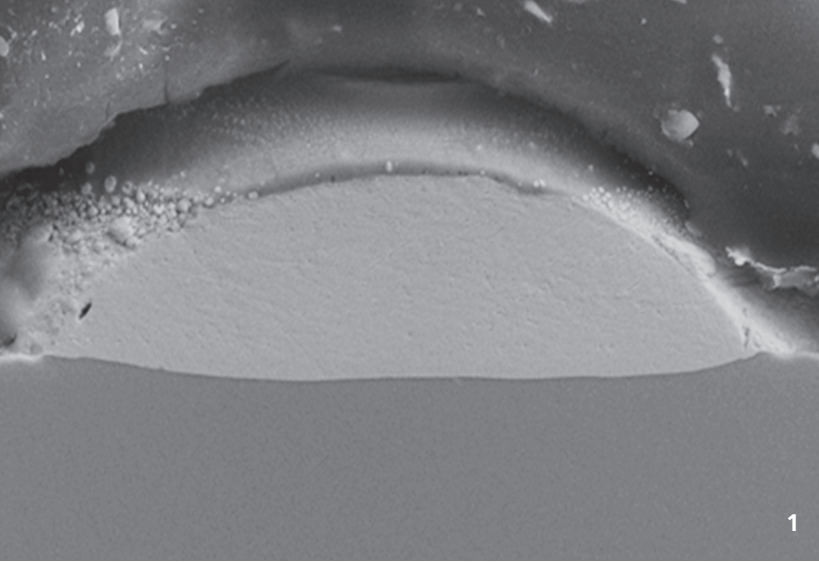
Anwendungsfelder wie z. B. der Turbomaschinenbau und die Medizintechnik fordern SLM-Bauteile mit einer geringen Oberflächenrauheit. Sollte sich durch die hier untersuchte Anpassung der SLM-Prozessführung der Nachbearbeitungsaufwand reduzieren lassen, würde dies zu einer höheren Akzeptanz des SLM-Verfahrens führen und neue Anwendungsfelder erschließen.

### Ansprechpartner

Lukas Masseling M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8349  
lukas.masseling@ilt.fraunhofer.de

*3 Demonstrator aus Inconel® 718 aufgebaut mittels SLM und modulierter Laserstrahlung.*





## GOLDKONTAKTIERUNG MIT INLINE-QUALITÄTSKONTROLLE

### Aufgabenstellung

Das Mikro-Laserauftragschweißen (Mikro-LA) ist ein Verfahren zum ortsselektiven Kontaktieren mit Edelmetallen wie z. B. Gold. Für die Fertigung großer Stückzahlen ist eine Qualitätskontrolle der Kontakte erforderlich. Hierzu soll die Laser-Speckle-Photometrie (LSP) genutzt werden. Die LSP ist ein am Fraunhofer IKTS entwickeltes Verfahren, das auf der Auswertung der zeitlichen Veränderung von optischen Speckle-Mustern (körnige Interferenzen) basiert, die sich u. a. bei thermischer Anregung des Prüfobjekts entwickeln. In einem gemeinsamen Projekt der Fraunhofer-Institute ILT und IKTS soll die LSP zur indirekten Bestimmung des Edelmetallgehalts und zur Bestimmung der Geometrie der Kontakte untersucht werden.

### Vorgehensweise

Die Goldkontakte werden durch Dispensen aufgetragen, zum Austreiben des Binders getrocknet und mit einem Laser umgeschmolzen. Bei der LSP wird die notwendige zeitliche und laterale Auflösung der Interferenzmuster durch Verwendung einer CMOS-Kamera erreicht. Die Anregung der Interferenzen erfolgt durch die erneute Erwärmung des Kontakts mit dem Bearbeitungslaser.

1 REM-Aufnahme: Querschliff eines Goldkontaktpunkts.

2 Graphische Bildanalyse der Laser-Speckle mit automatischer Auswertung der geometrischen Abmessungen und des Goldgehalts.

### Ergebnis

Durch Pulsbearbeitung kann ein Goldkontakt mit einem Durchmesser von ca. 200 µm und einer Dicke von einigen 10 µm innerhalb von 100 ms umgeschmolzen werden. Durch Parallelisierung (z. B. durch kaskadenförmige Strahlteilung) können so Dutzende Kontakte pro Sekunde funktionalisiert werden. Voraussetzung ist, dass die Trocknung vorgeschaltet wird (z. B. durch Heizstrahler). Die Signale der LSP verändern sich mit dem Goldgehalt und dem Durchmesser der Kontakte und können somit als Messgröße bei entsprechender Kalibrierung genutzt werden. Die Genauigkeit liegt derzeit bei etwa  $\pm 7$  Prozent. Bis zu 100 Kontakte pro Sekunde können aufgenommen und extern ausgewertet werden, so dass grundsätzlich eine hundertprozentige Kontrolle möglich ist. Mikro-LA und LSP wurden erfolgreich in einem Aufbau getestet.

### Anwendungsfelder

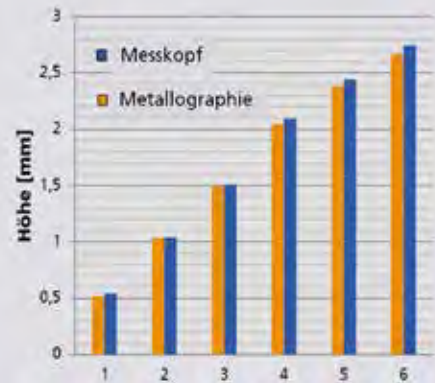
Die Anwendungsfelder liegen in erster Linie in der Elektronik und Elektrotechnik, wo elektrische Kontakte nur selektiv benötigt werden (z. B. Schleif- und Steckkontakte). Ein weiteres Anwendungsfeld sind Brennstoffzellen.

Das Projekt wurde im Rahmen des Fraunhofer-Programms »MEF« gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Matthias Belting  
Telefon +49 241 8906-624  
matthias.belting@ilt.fraunhofer.de

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



## ONLINE-SCHICHTDICKEN- MESSUNG DURCH INTE- GRIERTES INTERFEROMETER

### Aufgabenstellung

Das Innenbeschichten wird zur Instandsetzung von hochwertigen Komponenten wie Lager, Gehäuse oder Zylinder, welche z. B. in der Öl- und Gasindustrie eingesetzt werden, verwendet. Um die Beschichtungsqualität zu gewährleisten und insbesondere die aufgetragene Schichthöhe während des Prozesses zu überwachen, wird ein Online-Messverfahren unter Berücksichtigung der eingeschränkten Zugänglichkeit für die Schichtdickenmessung entwickelt.

### Vorgehensweise

Als Lösungsansatz wird ein absolut messendes Interferometer in den optischen Strahlengang der Innenbeschichtungsoptik integriert. Das Interferometer sendet ein Strahlenbündel aus, welches über einen Strahlteiler in einen Referenzstrahl und einen Messstrahl geteilt wird. Beide Teilstrahlen werden vor dem Beschichtungsprozess zueinander kalibriert, so dass ihre Weglängen gleich lang sind. Messstrahl und Bearbeitungsstrahl werden überlagert, sie verlaufen koaxial zueinander und treffen in einem Punkt auf das Werkstück. Während des Beschichtungsprozesses wird der vom Werkstück zurückgestreute Messstrahl im Interferometer mit dem Referenzstrahl überlagert. Die resultierende Differenz der optischen Wege von Messstrahl und Referenzstrahl wird zur Schichtdickenbestimmung verwendet.

### Ergebnis

Durch die erfolgreiche Integration eines absolut messenden Interferometers wird eine direkte Schichtdickenmessung während des Beschichtungsprozesses ohne Zerstörung der Probe ermöglicht. Um die Messgenauigkeit zu verifizieren, werden sechs aufgetragene Schichten mit verschiedenen Höhen unter dem Lichtmikroskop ausgewertet. Die maximalen Abweichungen der Schichtdicke zwischen der Interferometrie-messung und der lichtmikroskopischen Auswertung betragen ca. 2,5 Prozent.

### Anwendungsfelder

Mit dieser Online-Messtechnik kann die Schichtdicke des Beschichtungsprozesses überwacht und dadurch die Beschichtungsqualität erheblich verbessert werden. Die Innenbeschichtungsoptik kann prinzipiell für alle Anwendungsfälle eingesetzt werden, bei denen Innenflächen zu beschichten sind.

Das Projekt wird mit Mitteln aus dem Programm »HORIZON 2020« der Europäischen Union gefördert.

### Ansprechpartner

Chen Hong M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8025  
chen.hong@ilt.fraunhofer.de

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

3 Versuchsaufbau.

4 Messergebnis.



## ONLINE MONITORING INCLAD-PROZESS

### Aufgabenstellung

Ein wachsendes Anwendungsfeld der Laserauftragschweißtechnik (Laser Metal Deposition LMD) ist die Panzerung von stark beanspruchten Innenflächen von z. B. Lagern, Gehäusen oder Zylinderbohrungen. Mit Hilfe einer speziell hierfür entwickelten Innenbeschichtungsoptik wird diese Hartauftrags- und Reparatur-Technologie auch für hochwertige Komponenten verfügbar, deren Innenflächen mit Standardköpfen bisher nicht erreichbar waren. Zielsetzung des Projekts »LASHARE-INCLAD« ist die Integration von Sensoren und Systemen zur koaxialen Prozessüberwachung, um den Prozess für den Maschinenbediener online beobachtbar und damit beherrschbarer zu machen.

### Vorgehensweise

Die Entwicklung und die Auslegung der INCLAD-Optik erfolgt in Abstimmung und Kooperation mit dem Systemlieferanten und dessen industriellem Anwender. Um den Prozess sicher zu transferieren, wird die Systemkonfiguration entsprechend den Anforderungen des industriellen Anwenders konzeptioniert und betrieben. Die technologische Reife (Technology Readiness Level TRL) und der Fertigungsakzeptanztest werden sowohl beim Lieferanten als auch beim industriellen Anwender durchgeführt.

1 INCLAD-1500-Optik.

2 Innenbeschichtung eines Ölbohrkopfs.

### Ergebnis

Die INCLAD-1500-Optik ermöglicht die Innenbeschichtung in Röhren oder in rohrförmigen Werkstücken mit einer Länge von bis zu 3 Metern. Als Strahlquelle eignen sich sowohl ein 4 kW Faserlaser als auch ein 4 kW-Diodenlaser. Um die Stabilität und Qualität des INCLAD-Prozesses online zu überwachen, wird die vom Schmelzbad emittierte Temperaturstrahlung koaxial durch die INCLAD-1500-Optik mit einem Pyrometer und ortsaufgelöst mit einer High-Speed-CMOS-Kamera erfasst. Bei Überschreitung definierter Eingriffsgrenzen wird der Maschinenbediener entweder gewarnt oder der INCLAD-Prozess automatisch gestoppt.

### Anwendungsfelder

Mit dem INCLAD-Prozess lassen sich vorteilhaft hochwertige Werkstücke reparieren, deren innenliegende Oberflächen hohe Anforderungen bezüglich Beanspruchung und Korrosion erfüllen müssen. Beispiele sind Bohrwerkzeuge in der Öl- und Gasindustrie, Extrudergehäuse in Kunststoffspritzgießmaschinen oder Gleitlager in Werkzeugmaschinen.

Die Arbeiten im Projekt »LASHARE-INCLAD« werden von der Europäischen Union mit Mitteln aus dem Programm »HORIZON 2020« gefördert.

### Ansprechpartner

Dr. Alexander Drenker  
Telefon +49 241 8906-223  
alexander.drenker@ilt.fraunhofer.de

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





## ADDITIVE FERTIGUNG EINER TRIEBWERKSAUFHÄNGUNGSKOMPONENTE MITTELS LMD

### Aufgabenstellung

Um aufwendige und kostenintensive Bauteile z. B. aus Nickelbasis-Superlegierungen in der Luftfahrtindustrie flexibler fertigen zu können, werden alternativ zur konventionellen Herstellung additive Verfahren wie das Laserauftragschweißen (LMD) untersucht. Ein entscheidendes Kriterium für die industrielle Verbreitung ist neben technologischen Aspekten die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Signifikante Kostenfaktoren sind dabei die Zeiten für den additiven Fertigungsprozess und die anschließende Nachbearbeitung. Beide Aspekte werden im Rahmen des EU-Projekts »AMAZE« untersucht und an der Triebwerksaufhängungskomponente aus IN718 als Demonstrator mit gesteigerter Aufbaurrate erprobt.

### Vorgehensweise

Aus prozesstechnischer Sicht sind die Schlüsselfaktoren die erzielte Aufbaurrate, die erreichte Qualität (z. B. Poren) und die Geometriegüte (Nachbearbeitungszeit). Dabei besitzt die Steigerung der Auftragsrate das größte Potenzial, welche bei verschiedenen Strahldurchmessern und Laserleistungen im Bereich von 500 bis 3500 W unter Einhaltung einer maximalen Oberflächentemperatur von 70 °C vor jeder Lage untersucht wurde. Aus dem Demonstrator wurden signifikante Geometrielemente (Features) extrahiert und mit verschiedenen Strategien aufgebaut. Diese dienen als Basis der Demonstratorherstellung mit dem Ziel, die Fertigungszeit zu minimieren.

### Ergebnis

Die Parameterentwicklungsphase erfolgte mit Spurbreiten von 1 - 4 mm, mit denen die Feature-Geometrien generiert wurden (Bild 4). Die erzielten Aufbauraten der Einzelschichten variierten von 0,15 kg/h bei 1 mm Spurbreite bis zu 2 kg/h bei 4 mm Spurbreite. Die Auswertung der Versuche an den Feature-Geometrien zeigte eine starke Reduzierung der erreichten Auftragsraten speziell bei den 3 und 4 mm Spuren bedingt durch die notwendigen Abkühlzeiten zwischen den Lagen. Durch die Installation einer aktiven Wasserkühlung konnte die Volumenaufbaurrate z. B. bei den 3 mm Spuren um den 4-fachen Wert gesteigert werden.

### Anwendungsfelder

Die erzielten Erkenntnisse mit dem Werkstoff IN718 lassen sich auf andere Werkstoffe und Anwendungen übertragen. Potenziale besitzen Bauteile, die ein hohes Zerspanungsvolumen aufweisen, z. B. Integral- und Triebwerksbauteile aus der Luftfahrttechnik oder Turbinen aus Hochleistungswerkstoffen zur Energiegewinnung. Im Werkzeug- und Formenbau bieten sich effektive und flexible Lösungen an, z. B. zur Modifikation von Bauteilen.

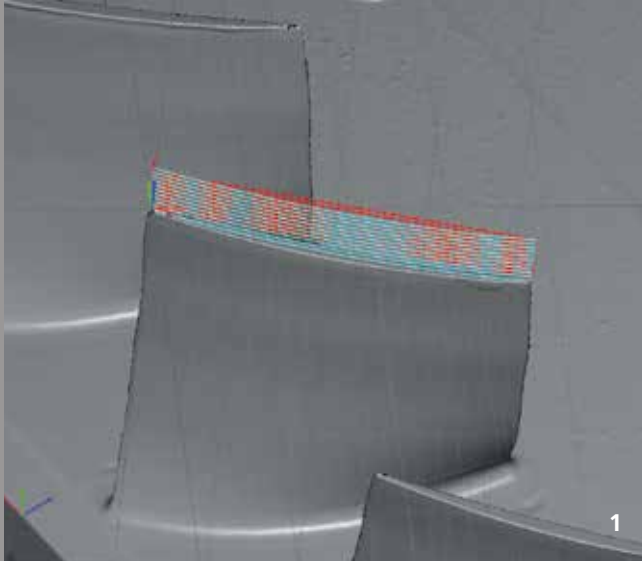
Die Arbeiten wurden im Rahmen des EU-Projekts »AMAZE« unter dem Förderkennzeichen 313781 gefördert.

### Ansprechpartner

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

3 Demonstratorbauteil APOD11  
(Quelle: Airbus Group).

4 Demonstrator-Features mit  
1 - 4 mm Spurbreite (v.li.n.re.).



## »MULTI-BLIR«-REPARATUR DURCH LASERAUFTRAGSCHWEISSEN

### Aufgabenstellung

Die Entwicklung eines Reparaturprozesses für komplexe Geometrien mittels Laserauftragschweißen (LA) ist zeitaufwändig und hängt insbesondere von Geometrie und Werkstoff des Bauteils ab. Um den Zeitaufwand signifikant zu reduzieren und auf Geometrieänderungen flexibel reagieren zu können, wurde im Rahmen des Innovationsclusters »AdaM« (Adaptive Produktion für Ressourceneffizienz in Energie und Mobilität) das Konzept eines LA-Technologieprozessors entwickelt. Dieses basiert auf experimentellen, in einer Datenbank hinterlegten Ergebnissen zum LA und einem Simulationstool. Zur Darstellung der experimentellen Ergebnisse sollen Prozessdiagramme entwickelt werden. Am Beispiel eines mehrstufigen, schaufelintegrierten Rotorsegments (engl: »Multi-BLIR«-Segment) soll ein Schaufelspitzenreparaturprozess demonstriert werden.

### Vorgehensweise

Durch den Vergleich der gemessenen Ist-Schaufelspitzengeometrie mit der Soll-Geometrie wurde mit Hilfe der am Fraunhofer ILT entwickelten CAM-Software »LMDCAM2« das aufzubauende Differenzvolumen ermittelt und in mehrere Lagen geschnitten (Bild 1). Je Lage wurden entlang des Schaufelprofils Stützpunkte erzeugt. Dabei wurden zu jedem Stützpunkt an die lokal vorliegende Schaufelgeometrie

- 1 Mit »LMDCAM2« erzeugte Werkzeugbahnen zur Schaufelspitzenreparatur.
- 2 Ergebnis der Schaufelspitzenreparatur eines »Multi-BLIR«-Segments.

angepasste Startprozessparameter (Laserstrahldurchmesser, Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit für einen gewählten Pulvermassenstrom) aus Prozessdiagrammen ermittelt.

### Ergebnis

Mit dieser Vorgehensweise und dem eingestetzten CAM-Tool wurde eine an die Geometrie angepasste Schaufelspitzenreparatur an einem »Multi-BLIR«-Segment erfolgreich demonstriert (Bild 2.) Dadurch kann der Aufwand zur LA-Prozessentwicklung von Schaufelgeometrien signifikant reduziert werden, so dass lediglich kleine Anpassungen der Prozessparameter erforderlich sind.

### Anwendungsfelder

Das Konzept des LA-Technologieprozessors ist prinzipiell für alle Reparaturanwendungen denkbar. Anwendungsfelder sind insbesondere der Turbomaschinenbau und der allgemeine Maschinenbau.

Der Fraunhofer-Innovationscluster »AdaM« wurde durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) »Investition in Zukunft« gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Marco Göbel  
 Telefon +49 241 8906-8058  
 marco.goebel@ilt.fraunhofer.de

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





3



4

## ROBOTERBASIERTES LASER- AUFTRAGSCHWEISSEN MIT CAD/CAM-KOPPLUNG

### Aufgabenstellung

Im Rahmen des Fraunhofer-Innovationsclusters »AdaM« (Adaptive Produktion für Ressourceneffizienz in Energie und Mobilität) wird eine roboterbasierte Anlage, bestehend aus einem 6-Achs-Knickarm-Roboter mit einem Drehkipppmodul, aufgebaut und für die Reparatur und Fertigung von Turbinenmaschinenanwendungen genutzt. So sollen z. B. geometrisch komplex geformte Turbinenschaufeln repariert werden. Die Erstellung der Roboterbahnen soll auf Basis von CAD-Daten mit der am Fraunhofer ILT entwickelten Software »LMDCAM2« realisiert werden.

### Vorgehensweise

Die Inbetriebnahme des Roboters wurde erfolgreich abgeschlossen. Einfache Verfahrensbewegungen können durch Teach-In-Betrieb sehr schnell über die Robotersteuerung programmiert werden. Sollen jedoch Roboterbahnen auf Basis von CAD-Daten erzeugt werden, muss auf eine entsprechende CAD/CAM-Software zurückgegriffen werden. Mit »LMDCAM2« können sowohl die 3D-Modelle der zu reparierenden oder zu fertigenden Bauteile als auch das Robotermodell inklusive Definition der Kinematik eingelesen und grafisch animiert werden. So können entsprechend der jeweiligen Schweißstrategie Roboterbahnen erstellt werden. Vorab können die Roboterbewegungen am Computer simuliert werden, um mögliche Kollisionen des Roboters auszuschließen.

### Ergebnis

Zur additiven Fertigung von Demonstratorbauteilen durch Laserauftragschweißen wird »LMDCAM2« erfolgreich zur Generierung von Roboterbahnen auf Basis von CAD-Daten eingesetzt. Die Demonstratorbauteile sind geometrisch komplex geformt, was unter Zuhilfenahme der Flexibilität des Roboters durch verschiedene Anstellwinkel und -orientierungen der Bearbeitungsoptik realisiert werden kann.

### Anwendungsfelder

Aufgrund seiner großen Flexibilität ist der Roboter prinzipiell für alle Arten von Reparatur- und Fertigungsanwendungen in verschiedenen Branchen (z. B. Luftfahrt, Turbinenbau, Werkzeugbau) geeignet. Durch seine größere Bewegungsfreiheit gegenüber kartesischen Anlagen kann er besonders für Anwendungen interessant sein, bei denen die Zugänglichkeit zur Bearbeitungsstelle stark eingeschränkt ist.

Der Fraunhofer-Innovationscluster »AdaM« wird durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) »Investition in Zukunft« gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Patrick Albus  
Telefon +49 241 8906-479  
patrick.albus@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. John Flemmer  
Telefon +49 241 8906-137  
john.flemmer@ilt.fraunhofer.de

3 *Robotermodell in »LMDCAM2«.*  
4 *Laserauftragschweißprozess  
am Demonstratorbauteil.*



## AUTOMATISIERTE VERMESSUNG VON PULVERDÜSEN

### Aufgabenstellung

Beim Auftragschweißen mit Laserstrahlung kommt der Pulverzufuhr in das Schmelzbad eine entscheidende Bedeutung zu. Der Pulvernutzungsgrad, die Oxidation durch die umgebende Atmosphäre sowie die Geometrie und Rauheit der Schicht werden dadurch maßgeblich bestimmt. Daher besteht die Notwendigkeit, den Pulvergasstrahl zur Sicherstellung der Prozessqualität zu charakterisieren. Am Fraunhofer ILT wurde ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, Pulverdüsen standardisiert zu vermessen. Zur Nutzung des Verfahrens wurde ein System nach industriellen Standards aufgebaut, welches es ermöglicht, die Vermessung automatisiert durchzuführen.

### Vorgehensweise

Die Standardisierung und Automatisierung des Messvorgangs ist die Voraussetzung für die Vergleichbarkeit von charakteristischen Merkmalen der Pulverzufuhr. Dazu gehören die Partikeldichteverteilung und Kaustik des Pulvergasstrahls sowie daraus abgeleitete Kennzahlen wie Lage und Größe des Pulverfokus. Um die geforderten Größen messtechnisch erfassen zu können, wird der Pulvergasstrahl mit einer Laserlinie senkrecht zur Pulvergasströmung beleuchtet und von einer koaxial angeordneten Kamera durch die Pulverdüse

hindurch beobachtet. Eine hohe Bildrate erlaubt, die einzelnen Pulverpartikel in Anzahl und Position zu erfassen. Durch schrittweises Verfahren entlang des Pulvergasstrahls werden einzelne Schichten aufgenommen, um mit entsprechenden Algorithmen die Partikeldichteverteilung zu errechnen.

### Ergebnis

Ein System zur automatisierten und standardisierten Vermessung von Pulverzufuhrdüsen steht zur Verfügung, um die Zertifizierung einzelner Pulverdüsen durchzuführen. Das Messverfahren eröffnet erstmalig die Möglichkeit, einen Pulvergasstrahl vollständig zu charakterisieren. Das Verfahren konnte für unterschiedliche Pulverdüsen und Pulverkornfraktionen qualifiziert werden.

### Anwendungsfelder

Zu den Anwendungsgebieten zählen alle Aktivitäten im Bereich Auftragschweißen mit Laserstrahlung, bei denen die genaue Kenntnis des Pulvergasstrahls erforderlich ist. Diese Kenntnisse können bei der Prozessentwicklung, der Düsenentwicklung und der Produktion von Bauteilen mit hohen Qualitätsanforderungen genutzt werden.

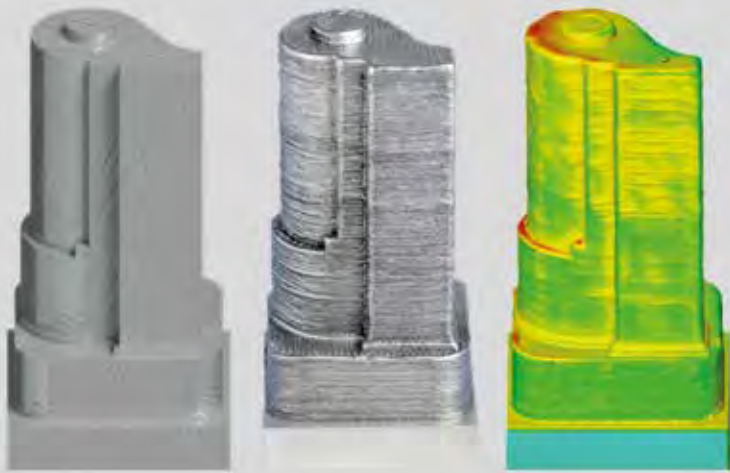
### Ansprechpartner

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 System zur automatisierten  
Vermessung von Pulverdüsen.

2 Pulverdüse im Messsystem.



3



4

## ADDITIVE FERTIGUNG IM WERKZEUG- UND AUTOMOBILBAU MIT LMD UND SLM

### Aufgabenstellung

Im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts »E<sup>3</sup>-Produktion« wird die Ressourceneffizienz additiver Fertigungsketten untersucht. Dazu werden für zwei Referenzbauteile (Spritzgießwerkzeug und PKW-Achsschenkel) die additiven Fertigungsketten umgesetzt und die Ressourcenströme entlang dieser Fertigungsketten bestimmt (insbesondere Energie, Material und Zeit). Die additive Herstellung der Referenzbauteile ist Grundlage für die Ressourcenbewertung der additiven Fertigungskette und stellt eine zentrale Aufgabe dar. Das Spritzgießwerkzeug wird mit LMD hergestellt, die Herstellung des PKW-Achsschenkels erfolgt mit SLM. Die Bilanzierung der Ressourcenströme beginnt bei der Pulverherstellung und endet bei der Nachbearbeitung der Referenzbauteile.

Zusammen mit den Projektpartnern erfolgt ebenfalls die Ressourcenbilanzierung entlang der konventionellen Fertigungsketten zur Herstellung der Bauteile. So wird eine Grundlage zur Bewertung der erfassten Ressourcendaten geschaffen.

### Vorgehensweise

Die Arbeiten zur Herstellung der Referenzbauteile beginnen mit der Auswahl geeigneter Werkstoffe. Das Spritzgießwerkzeug wird mit LMD aus dem Warmarbeitsstahl 1.2343 gefertigt. Für die Herstellung des PKW-Achsschenkels mit SLM wird die Aluminiumlegierung AlSi10Mg genutzt. Ausgangspunkt zur Fertigung der Referenzbauteile sind die CAD-Daten,

die durch die Partnerunternehmen (BMW Group und WBA) bereitgestellt werden. Für die Auslegung des LMD-Prozesses wird eine geeignete Aufbaustrategie entwickelt. Dabei werden die CAD-Daten genutzt, um eine endkonturnahe Bahnplanung zum Aufbau des Spritzgießwerkzeugs mit der Software »LMD-CAM2« umzusetzen. Für die Auslegung des SLM-Prozesses wird eine angepasste Stützstrategie zur Positionierung des Achsschenkels im Bauraum erarbeitet sowie die Führung der Schutzgasströmung angepasst.

### Ergebnis

Die Bauteile werden mit beiden Verfahren gefertigt und deren Maßhaltigkeit überprüft. Das Aufmaß der Seitenwände des Spritzgießwerkzeugs beträgt maximal ca. 800 µm. Der Achsschenkel weist ein mittleres Aufmaß von ca. 400 µm auf.

### Anwendungsfelder

Die Untersuchungen sind auf Anwendungen im Werkzeug- und Automobilbau ausgerichtet. Die gewonnenen Erkenntnisse können auch in anderen Branchen genutzt werden.

Dieses Projekt wird finanziell durch die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt.

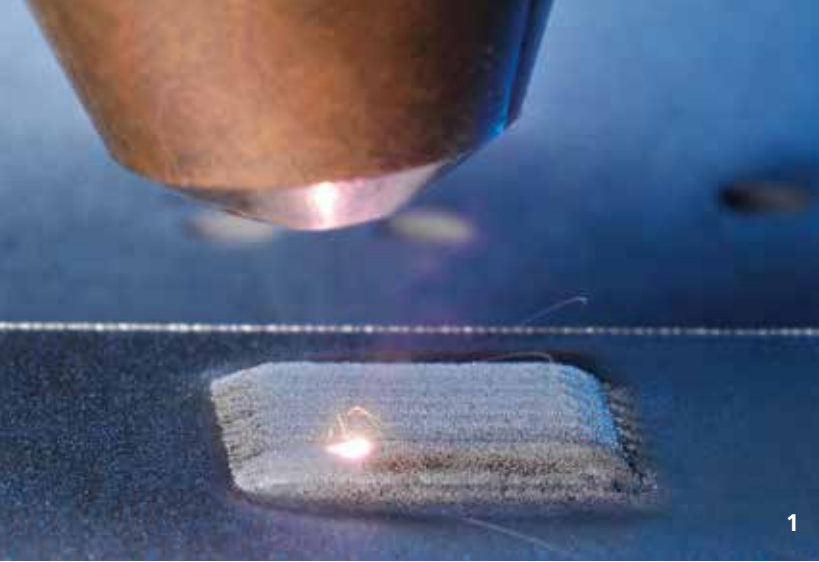
### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Moritz Alkhayat  
Telefon +49 241 8906-445  
moritz.alkhayat@ilt.fraunhofer.de

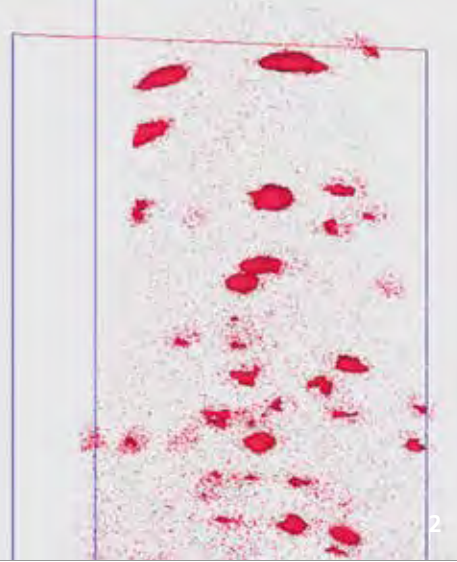
Dr. Andres Gasser  
Telefon +49 241 8906-209  
andres.gasser@ilt.fraunhofer.de

3 Mittels LMD hergestelltes Spritzgießwerkzeug.

4 Mittels SLM hergestellter PKW-Achsschenkel.



1



2

## INTRINSISCHE WÄRME- BEHANDLUNG BEI DER ADDITIVEN FERTIGUNG

### Aufgabenstellung

Das Selective Laser Melting (SLM) und das Laser Metal Deposition (LMD) sind wichtige Verfahren der additiven Fertigung. Additiv gefertigte Bauteile aus konventionellen Legierungen erfordern jedoch häufig eine nachträgliche Wärmebehandlung. Dabei handelt es sich in der Regel um eine Auslagerung, bei der Ausscheidungen entstehen, die die Festigkeit der Bauteile steigern. Dies ist ein zusätzlicher Prozessschritt, der zudem häufig mit einem weiteren Verzug der Bauteile verbunden ist. Eine Alternative ist eine intrinsische Wärmebehandlung, welche auf die beim SLM/LMD auftretenden kurzen Temperatur-Zeit-Zyklen von wenigen Sekunden abgestimmt werden muss. Dazu müssen Verfahrenstechnik und Legierungssystem angepasst werden. Dies wird in Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung (MPIE) u. a. für aushärtbare Aluminiumbasislegierungen (Aluminium-Scandium) untersucht.

### Vorgehensweise

Durch die Variation der Prozessbedingungen, z. B. durch Vorheizen oder eine schichtweise Laserwärmebehandlung, sollen nach der raschen Erstarrung Ausscheidungen aus der übersättigten Matrix erzeugt werden. Parallel dazu wird die Ausscheidungskinetik an die Kurzzeitwärmebehandlung durch gezielte Veränderung der Legierungskonzepte angepasst.

1 LMD von Scalmalloy®.

2 Nanoskalige Ausscheidungen  
des Typs  $Al_3Sc$  (Quelle: MPIE).

### Ergebnis

Im ersten Schritt wurden Verfahrensparameter für die Herstellung dichter und möglichst defektfreier Volumenkörper erarbeitet. Für die Al-Sc-Legierung Scalmalloy® konnte bereits die Bildung nanoskaliger Ausscheidungen des Typs  $Al_3Sc$  im Prozess nachgewiesen werden. Verteilung und Größe der Ausscheidungen sind jedoch noch inhomogen.

### Anwendungsfelder

Die Anwendungsfelder liegen insbesondere dort, wo höchste Ansprüche an additiv gefertigte Bauteile gestellt werden, z. B. im Turbomaschinenbau, in der Werkzeugtechnik, der Medizintechnik und der Luft- und Raumfahrt.

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

### Ansprechpartner

Markus Benjamin Wilms M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-567  
markus.benjamin.wilms@ilt.fraunhofer.de

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





## ADDITIVE FERTIGUNG MIT EISENALUMINID- LEGIERUNGEN

### Aufgabenstellung

Eisentaluminid-Legierungen sind als Konstruktionswerkstoff für den Leichtbau von steigendem Interesse und können zukünftig z. B. hochlegierte Chromstähle ersetzen. Mittels laserbasierter additiver Fertigung wurden bisher binäre Eisentaluminid-Legierungen erfolgreich verarbeitet. Beim Laser Metal Deposition (LMD) und Selective Laser Melting (SLM) entsteht jedoch trotz der hohen Abkühlraten eine in Aufbaurichtung gerichtete erstarrte Kornstruktur. Epitaxie führt dabei zu Körnern, die über viele Lagen hinweg wachsen. Binäre Legierungen sind zudem aufgrund der  $\text{Fe}_3\text{Al}$ - $\text{FeAl}$ -Phasenumwandlungen nicht für Anwendungen bei mehr als  $550\text{ }^\circ\text{C}$  geeignet. Legierungstechnische Maßnahmen können sowohl zur Kornfeinung als auch zur Stabilisierung der  $\text{Fe}_3\text{Al}$ -Phase führen.

### Vorgehensweise

Titan und Bor werden als Legierungszusätze untersucht. Die Zugabe von Titan dient der Kornfeinung und der Festigkeitssteigerung durch Mischkristallbildung. Bor bildet Titanboride auf den Korngrenzen, die das Kornwachstum hemmen und die Kriechfestigkeit steigern.

### Ergebnis

Defektfreie Volumenkörper mit einer Dichte größer 99,5 Prozent werden sowohl mit SLM als auch mit LMD hergestellt. Aufgrund der größeren Spröd-Duktil-Übergangstemperatur von Fe-Al-Ti und Fe-Al-Ti-B im Vergleich zu binärem Fe-Al ist

eine höhere Vorheiztemperatur erforderlich ( $400 - 600\text{ }^\circ\text{C}$  gegenüber  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ). Durch die Zugabe von Titan konnte eine Reduzierung der Korngröße von größer  $1\text{ mm}$  auf ca.  $20 - 50\text{ }\mu\text{m}$  erreicht werden. Die Zugabe von Bor führt durch Bildung von Titanborid auf den Korngrenzen zu einer weiteren Kornfeinung mit einer durchschnittlichen Korngröße von  $3\text{ }\mu\text{m}$ . Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

### Anwendungsfelder

Zukünftige Anwendungen von ternären oder quaternären Fe-Al-Legierungen liegen in mechanisch, chemisch, thermisch und korrosiv hochbelasteten Bauteilen. Beispiele sind in Turbintriebwerken, in Aggregaten zur Energieumwandlung oder in der Luft- und Raumfahrt zu finden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben »RADIKAL« wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03X3574F durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Gesa Rolink  
Telefon +49 241 8906-365  
gesa.rolink@ilt.fraunhofer.de

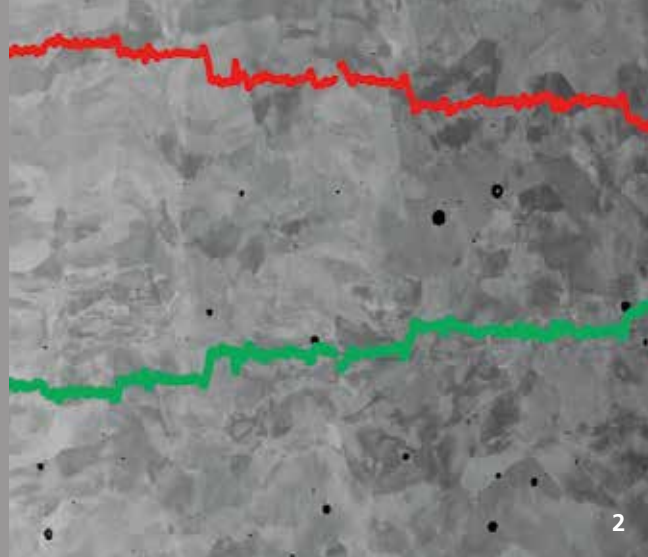
Dr. Andreas Weisheit  
Telefon +49 241 8906-403  
andreas.weisheit@ilt.fraunhofer.de

3 Impeller-Demonstrator aus Fe-Al-Ti-B.  
4 EBSD-Aufnahmen von Fe-Al, Fe-Al-Ti  
und Fe-Al-Ti-B (v. l.).





1



2

## FUNKTIONSANGEPASSTE BAUTEILE DURCH WERK- STOFFGRADIERUNG

### Aufgabenstellung

Mit einer Werkstoffgradierung kann ein Bauteil optimal an das Belastungsprofil angepasst werden. Eine potenzielle Anwendung sind Turbinenschaufeln. Die Belastungen innerhalb einer Schaufel sind in der Regel lokal unterschiedlich. Der Fuß muss in erster Linie eine hohe Festigkeit aufweisen, das Schaufelblatt auch gegen Korrosion und Abrasion geschützt sein. Weiterhin sind Gradierungen für die hybride Bauweise von Interesse. Laser Metal Deposition (LMD) ermöglicht als additives Fertigungsverfahren durch die Pulverdüsentechnik die Herstellung gradierter Werkstoffe. Die Untersuchungen erfolgen am Beispiel von Eisenaluminid-Legierungen, die als Konstruktionswerkstoff für den Leichtbau in heißer oder korrosiver Umgebung von steigendem Interesse sind. Untersucht werden die schichtweise Erhöhung des Aluminium-Gehalts (verbesserte Oxidationsbeständigkeit) und eine Gradierung zu Edelstahl (hybride Bauweise).

### Vorgehensweise

Die Gradierung wird in-situ durch simultane Zufuhr von zwei Pulverkomponenten erreicht. Eine Komponente ist die binäre Legierung Fe-28At.-%Al. Die zweite Komponente ist reines Al bzw. 1.4404. Über die Variation der zugeführten Pulvermassenströme wird die Zusammensetzung jeder Schicht definiert eingestellt.

1 *Volumenkörper aus Fe-Al.*

2 *Verlauf der Elementkonzentration Fe (rot) und Al (grün, 0 bis 40 At.-%) über Querschliff einer gradierten Probe.*

### Ergebnis

Im ersten Ansatz wird ein stufenförmiger Anstieg der Legierungszusammensetzung durch einen kontinuierlichen Anstieg der Pulverförderrate von Al eingestellt. Der Al-Gehalt wird dabei von 28 auf über 40 At.-% über eine Bauhöhe von 5 mm gesteigert. Im zweiten Ansatz wird auf einem Edelstahlsubstrat zunächst 1.4404 aufgebaut. In jeder weiteren Schicht wird der 1.4404-Anteil reduziert, während der Fe-28At.-%Al-Anteil gesteigert wird. Die zehnte und letzte Schicht besteht aus der binären Fe-Al-Legierung. In beiden Fällen werden defektfreie Volumenkörper aufgebaut.

### Anwendungsfelder

Zukünftige Anwendungen einer gradierten oder hybriden Bauweise liegen in erster Linie in hochbelasteter und komplexer Beanspruchungsumgebung wie z. B. in Turbintriebwerken oder Pumpen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben »RADIKAL« wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03X3574F durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Gesa Rolink  
Telefon +49 241 8906-365  
gesa.rolink@ilt.fraunhofer.de

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



## SCHUTZSCHICHTEN AUS WOLFRAM FÜR HOCHTEMPERATURANWENDUNGEN

### Aufgabenstellung

Wolfram eignet sich aufgrund seiner hohen Schmelztemperatur und hohen Dichte hervorragend als Werkstoff zum Schutz vor Verschleiß, Korrosion und Strahlung bei hohen Temperaturen. Aus Kostengründen und der schlechten spanenden Bearbeitbarkeit wird Wolfram aber nur selten als Vollmaterial eingesetzt. Als Alternative bieten sich Beschichtungen an. In Kooperation mit dem INR (Institut für Neutronenphysik und Reaktorsicherheit) des Karlsruher Instituts für Technologie ist das Ziel die Anpassung des Laserauftragschweißens zur Herstellung porenarmer und rissfreier Schichten aus reinem Wolfram auf einem Stahlwerkstoff.

### Vorgehensweise

Als Strahlquelle für das Laserauftragschweißen wird ein 3 kW Diodenlaser eingesetzt. Wolfram wird dem Prozess in Pulverform über eine Koaxial-Pulverdüse zugeführt. Zur Reduzierung der Rissbildung wird das Substrat auf eine Temperatur von ca. 330 °C erwärmt.

### Ergebnis

Mittels des Laserauftragschweißens können porenarme und rissfreie Wolframschichten mit Dicken bis zu einem Millimeter realisiert werden. Aufgrund der großen Schmelzpunktunterschiede wird ein erheblicher Anteil des Substratwerkstoffs aufgeschmolzen. Durch Mehrlagenbeschichten gelingt es jedoch schon mit einem konstanten Parametersatz, einen Wolframgehalt von bis zu 85 Massenprozent in der Schicht einzustellen. Die Schichten werden derzeit am INR getestet. Von weiterführenden Untersuchungen wird erwartet, dass die Aufmischung des Substrats durch Anpassung der Verfahrensparameter an den Mehrlagenschichtaufbau weiter reduziert werden kann.

### Anwendungsfelder

Eine mögliche Anwendung ist ein Fusionsreaktor, um darin durch Beschichten mit Wolfram die Lebensdauer der »First Wall« bei Heliumbeschuss zu erhöhen. Weitere potenzielle Anwendungsfelder liegen z. B. in der Starkstrom- oder Plasmatechnik.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Dora Maischner  
Telefon +49 241 8906-8017  
dora.maischner@ilt.fraunhofer.de

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

3 REM-Aufnahme einer Wolframschicht  
mit 200-facher Vergrößerung.



1

## DATENBANK ZUM LASER-AUFTRAGSCHWEISSEN

### Aufgabenstellung

Die Datenbank für das Laserauftragschweißen (LA) verfolgt zwei Ziele. Zum einen wird das auf viele Personen verteilte Prozesswissen zum LA systematisch, zentral und einheitlich dokumentiert (Wissensmanagement). Zum anderen wird durch die digitale Ablage von Systemtechnik-, Werkstoff-, Prozess- und Ergebnisdaten eine Datenbasis geschaffen, auf die Mitarbeiter direkt oder über Softwarewerkzeuge (Technologieprozessor und CAx-Systeme) zugreifen können.

### Vorgehensweise

Zunächst wurde die Datenstruktur durch intensive Diskussion mit Endanwendern des LA erarbeitet und iterativ in mehreren Stufen verfeinert.

Die entstandene umfangreiche Datenstruktur hat ergeben, dass eine Datenbank nur dann erfolgreich eingeführt werden kann, wenn gleichzeitig eine interaktive und benutzerfreundliche Bedienoberfläche verfügbar ist.

Zur Auswahl eines geeigneten Datenbanksystems wurden mehrere Alternativen hinsichtlich Zeit- und Kostenaufwand, der Benutzerfreundlichkeit, der Verfügbarkeit kommerzieller Systeme, der Umsetzbarkeit bei den Projektpartnern, der zukünftigen Wartung und Pflege des Systems und der Komplexität der Umsetzung der LA-Datenstruktur bewertet.

Ausgewählt wurde schließlich das kommerziell verfügbare Datenbanksystem »Granta ML« der Firma Granta Design. Die erarbeitete Datenstruktur wurde in das Datenbanksystem eingepflegt.

### Ergebnis

Das Datenbanksystem steht den Mitarbeitern des Fraunhofer ILT zur Verfügung und es werden kontinuierlich Daten aus abgeschlossenen und laufenden Projekten in das System eingepflegt.

### Anwendungsfelder

Die Ergebnisse können für das LA in allen Branchen (Energietechnik, Luftfahrt, Werkzeug- und Formenbau etc.) und zu allen denkbaren Aufgabenstellungen (Beschichtung, Reparatur und generativer Aufbau) eingesetzt werden.

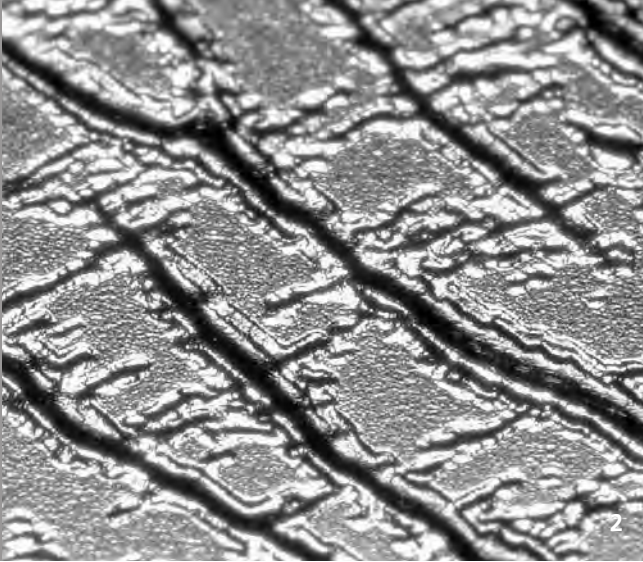
Der Fraunhofer-Innovationscluster »AdaM« wird durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) »Investition in Zukunft« gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Frank Mentzel  
 Telefon +49 241 8906-603  
 frank.mentzel@ilt.fraunhofer.de

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

1 Screenshot der Datenbankschnittstelle.



## LASERUMSCHMELZ- STRUKTURIERUNG (LUST) AUF CoCr28Mo

### Aufgabenstellung

Die Strukturierung von Oberflächen ist in vielen Bereichen von elementarer Bedeutung. Die Kobalt-Chrom-Legierung CoCr28Mo findet ein breites Anwendungsspektrum, insbesondere in der Medizintechnik, wo sie schwerpunktmäßig u. a. für Implantate verwendet wird. Derzeit verwendete Strukturierungsverfahren (z. B. Ätzen, Laserabtrag...) sind jedoch meistens zeit- und/oder kostenintensiv und basieren auf einer Strukturierung durch Materialabtrag. Beide Verfahren erzeugen oftmals raue Oberflächen, die z. B. für medizinische Anwendungen im Dental- oder Implantatbereich nur eingeschränkt eingesetzt werden können. Defizite liegen weiterhin häufig in den geringen Abtragraten.

### Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT wird daher ein neues Verfahren zur Laserumschmelzstrukturierung (LUST) entwickelt. Dabei schmilzt ein Laserstrahl die Metalloberfläche lokal auf. Gleichzeitig wird die Laserleistung mit Frequenzen zwischen 10 Hz - 10 kHz moduliert. Dies führt zu einer kontinuierlichen Veränderung der Schmelzbadgröße, so dass das Material umverteilt wird. Es werden dabei Berge und Täler erzeugt, die zur Hälfte oberhalb und zur anderen Hälfte unterhalb ihres Ausgangsniveaus liegen. Die Randschicht erstarrt direkt aus der Schmelze, so dass neben der Strukturierung die Oberfläche gleichzeitig poliert wird. Zur Erweiterung des Spektrums der mittels LUST bearbeitbaren Materialien (z. B. 1.2343, Ti6Al4V, IN718, 100Cr6) werden im Rahmen des von der VW-Stiftung geförderten Projekts »WaveShape« systematische Untersuchungen für CoCr28Mo anhand von Einzelspuren durchgeführt.

### Ergebnis und Anwendungsfelder

Die Untersuchungen zeigen, dass sich CoCr28Mo grundsätzlich gut zur LUST eignet (Bild 2). Dabei wird anhand von Einzelspuren gezeigt, dass Strukturen mit einer Höhe von mehr als 4 µm durch einen einzigen Bearbeitungsschritt erzeugt werden können. Dies entspricht ungefähr der gleichen Strukturhöhe, die mit vergleichbaren Verfahrensparametern auf dem Werkzeugstahl 1.2343 erzeugt werden kann. Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass ebenso Bearbeitungszeiten von 2 - 3 min/cm<sup>2</sup> für ca. 200 µm hohe Wellenstrukturen ermöglicht werden (analog zu 1.2343). Das Verfahren eignet sich zur Erzeugung einer breiten Palette von aperiodischen und periodischen Strukturen (Bild 2, 3). Die strukturierten Oberflächen weisen dabei eine kleine Mikrorauheit ( $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ ) auf. Potenzielle Anwendungsfelder für derartige Strukturen liegen u. a. in der Implantattechnik, z. B. für strömungsangepasste Strukturen zur Optimierung von biomechanischen Wechselwirkungen zwischen Körper und strukturierter Implantatoberfläche.

Die Arbeiten wurden u. a. unter Nutzung von Geräten und Anlagen durchgeführt, die im Rahmen des EFRE-Programms für Nordrhein-Westfalen im Ziel »Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung« 2007 - 2013 unter dem Förderkennzeichen 290047022 gefördert wurden.

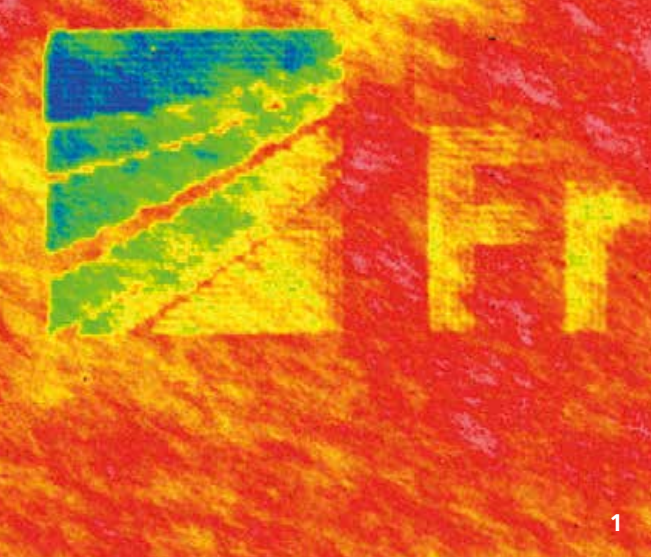
### Ansprechpartner

Dr. Dr. André Temmler  
Telefon +49 241 8906-299  
andre.temmler@ilt.fraunhofer.de

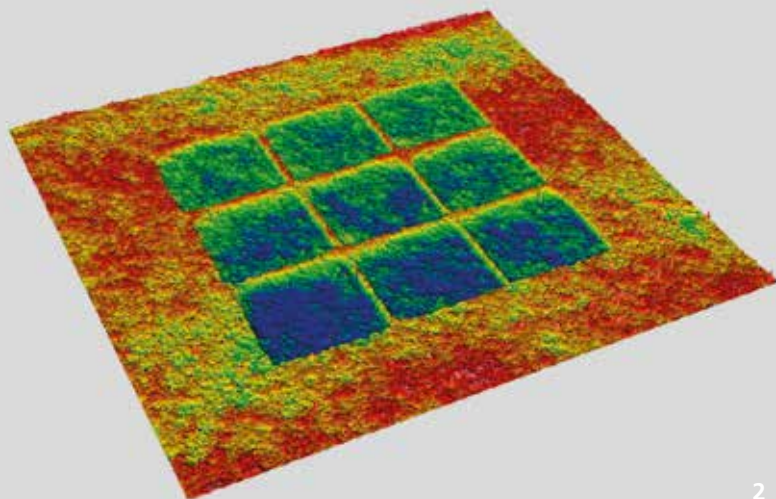
2 *Aperiodische Holzmaserungsstruktur auf CoCr28Mo.*

3 *Demostrukturen mittels LUST-Verfahren auf CoCr28Mo.*





1



2

## LASERFORMKORREKTUR VON OPTIKEN

### Aufgabenstellung

Asphärische Glasoptiken weisen im Vergleich zu Sphären abbildungstechnische Vorteile auf, sind mit derzeit etablierten Fertigungsmethoden jedoch wesentlich teurer in der Herstellung. Mittels Laserpolieren lassen sich bereits Optiken beliebiger Oberflächenform und damit ebenfalls Asphären in kürzester Zeit bearbeiten und die Rauheit auf für Beleuchtungsoptiken ausreichende Werte verkleinern. Um die nach dem Laserpolieren verbleibende Welligkeit zu verkleinern und die Ist- der Soll-Form anzunähern, wird am Fraunhofer ILT eine laserbasierte Formkorrektur als Ergänzung zum Laserpolieren entwickelt.

### Vorgehensweise

Das Wirkprinzip der Laserformkorrektur beruht auf dem selektiven oberflächennahen Abtragen des Glasmaterials durch Verdampfen. Das lokale Abtragsvolumen kann dabei durch die Verwendung von gepulster  $\text{CO}_2$ -Laserstrahlung und die Variation der Pulsdauer hochgenau angepasst werden. Somit können mittels der laserbasierten Formkorrektur selektiv kleinste Mengen Glasmaterial durch Verdampfung entfernt werden.

- 1 Weißlichtinterferometeraufnahme zur Demonstration des selektiven Feinstabtrags.
- 2 Testfelder zum Feinstabtrag auf einer konventionell polierten Glasoberfläche.

### Ergebnis

Mittels Laserformkorrektur kann Quarzglas mit einer vertikalen Auflösung von unter 5 nm und einer lateralen Auflösung von 100  $\mu\text{m}$  selektiv abgetragen werden. Dabei wird die Ausgangsrauheit der polierten Oberfläche nicht beeinflusst. Durch eine Vermessung laserpolierter Planflächen und Erfassung der von der Soll-Form abweichenden Bereiche können diese selektiv mittels Laserformkorrektur bearbeitet und dadurch die Formgenauigkeit vergrößert werden. Durch Anpassung des Verfahrens auf gekrümmte Oberflächen sollen in Zukunft auch Asphären auf diese Weise bearbeitet werden.

### Anwendungsfelder

Aufgrund der kurzen Bearbeitungszeit und der großen Flexibilität hinsichtlich der zu bearbeitenden Oberflächenform ist das Hauptanwendungsgebiet die schnelle und kostengünstige Formkorrektur von nichtsphärischen optischen Komponenten in kleiner bis mittlerer Stückzahl. Dabei kann die Laserformkorrektur sowohl mit dem Laserpolieren als auch mit konventionellen Bearbeitungsverfahren zur Optikfertigung kombiniert werden. Weiterhin wird eine komplett laserbasierte Optikfertigung entwickelt, bei welcher die Formgenerierung ebenfalls durch Materialabtrag mittels Laserstrahlung erfolgen soll.

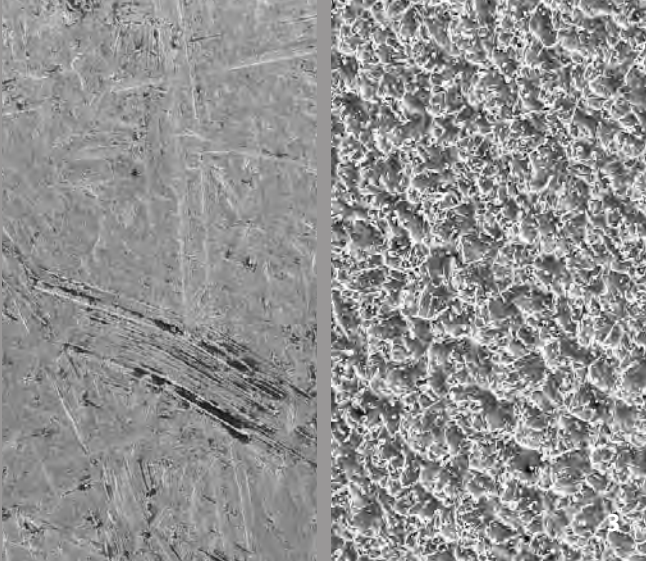
Die Arbeiten wurden im Rahmen des BMBF-Vorhabens «Rapid-Optics» unter dem Förderkennzeichen 13N13294 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Christian Weingarten M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-282  
christian.weingarten@ilt.fraunhofer.de

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





## LASERBASIERTE VOR- BEHANDLUNG METALLISCHER OBERFLÄCHEN ZUR ERHÖHUNG DER HAFTUNG

### Aufgabenstellung

Die Verwendung von applikationsangepassten Verbundwerkstoffen oder Multi-Material-Beschichtungen bietet oftmals eine Möglichkeit, den wachsenden Anforderungen an Werkstücke und Komponenten zu begegnen. Dabei stellt die Haftvermittlung zwischen den jeweiligen Schichten eine zentrale Herausforderung dar, insbesondere für Klebeverbindungen oder Metall-Kunststoff-Verbindungen. Ein vielversprechender Ansatz, die Haftung zu verbessern, ohne eine funktionsrelevante Beeinträchtigung des Grundmaterials zu induzieren, ist die Vorbehandlung eines Fügepartners mit gepulster Laserstrahlung.

### Vorgehensweise

Für die Laservorbehandlung wird vorzugsweise gepulste Laserstrahlung der Wellenlänge  $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$  verwendet, die mittels eines 2D- oder 3D-Scannersystems mäanderförmig oder unidirektional über das Werkstück geführt wird. Typische Pulslängen liegen dabei im Bereich 5 - 100 ns bei Repetitionsraten von einigen Kilohertz bis zu einem Megahertz. Zur Charakterisierung der Oberflächen stehen am Fraunhofer ILT Rasterelektronenmikroskopie, Weißlichtinterferometrie oder energiedispersive Röntgenspektroskopie zur Verfügung. Das Benetzungsverhalten kann mittels Kontaktwinkelmessungen für Temperaturen bis zu 700 °C untersucht werden.

### Ergebnis

Durch die ortsselektive Energiedeposition und die kurzen Wechselwirkungszeiten kann die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks ohne eine funktionsrelevante Beeinflussung des Grundmaterials modifiziert werden. Für metallische Werkstücke (z. B. Aluminium oder Stahl) umfassen die Modifikationen dabei insbesondere chemische Änderungen (z. B. Oxidation) und Änderungen der Oberflächentopographie. Typische laterale Strukturgrößen liegen dabei zwischen 10  $\mu\text{m}$  und einigen 100  $\mu\text{m}$ .

### Anwendungsfelder

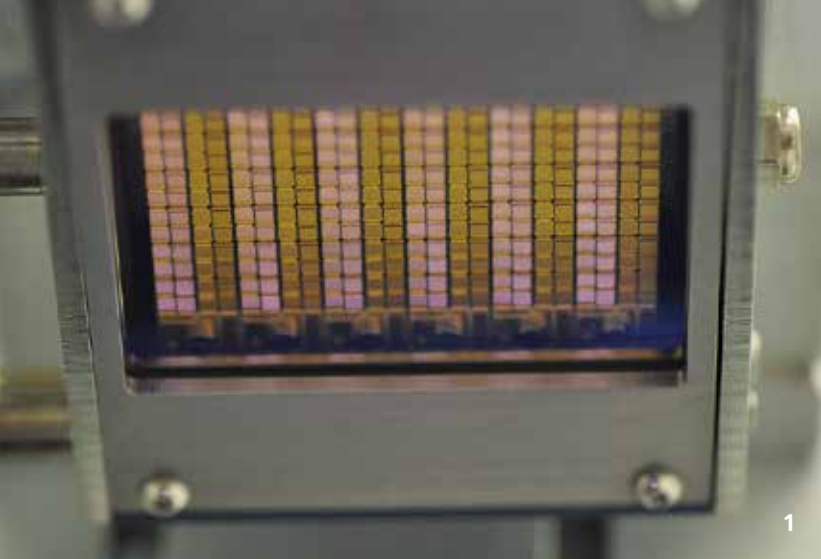
Das Hauptanwendungsfeld für dieses Verfahren stellen Verbundwerkstoffe und Multi-Material-Beschichtungen dar. Für die im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts »RESKORR« unter dem Förderkennzeichen 03X3564F hergestellten polymeren Beschichtungen auf Substraten aus Wälzlagerstahl konnte beispielsweise eine verbesserte Haftung durch Laservorbehandlung der Substrate erzielt werden.

### Ansprechpartner

Hendrik Sändker M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-361  
hendrik.saendker@ilt.fraunhofer.de

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

- 3 REM-Aufnahme einer unbehandelten (li.) und laservorbehandelten (re.) Oberfläche eines Werkstücks aus Wälzlagerstahl.
- 4 Benetzung auf unbehauelter und laservorbehandelter Oberfläche.



## FUNKTIONALISIERUNG WARMAUSHÄRTENDER LACKE MIT VCSEL

### Aufgabenstellung

Steigende Anforderungen an Funktionsschichten, wie z. B. hohe Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit, geringe Reibungskoeffizienten und hohe Härte, übersteigen zunehmend die derzeitigen Eigenschaften der Grundmaterialien. Aus diesem Grund werden artähnliche oder artfremde Schichten auf den Grundwerkstoff aufgebracht, um die geforderten Eigenschaften zu erzielen. Häufig müssen diese Schichten nach dem Aufbringen noch thermisch nachbehandelt werden. Durch die laserbasierte thermische Nachbehandlung ist es möglich, diese inlinefähig zu funktionalisieren, d. h. zu trocknen, zu härten, zu sintern oder auch zu kristallisieren. Zusätzlich bieten sog. Vertical Cavity Surface Emitting Laserstrahlquellen (VCSEL) die Möglichkeit, die Intensitätsverteilungen dem Anwendungsfall entsprechend anzupassen.

### Vorgehensweise

In ersten Versuchen wird ein VCSEL-Modul mit einer maximalen Ausgangsleistung von 2,2 kW, einer Strahlaustrittsfläche von 40 x 55 mm<sup>2</sup> und insgesamt 12 individuell ansteuerbaren Emittierreihen zum Trocknen und Härten von warmauhärtenden Lacken auf Edelstahlsubstraten verwendet. Sowohl die Beschichtung als auch die Laserbearbeitung werden unter einer Flowbox durchgeführt, um eine mögliche Kontamination der Probenoberfläche mit Verunreinigungen zu verhindern.

1 VCSEL-Modul mit separat ansteuerbaren Emittierreihen.

2 Flächig bestrahlte, beschichtete Stahlprobe.

### Ergebnis

Die Versuche zeigen, dass das Trocknen und Härten von warmauhärtenden Lacken mit VCSEL-Modulen möglich ist. Darüber hinaus kann der Verschleißkoeffizient um einen Faktor sechs im Vergleich zu Ofenprozessen gesenkt werden. Die Ursachen dafür werden derzeit untersucht. Die bisher erzielten Flächenraten liegen im Bereich einiger cm<sup>2</sup>/s.

### Anwendungsfelder

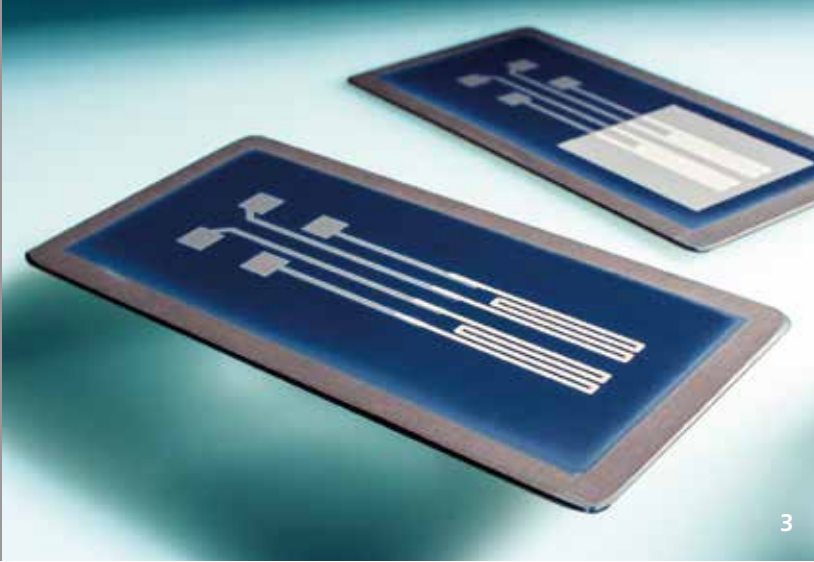
Zu den möglichen Anwendungsfeldern der VCSEL-basierten Funktionalisierung gehören insbesondere dünne, großflächig aufgetragene Schichten, die durch eine Temperatureinbringung getrocknet oder gehärtet werden können.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wird im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N13476 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Susanne Wollgarten M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-372  
susanne.wollgarten@ilt.fraunhofer.de

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



## ELEKTRONISCHE MULTI-MATERIALSYSTEME FÜR BAUTEILVERBUNDENE SENSORIK

### Aufgabenstellung

Die Lebensdauer und die Funktion von mechanischen Bauteilen werden insbesondere durch Einflüsse wie Temperaturüberhöhungen oder statische sowie dynamische Überbelastungen negativ beeinflusst. Um größere Schäden an massiven Strukturkomponenten wie z. B. Windradwälzlager, Turbinenschaufeln etc. zu vermeiden, entwickelt das Fraunhofer ILT im Rahmen des Forschungsvorhabens »INFUROS« in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IZM und IKTS gedruckte und laserfunktionalisierte Sensorsysteme für die bauteilverbundene Überwachung von massiven, metallischen Bauteilen in Temperaturbereichen bis 500 °C.

### Vorgehensweise

Neben der Entwicklung angepasster Auswerteelektronik, geeigneter Werkstoffe und Abscheidetechniken steht die Entwicklung des Laserverfahrens für die ortsselektive, substratschonende und inlinefähige Nachbehandlung der gedruckten Funktionsschichten wie Isolations- und piezoelektrische PZT-Schichten sowie Widerstands- und Leiterbahnen im Mittelpunkt. Nach der laserbasierten Oberflächenvorbehandlung zur Erhöhung der mechanischen und chemischen Haftung werden die Dickschichten aus  $\mu\text{m}$ -Partikeln aufgebracht und mittels Laserstrahlung gesintert/geschmolzen. Auf die erste Schicht zur elektrischen Isolation folgen gleichermaßen die weiteren Funktionsschichten für die Herstellung von Sensoren zur Messung von Temperatur, Dehnung oder Körperschall.

### Ergebnis

Mittels gepulster Laserstrahlung lassen sich oxidierte Oberflächenrauigkeiten auf 100Cr6-Stählen mit benetzungsfördernder Eigenschaft einbringen. Die lasergeschmolzenen elektrischen Isolationsschichten sind haftfest und zeigen eine Durchschlagsfestigkeit von 50 kV/mm. Mittels Laserstrahlung entbinderte und gesinterte PZT-Schichten sind haftfest und weisen aufgrund der wesentlich geringeren Diffusionszeiten beim Heizen (ms-Bereich) im Gegensatz zu ofengesinterten Schichten bessere dielektrische Eigenschaften ( $\epsilon_{33}$ ,  $R_{150}$ ) auf. Die Struktureinbringung lässt sich sowohl durch das Druck- als auch das Laserverfahren realisieren. So können beliebige Temperatursensorgeometrien laserfunktionalisiert werden.

### Anwendungsfelder

Zu den Anwendungsfeldern gehören Temperatur-, Dehnungs- oder Körperschallsensorüberwachungen von temperaturempfindlichen als auch von Hochtemperatur-Strukturkomponenten (z. B. Windrad-Wälzlager, Turbinenschaufeln etc.). Das Projekt »INFUROS« wird im Rahmen des Fraunhofer-internen Programms »MAVO« gefördert.

### Ansprechpartner

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

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

- 3 Gedruckte und laserfunktionalisierte Temperatursensoren vor (hinten) und nach der Reinigung (vorne) auf Stahl.  
4 Detailaufnahme Sensorstruktur.



## LASERBASIERTES INLINE- VERFAHREN ZUR TROCKNUNG VON BATTERIEELEKTRODEN- SCHICHTEN

### Aufgabenstellung

Für die wettbewerbsfähige Massenmarkteinführung der Elektromobilität müssen die Produktionskosten für Batteriezellen signifikant reduziert werden. Die Substitution konventioneller Ofenprozesse durch innovative Laserverfahren stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Bei der Trocknung mittels Rakelverfahren deponierter Batterieelektrodenschichten eröffnet der Einsatz eines Laserverfahrens aufgrund des effizienten Energieeintrags im Vergleich zur konventionellen Trocknung im Durchlaufofen ein erhebliches Energieeinsparungspotenzial. Darüber hinaus wird eine erhebliche Reduzierung des Bau-raums für die entsprechende Roll-to-Roll-Anlage erzielt.

### Vorgehensweise

Im Rahmen des Forschungsvorhabens »DRYLAS« entwickelt das Fraunhofer ILT in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IKTS ein laserbasiertes Verfahren zur Trocknung wasserbasierter Batterieelektrodenschichten. Dies erfordert eine gezielte Anpassung der laserinduzierten Temperaturverteilungen in der Art, dass bei vollständiger Trocknung des Materials Spitzentemperaturen über 300 °C vermieden werden, um temperaturempfindliche Bestandteile der ca. 50 - 100 µm dicken Schichten nicht zu beschädigen.

### Ergebnis

Die elektrochemische Prüfung von Knopfzellen auf Basis der lasergetrockneten Elektroden zeigt, dass mit Kapazitäten von ca. 355 mAh/g die Leistungsfähigkeit von konventionell her-gestellten Zellen erreicht wird. Durch Realisierung eines Tech-nologiedemonstrators in Form eines Lasertrocknungsmoduls kann in einer Inline-Beschichtungsanlage die Skalierbarkeit des Verfahrens demonstriert werden. Mit 400 W Laserleistung werden Flächenraten von ca. 60 cm<sup>2</sup>/s bei gleichzeitiger Reduzierung des Energiebedarfs um ca. 50 Prozent erzielt.

### Anwendungsfelder

Zu den Anwendungsfeldern laserbasierter Temperaturbehand-lungen im Batteriebereich gehört neben der hier beschriebenen Trocknung konventioneller Elektroden die Sinterung von Fest-körperelektroden für Dünnschichtbatterien.

Das Projekt »DRYLAS« wird im Rahmen des Fraunhofer-internen Programms »MEF« gefördert.

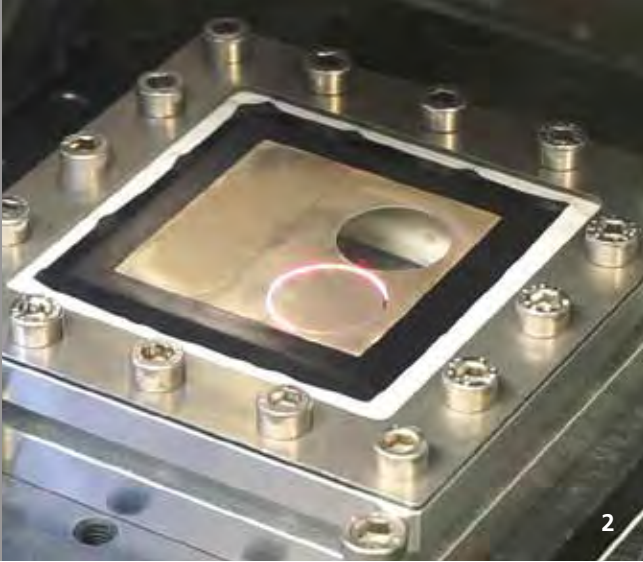
### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Philipp Lott  
Telefon +49 241 8906-8036  
philipp.lott@ilt.fraunhofer.de

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

1 Lasergetrocknete Batterieelektrodenschicht  
auf Kupferfolie.





---

## LASERSTRUKTURIEREN UND LASERSCHNEIDEN VON SOLID-STATE-BATTERIEN

---

### Aufgabenstellung

Festkörper-Lithium-Ionen-Batterien bestehen aus unterschiedlichen, nur wenige Mikrometer dicken Feststoffschichten, wodurch die Gesamtdicke der Batterie weniger als 1 Millimeter beträgt. Beim Heraustrennen von Einzelzellen aus großflächig beschichteten Batteriesubstraten darf zwischen den Schichten keine elektrische Verbindung entstehen. Beim konventionellen Laserschneiden wird Material aufgeschmolzen und aus der Schnittfuge ausgetrieben. Dies ist bei sensitiven Schichten, wie innerhalb einer Dünnschichtbatterie, nicht zulässig, da beim Aufschmelzen und Wiedererstarren eine Verbindung zwischen den einzelnen Batterieschichten entstehen kann. Der Einsatz von laserbasierten Ultrakurzpuls-Prozessen unter Inertgasatmosphäre ermöglicht diese Bearbeitungsaufgabe.

### Vorgehensweise

Durch die Verwendung von Laserstrahlquellen mit ultrakurzen Pulsen kann die Erzeugung von Schmelze und damit die Kurzschlussbildung vermieden werden. Zusätzlich können die Batterieschichten durch einen vorgeschalteten, selektiven Strukturierungsprozess im Bereich der Schnittfuge entfernt werden, was die Kurzschlussgefahr minimiert. Ebenso können Funktionselemente wie Kontaktflächen durch den selektiven Laserabtrag erzeugt werden.

### Ergebnis

Für die selektive Strukturierung und Konfektionierung von Dünnschichtbatterien wurde ein Bearbeitungssystem aufgebaut, in welchem die Lasermaterialbearbeitung mit UltrakurzpulsLasern unter Inertgasatmosphäre durchgeführt wird. Dadurch ist es möglich, auch hochreaktive Schichtsysteme zu bearbeiten. In Verbindung mit dem Einsatz von Galvanometerscannern und Achssystemen erfolgt der Prozess zudem geometrisch flexibel.

### Anwendungsfelder

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Dünnschichtbatterie-fertigung lassen sich auf die Fertigung von flexiblen OLED-Displays, Elektronikschaltungen sowie auf organische und Perovskit-Solarzellen übertragen.

Die Forschungsergebnisse sind Teil des FuE-Vorhabens »PROSOLITBAT«, das im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N13241 durchgeführt wurde.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Christian Hördemann  
Telefon +49 241 8906-8013  
christian.hoerdemann@ilt.fraunhofer.de

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

- 2 *Laserstrukturieren und Schneiden einer SSLB (Solid State Lithium Batterie).*  
3 *Mit dem Laser konfektionierte SSLB.*



## STRUKTURIEREN DÜNNER SCHICHTEN IM ROLLE-ZU-ROLLE-VERFAHREN

### Aufgabenstellung

Für die Bearbeitung von dünnen und flexiblen Materialien bietet sich das Rolle-zu-Rolle-Produktionsverfahren an. Hierdurch können kosteneffiziente Produkte für ein breites Anwendungsfeld angeboten werden, da sowohl preiswerte Substratmaterialien als auch ein hochproduktiver Prozess zum Einsatz kommen. Insbesondere in der Polymerelektronik werden Produkte in der Regel auf diese Art hergestellt. Allerdings sind die konventionellen Strukturierungsverfahren wie Lithographie nur bedingt auf diese Art der Bauteilfertigung zu übertragen. Der Einsatz von laserbasierten Prozessen ermöglicht die Bearbeitung sowohl polymerer als auch anorganischer Funktionsschichten sowie eine signifikante Erhöhung der Auflösung.

### Vorgehensweise

Durch den Einsatz hochrepetierender Ultrakurzpulslaserstrahlquellen in Kombination mit optischen Systemen zur Strahlführung und Parallelisierung werden leistungsfähige Verfahrenskomponenten in ein Rolle-zu-Rolle-Fertigungssystem integriert. Mit angepassten Ablationsstrategien sowie zeitlicher und örtlicher Energiemodulation lassen sich hohe Prozessgeschwindigkeiten und ein selektiver Laserabtrag von dünnen Schichten auf Polymeren und Metallen realisieren.

- 1 *Inline Strukturierung mit Festoptik und Scaneinheit.*
- 2 *Rolle-zu-Rolle-Bahnverlauf.*

### Ergebnis

Für die kontinuierliche laserbasierte Strukturierung von halbleitenden Schichten aus dem Bereich der Dünnschicht-photovoltaik wurde in der Rolle-zu-Rolle-Anlage ein Demonstrator umgesetzt. Mittels angepasster optischer Systeme ist das Fertigungssystem in der Lage, eine selektive Materialbearbeitung bei hohen kontinuierlichen Durchsatzraten vorzunehmen. Durch die sensorische Überwachung des zu bearbeitenden Bandmaterials in Verbindung mit dem Einsatz von Galvanometerscannern ist zudem eine geometrisch flexible Bearbeitung möglich.

### Anwendungsfelder

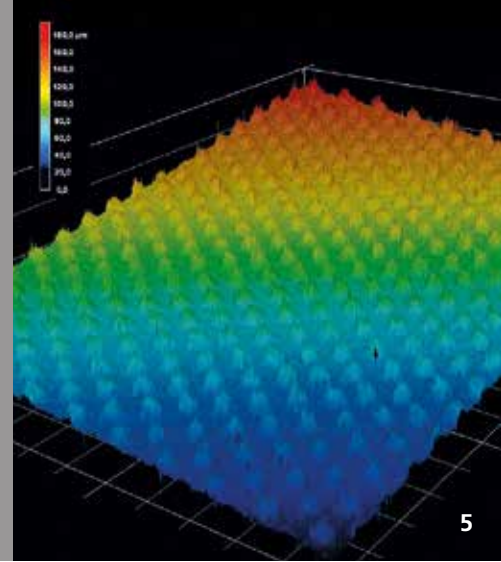
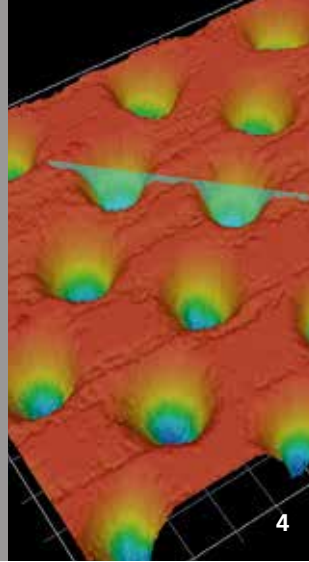
Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Dünnschichtphotovoltaik lassen sich auf die Fertigung von flexiblen OLED-Displays, Solid-State-Batterien, Elektronikschaltungen sowie RFID- und Sensoranwendungen übertragen.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des EFRE-Programms für Nordrhein-Westfalen im Ziel »Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung« 2007-2013 unter dem Förderkennzeichen EN2061 gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Christian Hördemann  
Telefon +49 241 8906-8013  
christian.hoerdemann@ilt.fraunhofer.de

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



## WERKZEUGSTRUKTURIERUNG FÜR HYDROPHOBE BAUTEILE

### Aufgabenstellung

Selbstreinigende und wasserabweisende Oberflächen sind aus der Natur bekannt und Gegenstand vielfältiger Untersuchungen. Häufig werden die entsprechenden Produkte hierfür mit geeigneten Beschichtungen versehen, die jedoch einen zusätzlichen Arbeitsschritt und zusätzliche Kosten bedeuten. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi geförderten Projekts soll eine Spritzgusswerkzeugform so strukturiert werden, dass die abgeformte Fläche hydrophobe Eigenschaften aufweist. Bei der zu strukturierenden Oberfläche handelt es sich um die frei geformte Oberfläche einer Löffelinnenseite.

### Vorgehensweise

Um eine Oberfläche mit hydrophoben Eigenschaften zu erhalten, muss sie Eigenschaften nach dem sogenannten Cassie-Baxter-Modell mit sehr eng stehenden Erhebungen mit ausreichender Höhe erhalten. Mit einem Ultrakurzpuls-Laser wird ein Raster von 15 µm breiten und tiefen konusförmigen Bohrungen in einem Abstand von 30 µm erzeugt. Da der Abtragprozess aufgrund der kurzen Wechselwirkungszeit zwischen ultrakurzem Laserpuls und Material einen hohen Verdampfungsanteil aufweist, ist die bearbeitete Oberfläche nachbearbeitungsfrei und zeigt nicht den für einen Abtrag mit Nanosekunden-Laserpulsen typischen ringförmigen Schmelzaufwurf.

### Ergebnis

Damit die im Spritzgussprozess erzeugten Bauteiloberflächen ihre hydrophoben Eigenschaften möglichst lange behalten, wird der Löffel in einem 2k-Spritzguss im Bereich der Löffelinnenseite mit einer dünnen Schicht aus Elastomer versehen. Die im Elastomer abgeformte Mikrostruktur bricht bei mechanischem Kontakt weniger leicht ab als ein Thermoplast, wie er für den übrigen Körper des Löffels verwendet wird.

Um den Einfluss verschiedener Entformungsrichtungen auf die Ausprägung der Mikrostrukturen zu untersuchen, werden die Bohrungen auf der Werkzeugoberfläche in fünf Bereichen aus verschiedenen Richtungen bearbeitet (+/- 30° in X- und Y-Richtung und senkrecht in der Mitte). Dabei zeigt sich ein weiterer Vorteil des Elastomers: die schädigungsfreie Entformbarkeit.

### Anwendungsfelder

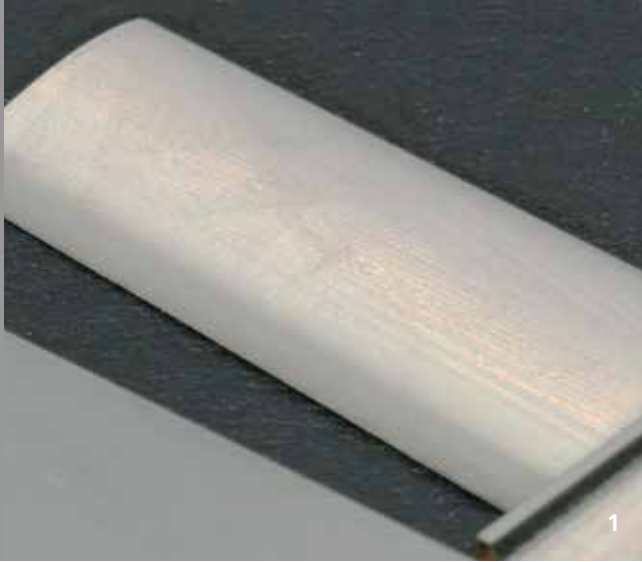
Für Anwender in der kunststoff- und elastomerverarbeitenden Industrie bietet das Verfahren die Möglichkeit zur Herstellung komplexer aber kostengünstiger bionisch funktionalisierter Produkte.

Das Projekt wurde in Kooperation mit dem Institut für Kunststoffverarbeitung IKV der RWTH Aachen University durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Andreas Dohrn  
 Telefon +49 241 8906-220  
 andreas.dohrn@ilt.fraunhofer.de

- 3 Löffel mit hydrophober Oberfläche.
- 4 Mikroskopaufnahme des Werkzeugs.
- 5 Mikroskopaufnahme der Löffeloberfläche.



## HOCHRATE-UKP-ABTRAG DURCH ZWEISTUFIGE PROZESSFÜHRUNG

### Aufgabenstellung

Ultrakurzgepulste (UKP) Laserstrahlung mit Pulsdauern kleiner als 10 ps ermöglicht hochpräzisen Laserabtrag bei vernachlässigbarer Wärmebeeinflussung. Die Bearbeitungsqualität genügt sehr hohen Ansprüchen, aber die Produktivität, die durch die umgesetzte mittlere Laserleistung begrenzt ist, ist für viele Anwendungsbereiche zu gering. Für potenzielle Anwendungen im Turbomaschinenbau soll für Nickel- und Titanbasislegierungen die Abtragraten und damit die Produktivität beim Abtrag mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung vergrößert werden.

### Vorgehensweise

Als Ergänzung zu Multistrahl-Ansätzen und der Verwendung von ultraschnellen Strahlableitungssystemen wurde hier die Leistungsskalierung bei Verwendung von etablierten, hochflexiblen Galvanometer-Scannern untersucht. Um gute Oberflächenqualität bei vergleichsweise großen mittleren Laserleistungen ( $>> 10 \text{ W}$ ) zu erzielen, wird - durch Verwendung von großem räumlichen Pulsüberlapp ( $> 95 \text{ Prozent}$ ) und Pulsfolgefrequenzen  $> 5 \text{ MHz}$  - kontrolliert Wärme in das Werkstück eingebracht. Dadurch entsteht bei der Bearbeitung ein dünner Schmelzfilm, durch den die Ausbildung von sehr rauen Mikrostrukturen an der Werkstückoberfläche verhindert wird. Der induzierte Schmelzfilm kann in einem optionalen zweiten Prozessschritt durch Verwendung kleinerer mittlerer Laserleistung abgetragen werden.

### Ergebnis

Für Inconel® 718 können Abtragraten von  $9 \text{ mm}^3/\text{min}$  bei einer Oberflächenrauheit  $Ra < 1,5 \mu\text{m}$  realisiert werden. Für Titan 6246 beträgt die maximal erzielte Abtragraten  $8 \text{ mm}^3/\text{min}$  bei einer Oberflächenrauheit  $Ra < 1,6 \mu\text{m}$ . Der induzierte Schmelzfilm ist  $< 5 \mu\text{m}$  und kann im optionalen zweiten Prozessschritt vollständig entfernt werden. Im Vergleich zum konventionellen UKP-Abtrag entspricht dies einer Steigerung der Abtragraten um einen Faktor 20.

### Anwendungsfelder

Eine potenzielle Anwendung ist die Feinbearbeitung von Turbomaschinenkomponenten bei eingeschränkter Zugänglichkeit. Durch den Transfer des vorgestellten Prozessansatzes auf andere Werkstoffe kann die Produktivität der UKP-Bearbeitungen für den Form- und Werkzeugbau bei Verwendung hochflexibler, etablierter Systemtechnik signifikant vergrößert werden. Die Arbeiten wurden innerhalb des Fraunhofer-Innovationsclusters »AdaM« durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) »Investition in Zukunft« gefördert.

### Ansprechpartner

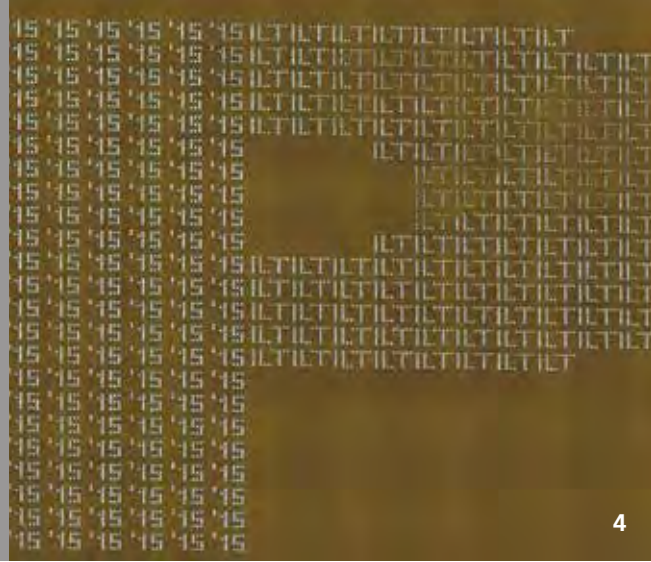
Dipl.-Phys. Johannes-Thomas Finger  
Telefon +49 241 8906-472  
johannes.finger@ilt.fraunhofer.de

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

1 Durch Laserabtrag hergestellte  
Mockupschaukel aus IN718.

2 Feld von Bohrungseintritten auf Ti 6246.





## MULTISTRALHBEARBEITUNG

### Aufgabenstellung

Der Einsatz von UltrakurzpulsLasern (UKP-Lasern) in der Materialbearbeitung ermöglicht ein weites Feld von Anwendungen. Durch die hohen Pulsintensitäten und die kurzen Wechselwirkungszeiten kann eine Vielzahl von Materialien mit höchster Präzision nahezu schädigungsfrei bearbeitet werden. Für einen wirtschaftlichen Einsatz in der direkten Fertigung waren Ultrakurzpulsprozesse bisher jedoch zu zeitintensiv, weswegen diese oft nur zur indirekten Fertigung (z. B. Werkzeugstrukturierung) eingesetzt wurden.

### Ergebnisse

Für die hoch-performante Skalierung von UKP-Prozessen wurde am Fraunhofer ILT eine Technologie entwickelt, mit der Oberflächen parallel mit einer Vielzahl von Teilstrahlen gleichzeitig bearbeitet werden können. Diese Strahlbündel können durch diffraktive Elemente erzeugt werden. Für statische Verteilungen können sogenannte DOEs eingesetzt werden. Für eine flexible Strahlformung wurde eine programmierbare diffraktive Optik (PDO) entwickelt, mit der nahezu beliebige Intensitätsverteilungen mit hoher Effizienz und Homogenität erzeugt werden können. Die Basis hierfür bildet ein Spatial Light Modulator, der in einem optischen System aus Strahlformung und Galvanometerscanner die Erzeugung einer Vielzahl von Teilstrahlen ermöglicht. Diese können zudem dynamisch, d. h. während der Bearbeitung, verändert werden, sodass

hiermit ein äußerst flexibles Arbeitswerkzeug geschaffen werden kann. Damit ist es möglich, das hohe Maß an Bearbeitungsqualität (geringe thermische Belastung, geringe Oberflächenrauheit, hohe Präzision) der UKP-Bearbeitung beizubehalten und diesen Prozess durch die gesteigerte Produktivität wirtschaftlich darstellen zu können.

### Anwendungsfelder

Bei allen Strukturen, die eine Symmetrie oder Regelmäßigkeit aufweisen, können UKP-Prozesse durch Einsatz von Multistrahltechnologie signifikant beschleunigt werden. Insbesondere bei der Bearbeitung von dünnen Schichten und bei Materialien, bei denen wenig Energie für den Abtrag notwendig ist, kann die Prozessgeschwindigkeit um bis zu zwei Größenordnungen gesteigert werden.

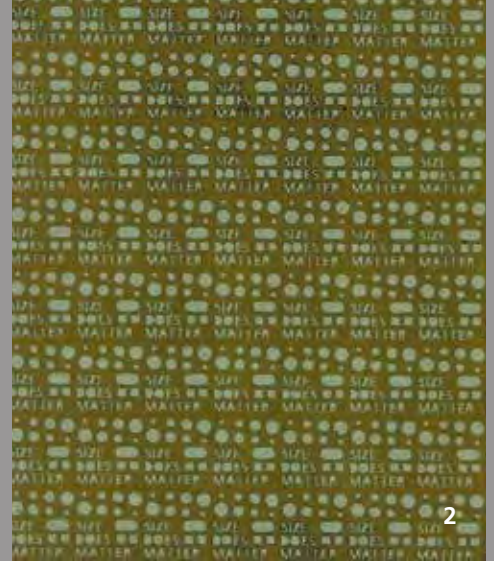
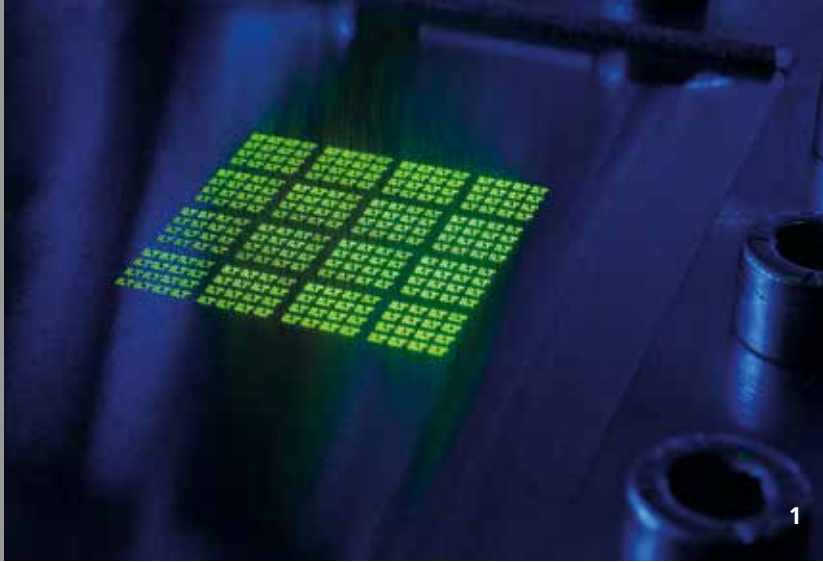
Die Palette der möglichen Anwendungen umfasst Strukturierungsaufgaben von dünnen Schichten in der PV und bei flexibler Elektronik bis hin zur Bearbeitung von Masken und Folien mit einem hohen Grad an Periodizität.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Patrick Gretzki  
 Telefon +49 241 8906-8078  
 patrick.gretzki@ilt.fraunhofer.de

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

- 3 Parallelisierung durch dynamische Strahlteilung in 950 Teilstrahlen.
- 4 Strukturierung von Dünnschichten mit variabler Strahlteilung.



---

## HOCHPRODUKTIVE UKP-LASERBEARBEITUNG MIT MULTISTRALHOPTIKEN

---

### Aufgabenstellung

Die Produktivität industrieller Laserprozesse hängt wesentlich von der auf das Werkstück übertragbaren mittleren Leistung ab. Dies gilt auch für Abtrag- und Schneidverfahren mit UltrakurzpulsLasern, mit denen höchste Bearbeitungsgenauigkeiten im Nanometerbereich erzielt werden können. Mittlerweile sind auch im Ultrakurzpuls-Bereich (UKP) Strahlquellen mit Leistungen von 100 bis 1000 W verfügbar. Um die hohen Anforderungen an Qualität und Genauigkeit auch bei kleinsten Strahldurchmessern erfüllen zu können, sind Intensitäten nahe der Abtragschwelle zur Vermeidung ungewünschter, thermisch bedingter Qualitätsverluste nötig. Somit ist die Leistung pro Einzelstrahl in der Regel auf wenige Watt begrenzt. Um trotzdem die hohen verfügbaren Leistungen umsetzen zu können, wird ein neuer technologischer Ansatz verwendet, bei dem der Laserstrahl auf mehrere Teilstrahlen aufgeteilt wird. Damit kann eine Parallelisierung der Bearbeitung realisiert und der Abtragprozess beschleunigt werden. Durch den Einsatz diffraktiver optischer Elemente kann diese Strahlteilung mit hoher Effizienz, Homogenität und Stabilität erfolgen.

- 1 *Abtragprozess mit 16 Teilstrahlen.*  
2 *Mikrostrukturierte Stahlfolie  
hergestellt mit 196 Teilstrahlen.*

### Vorgehensweise

Das Fraunhofer ILT entwickelt industriell einsetzbare Multistrahloptiken, die basierend auf diffraktiv optischen Elementen beliebige Anordnungen von Teilstrahlen erzeugen. Um eine hohe Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, wird das Multistrahlmolul in Echtzeit mittels Sensorik überwacht und adaptiv stabilisiert. Durch ein maßgeschneidertes Design sind die Multistrahloptiken für zahlreiche Anwendungen im Bereich der Laserpräzisionsbearbeitung anwendbar. Dazu zählen neben der klassischen Oberflächenstrukturierung auch Bohr- und Schneidapplikationen.

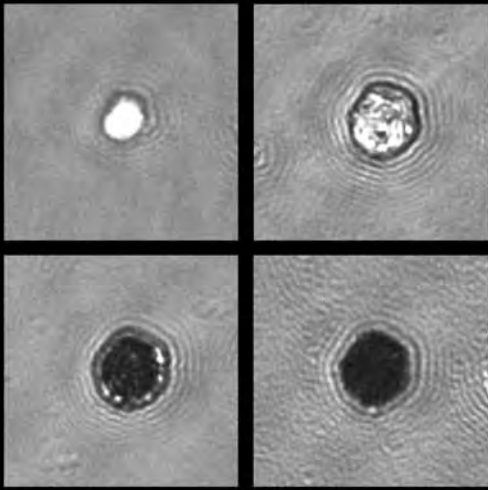
### Ergebnis

Bild 1 zeigt einen Abtragprozess mit 16 Teilstrahlen, wobei jeder Strahl 16-mal den Schriftzug ILT markiert. Durch die variable Ablenkung mit einem Scansystem sind beliebige Abtragkonturen im Multistrahlbetrieb möglich. In Bild 2 ist eine mikrostrukturierte 20 µm Stahlfolie abgebildet, die mittels einer Multistrahloptik bearbeitet wurde. Die kleinste dargestellte Struktur beträgt 15 µm mit einer Genauigkeit von 2 µm. Die verwendete Multistrahloptik verfügt über 196 Teilstrahlen und erlaubt so Bearbeitungsgeschwindigkeiten von mehreren hundert Strukturen pro Sekunde. Dabei wurde lediglich eine mittlere Leistung von 15 W bei 515 nm Wellenlänge verwendet, was verdeutlicht, dass hierdurch die Produktivität der Laserprozesse mit großem Potenzial skalierbar ist.

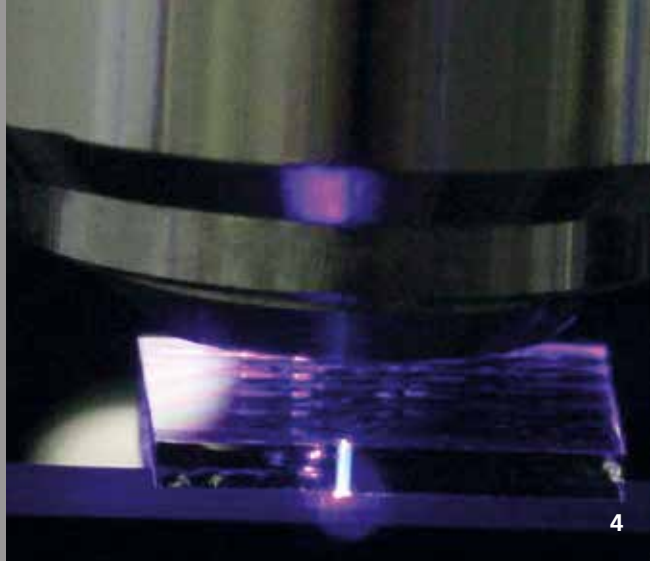
### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Christian Fornaroli  
Telefon +49 241 8906-642  
christian.fornaroli@ilt.fraunhofer.de

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



3



4

## PUMP-PROBE-MIKROSKOPIE BEI DER BEARBEITUNG VON GLAS MIT ULTRAKURZ GE- PULSTER LASERSTRAHLUNG

### Aufgabenstellung

Aufgrund der großen Intensität von ultrakurz gepulster Laserstrahlung können selbst transparente Gläser bearbeitet werden. Bei der Bearbeitung dieser Werkstoffe spielen nicht-lineare Wechselwirkungsprozesse wie z. B. der Kerr-Effekt oder Plasmadefokussierung eine zentrale Rolle. Diese Effekte führen gegebenenfalls zu Materialdefekten wie Rissen, welche für die Endanwendung problematisch sind. Eine kontrollierte Deposition der eingestrahnten Energie im Werkstoff und eine infolgedessen defektfreie Bearbeitung mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung stellt dementsprechend aktuell eine große Herausforderung dar. Gleichzeitig bietet die kontrollierte Bearbeitung ein enormes Anwendungspotenzial insbesondere für die Herstellung von Displays. Um eine Beschreibung und eine kontrollierte Manipulation dieser Wechselwirkungsprozesse gewährleisten zu können, wird eine zeitlich hochaufgelöste Kenntnis der Prozessdynamik vorausgesetzt.

### Vorgehensweise

Damit die Absorption der Laserstrahlung im Werkstoff mit hoher Zeitauflösung ermittelt werden kann, werden in-situ koaxiale Reflexionsmessungen mittels Pump-Probe-Messtechnik durchgeführt. Mit einer zeitlichen Auflösung von etwa 100 fs werden so die Wechselwirkungsprozesse hochaufgelöst analysiert.

### Ergebnis

Innerhalb der ersten 10 ps wird eine Vergrößerung der Reflexion der bestrahlten Oberfläche beobachtet, was mit der Erzeugung einer großen Anzahl an freien Elektronen und den daraus resultierenden metallischen Eigenschaften des Glases erklärt werden kann. Ab etwa 12 ps verkleinert sich die Reflexion bzw. vergrößert sich die Absorption der Glasoberfläche aufgrund eines einsetzenden Abtragmechanismus.

### Anwendungsfelder

Aufgrund der Kenntnis der fundamentalen Prozessdynamik ist die defektfreie Bearbeitung von Gläsern mit zeitlich maßgeschneiderten Pulsformen möglich. Der Prozess kann insbesondere für die Herstellung von Gläsern in der Elektronikbranche verwendet werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen der Förderinitiative »Femto Digital Photonic Production (Femto DPP)« unter dem Förderkennzeichen 13N13307 durchgeführt.

### Ansprechpartner

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

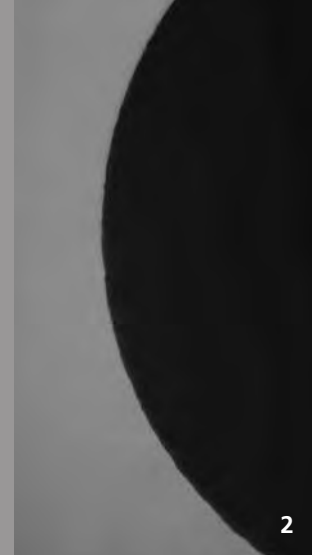
Dipl.-Phys. Martin Reininghaus  
Telefon +49 241 8906-627  
martin.reininghaus@ilt.fraunhofer.de

3 Zeitaufgelöste Reflexion einer bestrahlten Glasoberfläche.

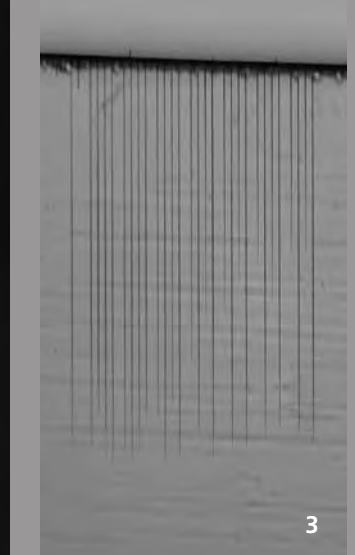
4 Pump-Probe-Aufbau.



1



2



3

## TRANSFER DES SELECTIVE LASER-INDUCED ETCHING-PROZESSES AUF NEUE MATERIALIEN

### Aufgabenstellung

Das selektive laserinduzierte Ätzen (Selective Laser-induced Etching SLE) ist ein innovatives laserbasiertes Fertigungsverfahren zur Herstellung von Mikro- und Makrobauteilen sowie komplexen Mikrobaugruppen aus transparenten Materialien. Die derzeit 3D-strukturierbaren oder schneidbaren Materialien sind Quarzglas und Saphir. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts wird in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University und industriellen Partnern das SLE-Verfahren zur Bearbeitung von weiteren Materialien wie Borofloat 33 und Willow untersucht, um Einsatzgebiete dieser Materialien in der Chipindustrie oder Mikrosystemtechnik, Medizintechnik und chemischen Industrie zu erschließen.

### Vorgehensweise

Das selektive laserinduzierte Ätzen ist ein zweistufiger Prozess. In einem ersten Schritt wird das für die Laserstrahlung transparente Material im Inneren modifiziert. Dafür wird ultrakurzgepulste Laserstrahlung (500 fs - 5 ps) in das Volumen des Werkstücks fokussiert (1 - 2  $\mu\text{m}$ ). In einem zweiten Schritt wird das modifizierte Material selektiv durch nasschemisches

Ätzen entfernt. Für die digitale photonische Produktion von komplexen Bauteilen werden aus den digitalen CAD-Daten die Bahndaten für den Laserfokus erstellt und mittels CAM-Software das Mikros scannersystem synchron gesteuert.

### Ergebnis

In Borofloat 33 werden Ätz-Selektivitäten zwischen laserstrukturierten und unstrukturierten Bereichen von ca. 1000:1 erreicht, in Willow-Gläsern ca. 100:1. In weiteren Schritten werden die Möglichkeiten für präzise Schnitte oder 3D-Strukturen in diesen Materialien untersucht.

### Anwendungsfelder

Die erstellten 3D-Strukturen können z. B. in der Chemieindustrie, Biologie oder Chipindustrie eingesetzt und als Mikrobauteile, Mikrofluidikkomponenten genutzt werden. Schnitte in Dünngläsern können z. B. zur Herstellung von Displaygläsern oder Interposern für die Mikrochipkontaktierung eingesetzt werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen der Förderinitiative »Femto Digital Photonic Production (Femto DPP)« unter dem Förderkennzeichen 13N13307 durchgeführt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Sebastian Nippgen  
Telefon +49 241 8906-470  
sebastian.nippgen@ilt.fraunhofer.de

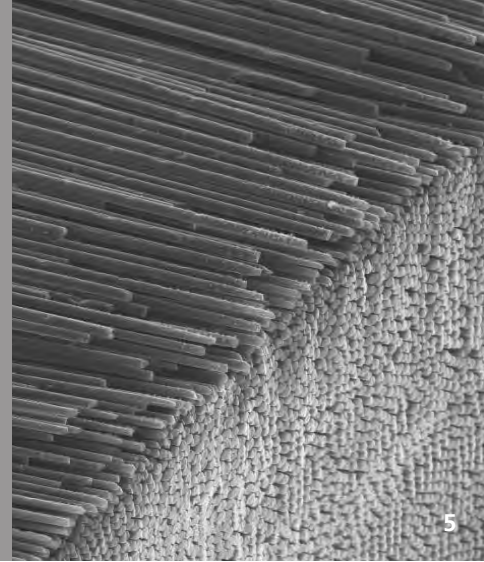
Dr. Arnold Gillner  
Telefon +49 241 8906-148  
arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de

1 Glasknoten aus Quarzglas (Quelle: Fa. LightFab).

2 Schnittkante Oberseite eines Lochs  
in Willow,  $d = 200 \mu\text{m}$ .

3 Geätzte Mikrokanäle in Borofloat 33.





## LASERSTRAHLBOHREN VON CFK-PREFORMS

### Aufgabenstellung

Zur Erzeugung einer hochbelastbaren und gleichzeitig lösbaren Verbindung von CFK-Strukturbauteilen werden metallische Gewindehülsen (Inserts) in die Bauteile eingebracht. Diese werden klassisch entweder auf das konsolidierte Bauteil auf- oder nach einem mechanischen Bohrprozess in die Bohrung eingeklebt. Die Vorbereitung und Applikation einer Klebestelle ist aufwendig, wobei die mechanische Bearbeitung mittels Bohrer oder Fräser irreparable Schäden wie z. B. Delamination hervorrufen kann. Daher ist die Einbringung einer Bohrung in das noch nicht getränkte Textil (Preform) mit anschließender Konsolidierung sinnvoll. Hierfür kann für Textilien mit mehreren Millimetern Dicke oder kleinen Bohrungsgeometrien das Laserstrahlbohren angewendet werden.

### Vorgehensweise

Zum Bohren von 10-lagigen bi-axialen CFK-Preforms wird eine ultrakurz gepulste Laserstrahlquelle der Firma AMPHOS mit einer Pulsdauer von 7,6 ps und einer mittleren Leistung von 400 W verwendet. Mittels eines Scanners können sowohl runde als auch z. B. sternförmige Bohrungen in den Preform eingebracht werden. Dadurch wird der Einsatz von angepassten Inserts für bauteilspezifische Belastungsfälle ermöglicht.

### Ergebnis

Durch sehr kleine Toleranzen der Bohrlochform von  $< 20 \mu\text{m}$  ist der Insert verschiebungssicher im Preform fixiert. Im darauffolgenden Matrixinfusionsprozess wird eine stoffschlüssige Verbindung hergestellt. Durch die direkte Verbindung des Inserts mit z. B. einer Epoxidmatrix können im Vergleich zu den konventionell gefertigten CFK-Bauteilen das Auszugsdrehmoment des Inserts aus dem CFK-Bauteil um 15 Prozent (auf 29 Nm) und die Auszugskraft um 75 Prozent (auf 13,5 kN) vergrößert werden. Gleichzeitig wird die Korrosionsschutzschicht des Inserts nicht beschädigt.

### Anwendungsfelder

Der Prozess für die Erzeugung von hochbelastbaren und gleichzeitig lösbaren Verbindungen kann insbesondere für wartungsintensive Automobil- und Flugzeugbauteile sowie im Freizeitbereich angewendet werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wird im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen KF2119107AB3 durchgeführt.

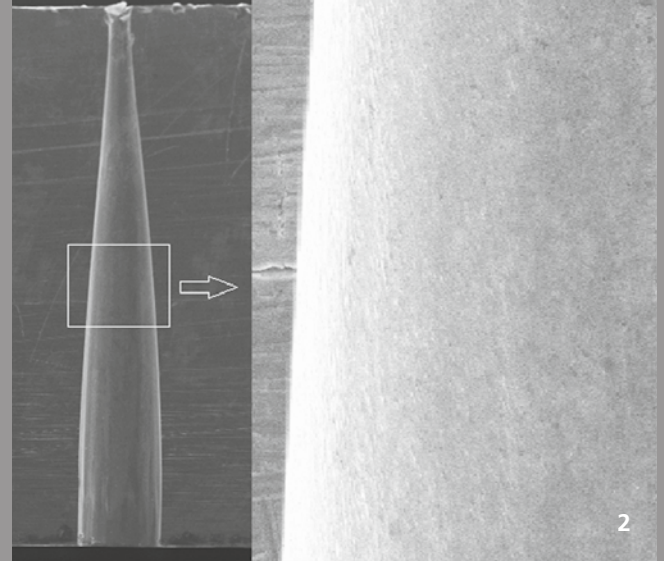
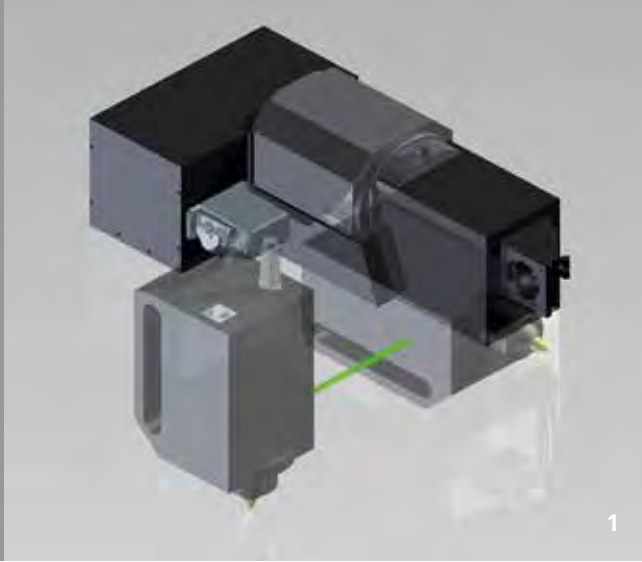
### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Stefan Janssen M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8076  
stefan.janssen@ilt.fraunhofer.de

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

4 Laserstrahlgebohrter CFK-Preform.

5 REM-Aufnahme der Bohrwand.



## MODULARE WENDELSTRAHLOPTIK

### Aufgabenstellung

Für die Erzeugung präziser Bohrungen und Schnitte wird in der Regel Ultrakurzpuls-Laserstrahlung in Kombination mit einer schnellen Strahlrotation verwendet. Eine Wendelstrahl-optik, mithilfe derer der Laserstrahl mit hoher Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn bewegt werden kann, soll hinsichtlich ihrer Einsatzfelder und Funktionalität an die Anforderungen des Marktes angepasst werden. Ziel ist ein kompakteres System mit erweiterter Prozesssensorik und automatisierbaren Einstellmöglichkeiten. Dabei ist auf höchste Systemstabilität zu achten und eine industriell nutzbare Prozessfähigkeit zu erzielen.

### Vorgehensweise

Um die Anwendungsmöglichkeiten und die Integrierbarkeit zu erhöhen, wird die Bohroptik in drei Teilsysteme aufgeteilt. Das System besteht dabei aus Strahlrotator, Kameramodul und Fokussieroptik. Auf diese Art können das neue Kameramodul und das Fokussiermodul getrennt vom Hauptmodul verwendet werden. Dieses Modulkonzept spiegelt sich auch in der Steuer- und Hardware wieder.

1 *Modulares Wendeloptiksystem  
mit frei positionierbarem Prozesskopf.*

2 *Negativ konische Bohrung mit einem  
Aspektverhältnis von 25 in 1,2 mm Stahl.*

### Ergebnis

Um die Flexibilität zu erhöhen, sind verschiedene Fokussiermodule realisiert worden, welche als plug&play-Systeme ohne erneute Justagearbeit modular getauscht werden können. Eine integrierte CMOS-Kamera ermöglicht zusammen mit einem Encoder-System des Hohlwellenmotors eine automatisierte Aufnahme der Justagezustände an definierten Positionen der Hohlwelle. Die innovative Lagerung des DOVE-Prismas über Kunststoffellerfedern sowie die Einstellbarkeit mittels Ultrafeingewindeschrauben erlauben eine Genauigkeit in der Wendelgeometrie von 1 µm.

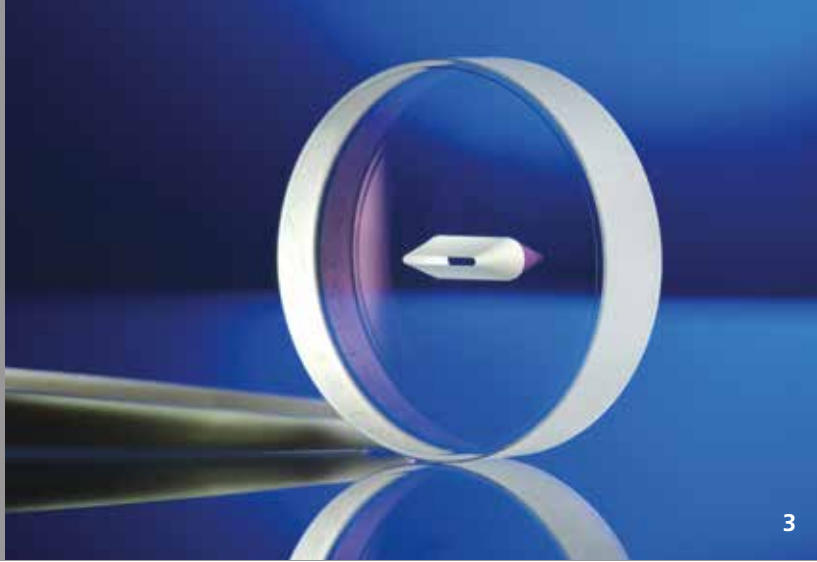
### Anwendungsfelder

Die Wendeloptik wird weitläufig eingesetzt. Zu ihren dominierenden Anwendungsfeldern gehören Präzisionsbohrungen mit definiertem Bohrkanal in bis zu 3 mm starken metallischen und nichtmetallischen Materialien, mikrorissfreies Präzisionsschneiden von Saphir und chemisch gehärtetem Glas sowie einstellbare Konizität von Mikrobohrungen im Bereich von unter 50 µm für diverse Anwendungen wie beispielsweise Mikrofilter. Die Kombination der Wendeloptik mit einer ultrakurz gepulsten Laserstrahlquelle ermöglicht einen nahezu materialunabhängigen Einsatz des Systems.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Frank Zibner  
Telefon +49 241 8906-325  
frank.zibner@ilt.fraunhofer.de

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



## MUSCHELAUSBRUCHFREIE LASERBEARBEITUNG VON SPIEGELSUBSTRATEN ZUR GEOMETRISCHEN SEPARATION VON STRAHLENBÜNDELN

### Aufgabenstellung

Bei der Erzeugung Hoher Harmonischer aus ultrakurz gepulster Laserstrahlung in Überhöhungsresonatoren in Bow-Tie-Anordnung besteht das Problem der Auskopplung der Harmonischen aus der Kavität, da für kurze Wellenlängen im Bereich einiger 10 nm keine Dichroiten existieren. Eine Möglichkeit der Auskopplung ist eine kleine Bohrung der Größenordnung 100  $\mu\text{m}$  in einem der Resonatorspiegel auf der optischen Achse. Um die Verluste für die Fundamentale zu minimieren, muss die Spiegeloberfläche um die Bohrung herum möglichst unbeschädigt sein. Insbesondere Muschelausbrüche sollten vermieden werden. Die Bohrung muss hinterschnitten sein, da in dem Ringresonator der Einfallswinkel der Fundamentalen und der Harmonischen auf dem Spiegel einige Grad beträgt.

### Vorgehensweise

Die hinterschnittenen Öffnungen werden mittels Inversem Laserstrahlbohren in die unbeschichteten Spiegelsubstrate einstrukturiert. Ultrakurzpulslaser sind für dieses Verfahren aufgrund nichtlinearer Effekte bei der Propagation durch das Glas nur sehr bedingt geeignet. Stattdessen wird eine Laserstrahlquelle mit einer Pulsdauer von einigen 100 ps verwendet. Zunächst werden die Prozessparameter angepasst, um bearbeitungsbedingt induzierte Spannungen zu minimieren, da diese mitursächlich für Muschelausbrüche sind. In einem

weiteren Schritt wird untersucht, ob die Oberfläche geschützt werden kann, indem vor der Bearbeitung ein weiteres Spiegelsubstrat an das zu bearbeitende Substrat angesprengt und nach der Bearbeitung wieder abgetrennt wird.

### Ergebnis

Auf die transversale Modenstruktur der Fundamentalen im Überhöhungsresonator angepasste, hinterschnittene Öffnungen verschiedener Geometrien wurden in Standard-Spiegelsubstrate aus unterschiedlichen Optikmaterialien wie Quarzglas, Corning ULE und Saphir eingebracht. Mit den oben beschriebenen Schritten können Muschelausbrüche vollständig vermieden werden. So sind Bohrungen großer Aspektverhältnisse auch mit Hinterschnitt in polierte Glaskörper ohne weitere Beeinträchtigung der polierten Oberfläche möglich. Das Verfahren ist von der Fraunhofer-Gesellschaft patentiert.

### Anwendungsfelder

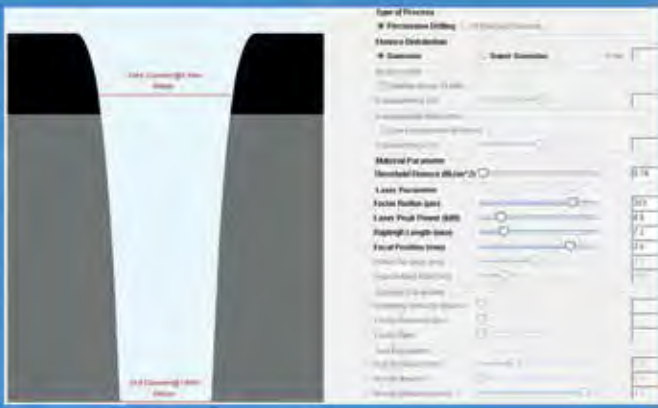
Generell können mit dem Verfahren Optiken mit kleinen Öffnungen zum Separieren oder Koppeln von Strahlenbündeln angefertigt werden. Als Beispiele seien neben dem oben beschriebenen Raumfilter auch Interleavingspiegel genannt.

### Ansprechpartner

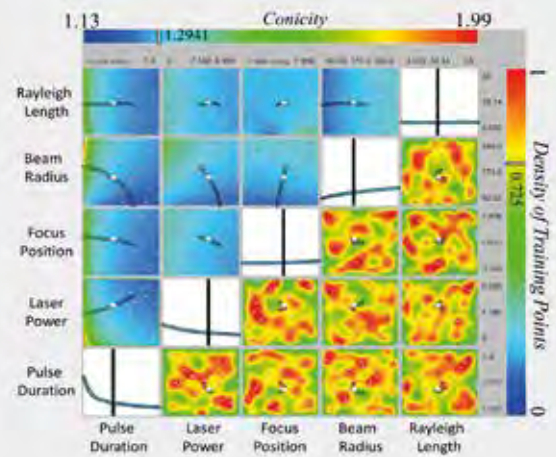
Dipl.-Phys. Dipl.-Volksw. Dominik Esser  
Telefon +49 241 8906-437  
dominik.esser@ilt.fraunhofer.de

Dr. Peter Russbüldt  
Telefon +49 241 8906-303  
peter.russbuedt@ilt.fraunhofer.de

3 *Hinterschnittener und muschelausbruchfreier Schlitz in einem ULE-Spiegelsubstrat mit Durchmesser 25 mm und Dicke 6,35 mm.*



1



2

## INTERAKTIVE SIMULATION DES BOHRENS MIT LASERSTRAHLUNG

### Aufgabenstellung

Angesichts der stetig steigenden Marktanforderungen und damit immer komplexer werdender Prozesse entwickelt sich die Simulation zusehends zu einem unverzichtbaren Werkzeug für das Prozessdesign bzw. die Prozessoptimierung. Dies gilt insbesondere für die Laserfertigungsverfahren. Allerdings kann mit heutigen Simulationen aufgrund von begrenzten Rechenkapazitäten meist nur ein kleiner Teil des Parameter-raums untersucht werden. Zudem konnte die Integration von Prozesssimulationen in den industriellen Alltag noch nicht vollzogen werden. Beispielsweise ist eine Unterstützung des Maschinenbedieners durch eine interaktiv nutzbare Prozess-simulation noch nicht verfügbar.

### Vorgehensweise

Auf der Grundlage von reduzierten Modellen werden »schnelle« Prozesssimulationen entwickelt, welche es ermöglichen, erheblich größere Bereiche des Parameterraums zu untersuchen. Mit Hilfe der so erzeugten »dichten« Simulationsdaten (sog. Trainingsdaten) werden schließlich »Prozesslandkarten« (sog. Meta-Modelle) erstellt, welche zum einen eine intuitive Visualisierung von Parameterabhängigkeiten erlauben und

zum anderen die Entwicklung von Prozessoptimierungen unterstützen. Sowohl die Meta-Modelle als auch die »schnellen« Simulationen ermöglichen eine interaktive Nutzung und werden speziell für den Einsatz beim Kunden auf PCs / Laptops oder auf Smart Devices entwickelt.

### Ergebnis

Als erstes Anwendungsbeispiel wurde ein reduziertes Modell für die finale Abtragskontur beim Bohren mit lang gepulster Laserstrahlung entwickelt. Dieses Modell wurde in einem interaktiv nutzbaren Simulationstool (AsymptoticDrill) implementiert (Bild 1). Auf Basis von AsymptoticDrill wurde zudem ein Meta-Modell entwickelt (Bild 2). Beide Simulationstools werden vom Fraunhofer ILT als Lizenzsoftware angeboten.

### Anwendungsfelder

Sowohl die Methodik der reduzierten Modellierung (kontrollierte Reduktion der Modellkomplexität) als auch die Techniken der Meta-Modellierung sind auf alle Bereiche der Modellierung und damit auf alle Prozesse (nicht nur im Bereich der Lasertechnik) anwendbar.

### Ansprechpartner

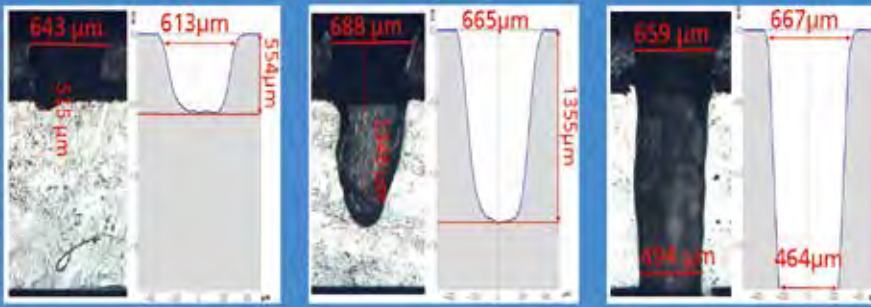
Dipl.-Phys. Torsten Hermanns  
Telefon +49 241 8906-8367  
torsten.hermanns@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Urs Eppelt  
Telefon +49 241 8906-163  
urs.eppelt@ilt.fraunhofer.de

1 *AsymptoticDrill: Interaktives Simulationstool für die finale Abtragskontur beim Bohren mit lang gepulster Laserstrahlung*

2 *Meta-Modell auf Basis von »AsymptoticDrill«.*





3

## SIMULATION DER ZEITLICHEN EVOLUTION DER BOHRUNGSKONTUR BEIM BOHREN MIT LASERSTRAHLUNG

### Aufgabenstellung

Die beim Bohren mit lang gepulster Laserstrahlung beobachtete asymptotische Abtragkontur kann mittels der am Fraunhofer ILT entwickelten Software »AsymptoticDrill« hervorragend beschrieben werden. Allerdings beschreibt diese Software alleine die finale Kontur unter der Annahme gleichbleibender Pulse. Eine Variation der Pulseigenschaften während des Prozesses kann jedoch wesentlichen Einfluss auf das Bohrergebnis haben und somit zu einer signifikanten Qualitätsverbesserung (z. B. zylindrische Bohrungen) führen. Dies motiviert die Notwendigkeit der Entwicklung eines dynamischen Abtragmodells, welches die pulsaufgelöste Evolution der Bohrung beschreiben kann.

### Vorgehensweise

Ziel der Modellierung und Simulation ist die Beschreibung und Vorhersage der pulsaufgelösten Evolution der Bohrung auf Basis eines reduzierten Abtragmodells. Entsprechend dem asymptotischen Abtragmodell soll dieses Modell die Implementation einer interaktiven Simulationssoftware zur direkten Nutzung durch den Kunden gestatten.

### Ergebnis

Ein reduziertes Abtragmodell, welches die pulsaufgelöste Evolution der Bohrung beschreibt, wurde entwickelt, numerisch implementiert und durch den Vergleich mit experimentellen Befunden (Bild 3) exzellent bestätigt. Eine interaktive Simulationssoftware (»DynamicDrill«) zur Anwendung auf PC, Laptop oder Smart Devices wird ab Frühjahr 2016 vom Fraunhofer ILT angeboten.

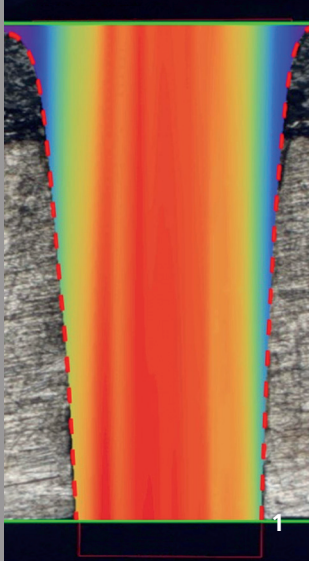
### Anwendungsfelder

Neben dem hier beschriebenen Anwendungsfall des Bohrens von Metallen mit lang gepulster Laserstrahlung kann das entwickelte Abtragmodell zudem im Bereich des UKP-Abtrags dielektrischer und halbleitender Werkstoffe angewendet werden.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Torsten Hermanns  
 Telefon +49 241 8906-8367  
 torsten.hermanns@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Urs Eppelt  
 Telefon +49 241 8906-163  
 urs.eppelt@ilt.fraunhofer.de



## SIMULATION DER ASYMPTOTISCHEN BOHRUNGSKONTUR BEIM BOHREN MIT LASERSTRAHLUNG

### Aufgabenstellung

Beim Bohren mittels lang gepulster Laserstrahlung lässt sich feststellen, dass sich ab einer gewissen Anzahl von Pulsen eine sogenannte asymptotische Abtragkontur ausbildet, welche dadurch charakterisiert ist, dass sie sich auch mit der Bestrahlung durch weitere Pulse nur wenig bis gar nicht mehr verändert. Dieser Befund ist vom UKP-Abtrag dielektrischer und halbleitender Werkstoffe bereits bekannt und durch das Fraunhofer ILT mit dem Unterschreiten einer Strahlintensitätsschwelle erklärt worden.

### Vorgehensweise

Das Ziel der Modellierung und Simulation ist die Beschreibung und Vorhersage der sich final, d. h. asymptotisch einstellenden Bohrungskontur, also der Bohrungsform, die sich auch durch weitere Bestrahlung nicht mehr verändert. Darüber hinaus soll der Mechanismus, welcher zu einer solchen Asymptotik in der Bohrungsform führt, identifiziert und erklärt werden. Diese Erklärung ist dem experimentellen Befund alleine durch bloße Anschauung nicht zu entnehmen.

### Ergebnis

Die Erklärung für das Zustandekommen einer asymptotischen Bohrungsform wurde erarbeitet, ihr zugrundeliegender Mechanismus numerisch implementiert, erprobt und durch den Vergleich mit experimentellen Befunden (Bild 1) hervorragend bestätigt. Ein interaktives numerisches Werkzeug, mit dem sich in Echtzeit die Auswirkungen von Veränderungen in Prozessparametern auf die resultierende Bohrungsform veranschaulichen lassen, wurde implementiert. Dieses Tool wurde insbesondere für die direkte Nutzung durch den Kunden konzipiert und wird vom Fraunhofer ILT über eine Softwarelizenz angeboten.

### Anwendungsfelder

Ursprünglich entstammt die Basis für die Betrachtung einer asymptotischen Bohrungsform Überlegungen zum UKP-Abtrag, bei dem sich in der gleichen Weise eine asymptotische Abtragkontur einstellt und als Erstes beobachtet wurde. Dass sich dieses Prinzip nun auch für den Abtrag mit langen Pulsen als valide erweist, nährt die Vermutung, gleiche oder ähnliche Prinzipien auch für andere Laserfertigungsverfahren anwenden zu können.

### Ansprechpartner

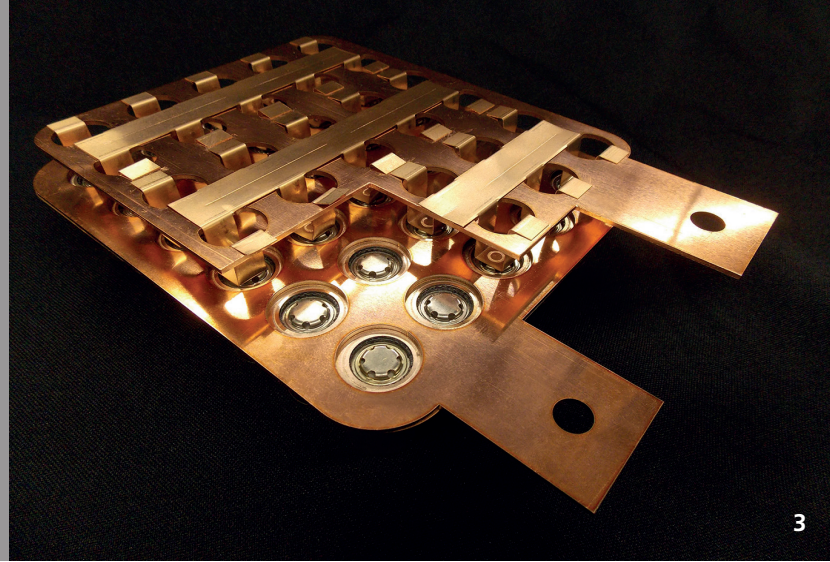
Dipl.-Phys. Torsten Hermanns  
Telefon +49 241 8906-8367  
torsten.hermanns@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Urs Eppelt  
Telefon +49 241 8906-163  
urs.eppelt@ilt.fraunhofer.de

*1 Vergleich zwischen simulierter asymptotischer Bohrungskontur und experimentellem Ergebnis. Die Farbskala beschreibt die Strahlverteilung.*



2



3

## LASERSTRAHLMIKRO-SCHWEISSEN ZUR KONTAKTIERUNG VON LITHIUM-IONEN-ZELLEN

### Aufgabenstellung

Aufgrund des zunehmenden Bedarfs an Akkumulatoren in elektrischen Fahrzeugen und stationären Energiespeichersystemen bei momentan noch geringen Kapazitäten von Einzelzellen wird die Verbindungstechnik einzelner Zellen zu leistungsfähigen Modulen zunehmend wichtiger. Hierfür sind serientaugliche und fähige Fügeprozesse notwendig.

### Vorgehensweise

Aufgrund des präzisen Energieeintrags hat sich das Laserstrahlmikroschweißen als geeigneter Prozess bewährt. Zur Erhöhung der Schweißqualität und Prozessstabilisierung findet die örtliche Leistungsmodulation Anwendung, wobei der globale Vorschub mit einer kreisförmigen Oszillation überlagert wird. Die Verbindungstechnik wurde an unterschiedlichen Zelltypen (z. B. Typ 18650 oder Pouchback) untersucht. Die notwendigen Anbindungsquerschnitte können unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren ausgelegt und anhand der Schweißparameter erzielt werden.

### Ergebnis

Die Kontakte können reproduzierbar und prozesssicher hergestellt werden. Artungleiche Materialien lassen sich mittels Schweißung mit örtlicher Leistungsmodulation fügen und der Anbindungsquerschnitt aufgrund der zusätzlichen lateralen Strahlauslenkung erhöhen. Hierdurch kann einer Festigkeitsabnahme durch die Bildung intermetallischer Phasen entgegengewirkt werden.

### Anwendungsfelder

Anwendungen für die beschriebenen Schweißungen finden sich für Akkuzellen in der Elektromobilität sowie in stationären Anwendungen. Ebenso können die Erkenntnisse auf Verbindungen von elektrischen Leitungen und Kontakten in Leistungsbauteilen übertragen werden. Ein Anwendungsbeispiel war das Schweißen von Lithium-Ionen-Zellen für das »Ecurie Aix Formula Student Team« der RWTH Aachen University.

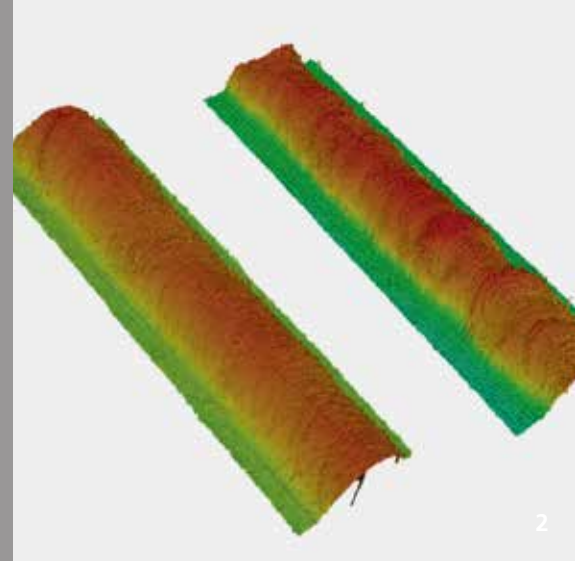
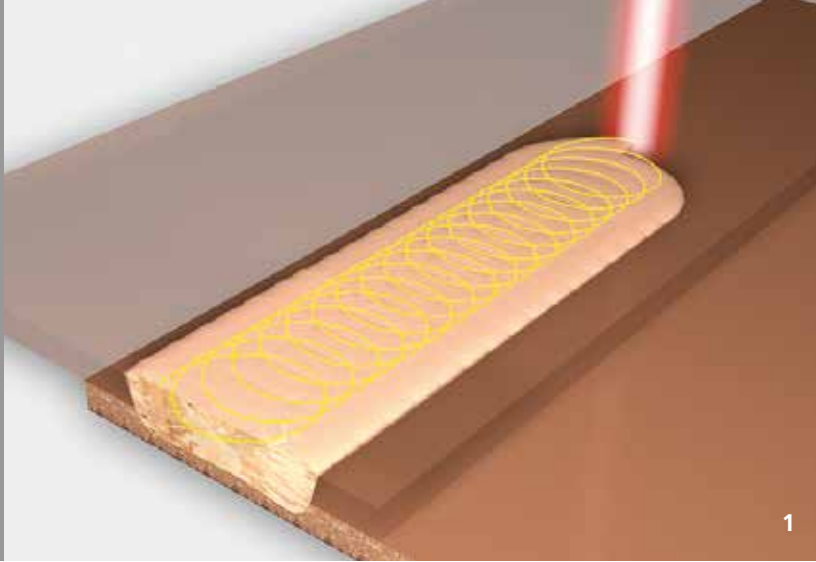
Die erzielten Ergebnisse stammen zum Teil aus einem finanziell geförderten Projekt der Fraunhofer-Gesellschaft (Fördernummer 826 472, »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität II«).

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Paul Heinen  
Telefon +49 241 8906-145  
paul.heinen@ilt.fraunhofer.de

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

- 2 Schweißung an Li-Ionen-Pouchback-Zellen.  
3 Gefügte Makrozelle bestehend aus 30 Zellen vom Typ 18650.



## GEZIELTE BEEINFLUSSUNG DER NAHTGEOMETRIE BEIM LASERSTRAHL- MIKROSCHWEISSEN

### Aufgabenstellung

Das Fügen von metallischen Werkstoffen mittels Laserstrahlung gewinnt aufgrund hoher Reproduzierbarkeit und Automatisierbarkeit immer weiter an Bedeutung. Die Qualität der Schweißnaht wird dabei je nach Anwendungsfall mit Hilfe von Nahtoberflächenrauheit, Einschweißtiefenkonstanz oder Anbindungsfläche quantitativ bewertet. Durch eine ortsaufgelöste Energieeinbringung können diese Qualitätsmerkmale gezielt beeinflusst werden, um so anwendungsspezifischen Anforderungen gerecht zu werden.

### Vorgehensweise

Bei der örtlichen Leistungsmodulation wird die Vorschubbewegung durch eine zusätzliche Oszillation überlagert, die den Gestaltungsrahmen beim Laserstrahlschweißen erheblich erweitert. Neben den Parametern Laserleistung, Strahldurchmesser und Vorschubgeschwindigkeit eröffnet die örtliche Leistungsmodulation weitere Parameter, die zur Schmelzbadkontrolle und gezielten Naht- und Gefügeformung eingesetzt werden können.

1 *Pfad des Laserstrahls bei örtlicher Leistungsmodulation.*

2 *Vergleich der Nahtoberflächenrauheit mit und ohne Verwendung der örtlichen Leistungsmodulation.*

### Ergebnis

Durch Verwendung der örtlichen Leistungsmodulation kann die mittlere Rauheit der Schweißnaht einer Kupferlegierung um bis zu 70 Prozent reduziert werden. Die mittlere Rauheit ist dabei ein quantitatives Maß für die Fehlstellen an der Schweißnahtoberfläche. Weiterhin kann durch Beeinflussung der Parameter ein um den Faktor 3 vergrößerter Anbindungsquerschnitt, im Gegensatz zum konventionellen Laserstrahlmikroschweißen, erzeugt werden.

### Anwendungsfelder

Die Laserstrahlschweißtechnik im Fein- und Mikrobereich findet sich beispielsweise in der Leistungselektronik oder Batterietechnik. Die verbesserten Möglichkeiten zur Steigerung der Reproduzierbarkeit und der gezielten Nahtformung lassen sich auf weitere Anwendungsgebiete wie beispielsweise in der Medizintechnik übertragen.

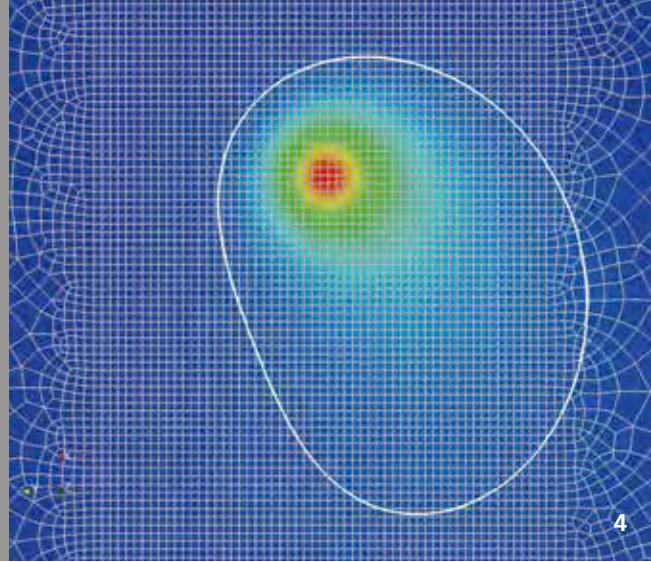
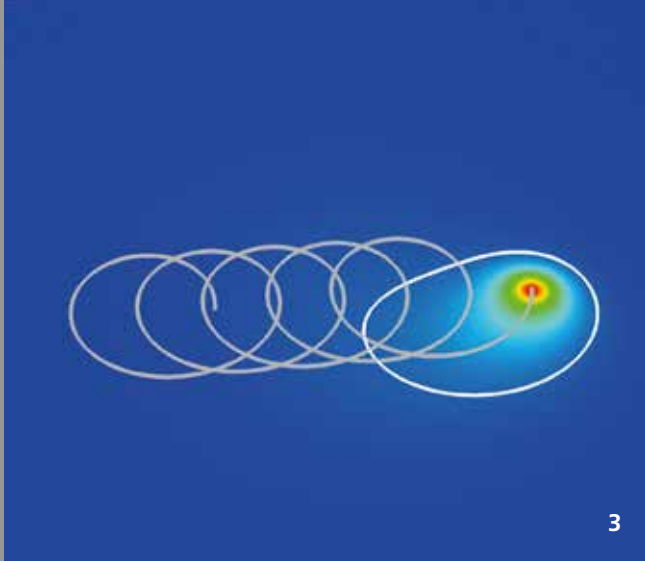
Die dargestellten Arbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1120 gefördert.

### Ansprechpartner

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

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





## SCHNELLE TEMPERATURFELDBERECHNUNG BEIM MIKROSCHWEISSEN

### Aufgabenstellung

Voraussetzung für die Berechnung von Verzug und Eigen-  
spannungen im Bauteil beim Schweißen ist die Kenntnis der  
Temperaturverteilung, die während des Prozesses vorliegt.  
Die thermische Wirkung des Prozesses auf das Bauteil lässt  
sich mithilfe von äquivalenten Wärmequellen abstrahieren.  
Um eine ausreichende Übereinstimmung der Temperaturver-  
teilung mit dem Experiment zu erhalten, ist die Kalibrierung  
von Modellparametern der Wärmequelle nötig. Die schnelle  
und automatisierte Bestimmung dieser Parameter ist ein  
wesentlicher Faktor für die Anwendbarkeit von Wärme-  
quellenmodellen in der Schweißsimulation.

### Vorgehensweise

Die Auswahl eines geeigneten Wärmequellenmodells richtet  
sich stark nach der jeweiligen Aufgabenstellung. Für die Kali-  
brierung der Wärmequellenparameter wird ein Zielfunktional  
formuliert, welches die automatische Anpassung der Simulati-  
onsergebnisse an experimentelle Daten des Mikroschweißens  
ermöglicht. Für diese Optimierungsaufgabe werden lokale  
Optimierungsverfahren eingesetzt. Eine signifikante Beschleu-  
nigung wird hierbei durch die Anwendung des numerischen  
Modellreduktionsverfahrens »Proper Orthogonal Decomposition  
(POD)« erzielt. Zur Lösung der Wärmeleitungsaufgabe wird

ein schneller parallelisierter, hauseigener FEM-Löser eingesetzt.  
Die angewendeten Methoden zeichnen sich durch eine hohe  
Flexibilität aus, da sie keine Einschränkung bezüglich der  
Materialeigenschaften oder der Bauteilgeometrie besitzen.

### Ergebnis

Ein Wärmequellenmodell wurde erfolgreich für die Unter-  
suchung der Schmelzbadfläche an der Werkstückoberseite  
bei einer Laserstrahlmikroschweißung mit örtlicher Leistungs-  
modulation eingesetzt. Die Simulation ist fähig, im Experiment  
beobachtbare Oszillationen der Schmelzbadfläche, die  
aufgrund der geänderten Prozessführung zustande kommen,  
abzubilden.

### Anwendungsfelder

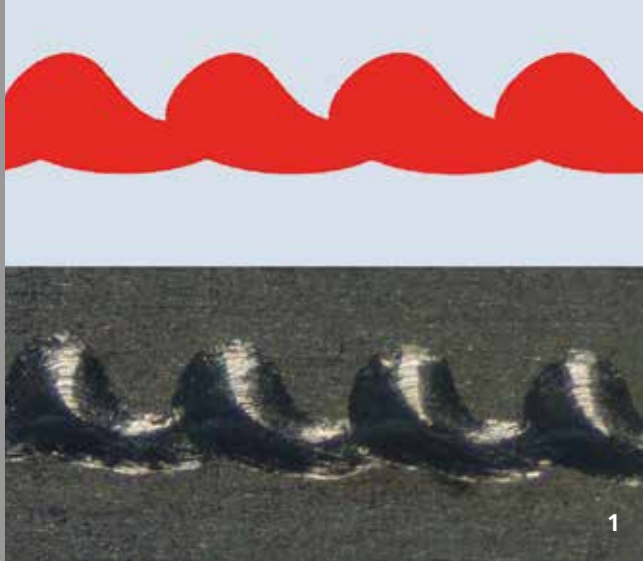
Die entwickelten Methoden ermöglichen eine schnelle und  
zuverlässige Berechnung von Prozessmerkmalen wie Temperatur,  
Spannungen und Verzug beim Schweißen.

Die Arbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemein-  
schaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1120  
gefördert.

### Ansprechpartner

Christoph Schöler M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8307  
christoph.schoeler@ilt.fraunhofer.de

- 3 Berechnetes Temperaturfeld und Darstellung  
der Schmelzisotheime beim Laserstrahlmikro-  
schweißen mit örtlicher Leistungsmodulation.  
4 Aufsicht auf den Schweißprozess aus Bild 3  
mit verwendeter Vernetzung.



## SIMULATION DER NAHTFORM FÜR DAS SCHWEISSEN MIT ÖRTLICHER LEISTUNGSMODULATION

### Aufgabenstellung

Faserlaser mit hoher Strahlqualität und geringem Fokussdurchmesser ermöglichen hohe Prozessgeschwindigkeiten. Die kleine Wechselwirkungszone führt allerdings zu Anbin- dungsquerschnitten, die keine ausreichende Nahtfestigkeit gewährleisten. Um den Anbin- dungsquerschnitt zu kontrollieren, wird der linearen Vorschubbewegung eine kreisförmige Oszillation überlagert. Untersucht wird die Ausprägung der Schweißnahttraupe für unterschiedliche Oszillationsparameter, wie Frequenz und Amplitude, am Beispiel des Stahlwerkstoffs X5CrNi18-10.

### Vorgehensweise

Die Schweißnahttraupe wird durch die Berechnung des Temperaturfelds mit der Software »Comsol Multiphysics®« ermittelt. Im Ergebnis wird der Bereich der Bauteiloberfläche aufgezeichnet, dessen Temperatur den Schmelzpunkt mindes- tens einmal während der Simulation überschritten hat. Die Ergebnisse werden mit Aufsichts- fotografien von Nahttraupen aus Blindschweißversuchen verglichen.

*Simulierte und experimentelle Nahttraupe:*

1 ... 200 Hz.

2 ... 600 Hz.

### Ergebnis

Die Schweißversuche sind mit folgenden Parametern durch- geführt worden: Laserleistung 100 W, Fokussdurchmesser 30  $\mu\text{m}$ , Vorschub 100 mm/s, Amplitude 100  $\mu\text{m}$ , Frequenz 200 und 600 Hz. Bild 1 zeigt die simulierte und experimentelle Nahttraupe für 200 Hz, Bild 2 für 600 Hz. Die Vorschubrich- tung zeigt von links nach rechts, die Oszillation ist gegen den Uhrzeigersinn gerichtet. Die berechnete Rau- penform entspricht im Wesentlichen der gemessenen. Bei hinreichend großer Frequenz werden eine homogene Nahtbreite bzw. ein gleichmäßiger Anbin- dungsquerschnitt erreicht. Damit steht für die Auslegung z. B. von elektrischen Kontakten ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die Anbin- dungsquerschnitte in Ab- hängigkeit der Werkstoffkennwerte sowie der Laserparameter schon bei der Konstruktion der Bauteile betrachtet werden können.

### Anwendungsfelder

Mikroschweißen mit Laserstrahlung wird z. B. in der Automobilindustrie angewandt. Hier ist insbesondere die Stromtragfähigkeit für elektrische Kontakte in Batterien oder Leistungselektronik von Interesse, aber auch die mechanische Festigkeit für die Herstellung von mikromechanischen Kom- ponenten wie Filter oder Sensoren.

### Ansprechpartner

Dr. Mirko Aden  
Telefon +49 241 8906-469  
mirko.aden@ilt.fraunhofer.de

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



## LASERBONDEN IN DER BATTERIETECHNIK

### Aufgabenstellung

Im Rahmen der Fertigung von Batteriemodulen und Packs werden die individuellen Zellen stets so verschaltet, dass höhere Spannungen oder Kapazitäten generiert werden können. Somit ist das Fügen der einzelnen Zellen ein entscheidender Fertigungsschritt, welcher zuverlässige, niederohmige Verbindungen, stabile Prozesse und einen hohen Grad an Automatisierbarkeit bedarf. Hierbei ist auch eine hohe Flexibilität der Fertigung wichtig.

### Vorgehensweise

Eine im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts »RoBE« (Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen) aufgebaute Maschine, der Laserbonder, soll hierzu verwendet werden. Die Integration des Schweißverfahrens »Oszillationsschweißen« in einen konventionellen Bändchenbonder ergibt die neue Maschinenteknik, bei der statt des konventionellen Ultraschallbondens ein neuartiges Laserschweißverfahren zum Einsatz kommt. Im Mittelpunkt des Projekts stand die Anwendung der elektrischen Kontaktierung von Elektronik, insbesondere Leistungselektronik. Nach Abschluss des Projekts wurden erste Machbarkeiten zum erweiterten Einsatz der Technik untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch die Kombination von der Zuführung eines flexiblen Verbinders (Bändchen) und dem Prozess eine hervorragende Möglichkeit geschaffen wurde, Batteriezellen zu kontaktieren.

### Ergebnis

Dieses Verfahren ist anwendbar für alle prismatischen und zylindrischen Batteriezellen. Besonders die Möglichkeit, die Verbindungen schnell, flexibel und ohne Positionsaufwand für Verbindler zu erzeugen und die einzelnen Zellen zu kontaktieren und daraus Module oder Packs zu fertigen, zeichnet das Verfahren aus. Auch ist hierbei sowohl der Einsatz von Aluminium- als auch Kupfermaterialien möglich.

### Anwendungsfelder

Die Maschinenteknik und das Verfahren sind in breiten Bereichen der Leistungselektronik und der Batterietechnik einsetzbar. Besonders dort, wo schnelle und flexible Kontaktierungslösungen gefordert werden, kann das Laserbonden eingesetzt werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben »RoBE« wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N11464 durchgeführt.

### 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

*3 Oberseite einer 18650-Batteriezelle mit geschweißtem Kupferbändchen.*

*4 Beispielhafter Aufbau eines Moduls aus 4 Zellen des Typs 18650 mit Kontaktierung beider Pole von der Oberseite.*



## LASER-IMPULS-SCHMELZBONDEN

### Aufgabenstellung

Durch steigende Anforderungen in der Elektromobilität und Hochleistungselektronik werden zunehmend Elektronikbauteile benötigt, die eine hohe Robustheit und thermische Stabilität aufweisen. Konventionelle Fügeverfahren von Elektronikbauteilen wie Lötten oder Drahtbonden sind aufgrund der geringen Schmelzpunkte von Weichloten und dem geringen Leitungsquerschnitt der Drahtbonds nur bedingt einsetzbar. Es wird ein Verfahren benötigt, das dicke Kupferverbinder an dünne Metallisierungen auf sensiblen Substraten schädigungsfrei fügt.

### Vorgehensweise

Mit dem innovativen Prozessansatz »Laser-Impuls-Schmelzbonden« (LIMBO) werden die Prozessphasen Aufschmelzen und Kontaktieren energetisch getrennt. Durch Trennung der Bauteile über einen definierten Spalt wird in einer ersten Prozessphase ein Schmelzevolumen im dickeren Fügepartner erzeugt. Mittels Laserstrahlmodulation wird die Schmelze im Verlauf des Prozesses zum unteren Fügepartner beschleunigt, wodurch ein Benetzen und Anschmelzen der Metallisierung durch die Schmelzeenergie umgesetzt werden kann und die thermische Belastung im Substrat minimiert wird.

### Ergebnis

Mit dem Prozess werden Schweißungen von 200 µm dicken Kupferverbindern auf 10 µm Metallisierungen auf FR4-Leiterplatten möglich. Durch die Minimierung der Einschweißtiefe auf einen Benetzungsprozess wird die kritische Temperatur der Leiterplatte unterschritten und eine reproduzierbare Anbindung erzeugt.

### Anwendungsfelder

Das Verfahren ermöglicht das Fügen von dicken Verbindern auf sensiblen Substraten in der Halbleitertechnik (siliziumbasierte Bauteile) oder Elektrotechnik (FR4-Leiterplatten), ohne das Substrat zu schädigen. Neben dem Fügen auf sensiblen Substraten ist der Prozessansatz anwendbar für das stoffschlüssige Fügen von metallischen Bauteilen mit hohen Spalttoleranzen.

Dieses Projekt wird finanziell durch die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt.

### Ansprechpartner

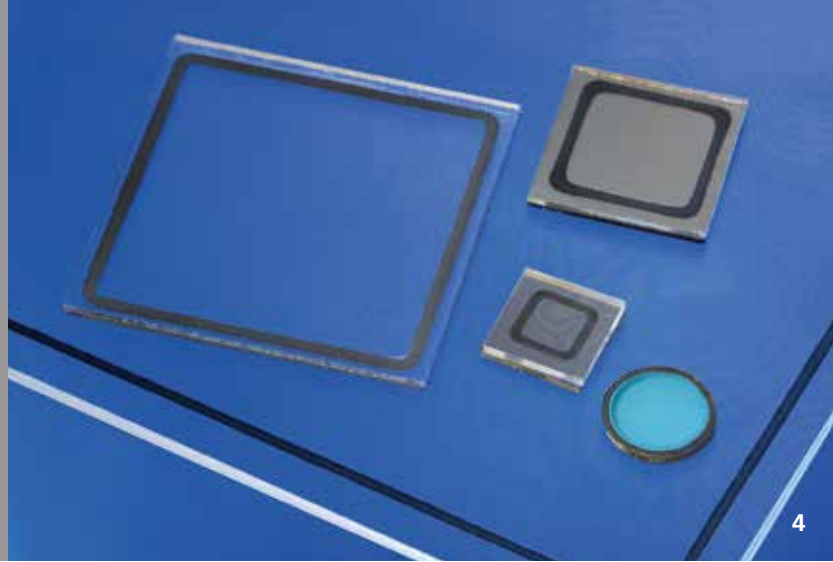
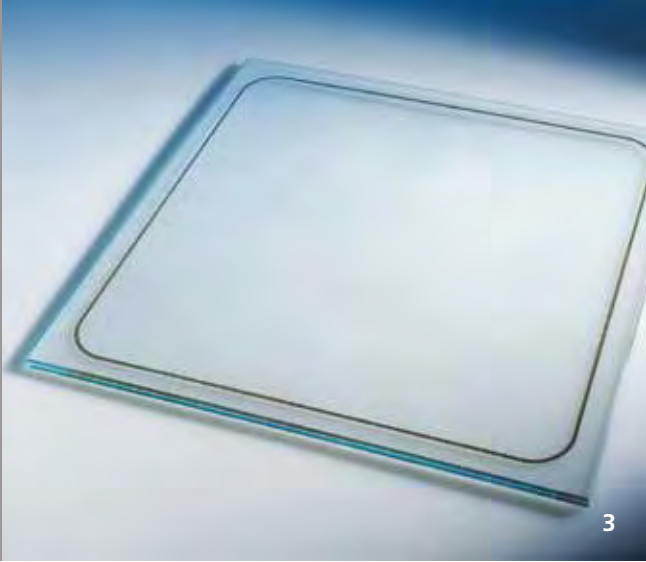
Dipl.-Ing. Simon Britten  
Telefon +49 241 8906-322  
simon.britten@ilt.fraunhofer.de

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

1 Kupferverbinder kontaktiert  
auf Leiterplattenmetallisierung.

2 Querschliff Schweißung von Kupfer  
auf Leiterplattenmetallisierung.





## GLASFRTBONDEN – EIN VERFAHREN FÜR MIKRO- UND MAKROANWENDUNGEN

### Aufgabenstellung

Das laserbasierte Glasfritbonds stellt inzwischen eine ernstzunehmende Alternative zu herkömmlichen Verbindungstechnologien zur Verkapselung temperaturempfindlicher elektronischer Komponenten dar. Die Industrietauglichkeit konnte bereits an hermetisch verschlossenen Bauteilen aus dem Bereich der Mikrosensorik nachgewiesen werden. Die typischen Gehäusegeometrien reichen von wenigen Quadratmillimetern bis hin zu mehreren Quadratzentimetern. Die Verbindungsbildung wird innerhalb weniger Sekunden erzielt, indem die Energie durch eine quasisimultane Bestrahlungsstrategie räumlich begrenzt in die Fügezone eingebracht wird. Der Laserstrahl wird dabei mehrfach mit sehr hohen Geschwindigkeiten mit Hilfe eines Scannersystems (~ 1000 mm/s) über die Lotkontur geführt, was jedoch die Bauteilgröße einschränkt. Da das Verfahren auch für großformatige Anwendungen Vorteile bietet, ist eine Weiterentwicklung der Prozesstechnologie für Makroanwendungen erforderlich.

### Vorgehensweise

Die Anwendbarkeit für Großbauteile ist möglich, indem die quasi-simultane von einer seriellen Bestrahlungsstrategie abgelöst wird. Bei dem sogenannten Konturlötverfahren wird der Laserstrahl kontinuierlich über die Fügezone bewegt. Die Verbindungsbildung erfolgt kontinuierlich seriell in dem Bereich der Glaslotkontur, den der Laserstrahl passiert. Die Bauteilgröße unterliegt bei dieser Art der Prozessführung keiner Einschränkung. Abhängig vom Material und der Anwendung können derzeit Vorschubgeschwindigkeiten von 15 mm/s erreicht werden.

### Ergebnis

Unterschiedliche Bestrahlungsstrategien ermöglichen den Einsatz des laserbasierten Glasfritbondens sowohl für Mikro- als auch für Makroanwendungen. Die an die Fügeaufgabe angepasste Bestrahlungsstrategie ermöglicht eine homogene, rissfreie Verbindungsbildung.

### Anwendungsfelder

Mögliche Anwendungen sind der Verschluss von Mikrosensoren und -aktoren sowie die Verkapselung von OLEDs und Displays. Auch der Randverschluss von Vakuumisolierverglasungen stellt ein mögliches Anwendungsgebiet für diesen laserbasierten Prozess dar.

Die Arbeiten zum laserbasierten Glasfritbonds von Vakuumisolierverglasungen wurden im Rahmen des Projekts »ILHVG-VIP« vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03V0714 gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Heidrun Kind  
 Telefon +49 241 8906-490  
 heidrun.kind@ilt.fraunhofer.de

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

3 Konturgelötete Kalk-Natron-Glasscheibe  
 (Abmessungen: 340 x 340 mm<sup>2</sup>).

4 Beispiele für das quasi-simultane, laserbasierte Glasfritbonds unterschiedlicher Materialien.  
 (Abmessungen: 10 - 80 mm<sup>2</sup>).



1



2

## LASERPROZESSE IN DER KUNSTSTOFFBEARBEITUNG

### Aufgabenstellung

Die Anforderungen an Bearbeitungsverfahren im Bereich Kunststofftechnik sind vielfältig. Das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT hat für das Schweißen, Schneiden, Bohren, Strukturieren und Markieren von Kunststoffen individuelle Verfahren entwickelt und qualifiziert.

Der vorgestellte Technologiemonstrator wurde im Rahmen einer Technologiestudie entworfen und zeigt eine Vielzahl von laserbasierten Verfahren, welche in der Kunststoffbearbeitung ihre Anwendung finden.

### Vorgehensweise

Zur Fertigung des Demonstrators wurde im Rahmen der Technologiestudie eine Prozesskette aufgebaut, welche die folgenden Prozessschritte abdeckt:

- Schneiden von PMMA in verschiedenen Materialstärken (0,3, 1 und 2 mm) mit CO<sub>2</sub>-Laser
- Abtrag von PMMA in Form von Mikrofluidikstrukturen mit CO<sub>2</sub>-Laser
- Absorberfreies Laserdurchstrahlenschweißen von PMMA mit Diodenlaserstrahlung ( $\lambda = 1660 \text{ nm}$ )
- Lasermikrostrukturierung von Edelstahl (1.4301) mit Faserlaserstrahlung ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ )
- Fügen einer Kunststoff-Metall-Hybridverbindung mit Diodenlaserstrahlung ( $\lambda = 940 \text{ nm}$ )

1 *Komponenten des Technologiemonstrators.*

2 *Gefügter Demonstrator.*

### Ergebnis

Anhand des Demonstrators konnten die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Lasertechnik bei der Bearbeitung von Kunststoffen aufgezeigt werden. Alle laserbasierten Verfahren zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität, eine örtlich und zeitlich präzise einstellbare Energiedeposition und eine hohe Automatisierbarkeit aus.

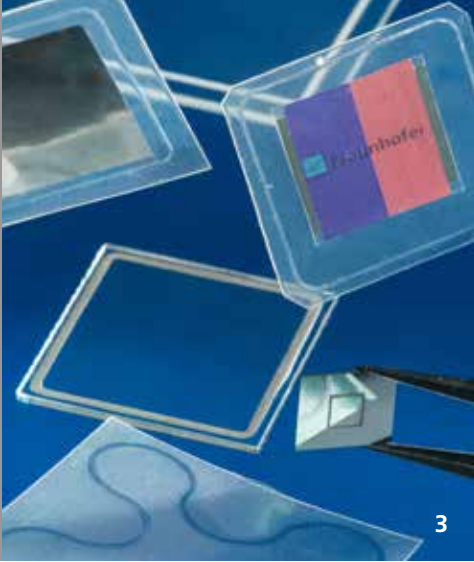
### Anwendungsfelder

Aufgrund des breiten Spektrums der Verfahren eignet sich die Lasertechnik zur Kunststoffbearbeitung in nahezu allen Industriezweigen, von der Automobilindustrie über die Elektroindustrie bis hin zur Lebensmittel- und Gesundheitsindustrie.

### Ansprechpartner

Dipl.-Wirt.Ing. Christoph Engelmann  
 Telefon +49 241 8906-217  
[christoph.engelmann@ilt.fraunhofer.de](mailto:christoph.engelmann@ilt.fraunhofer.de)

Dr. Alexander Olowinsky  
 Telefon +49 241 8906-491  
[alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de](mailto:alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de)



## VERKAPSELUNG DURCH LASERSCHWEISSEN VON MULTILAYER-KUNSTSTOFF-FOLIEN

### Aufgabenstellung

Entwicklungen im Zuge erneuerbarer Energien aber auch der Trend zu mobilen Devices führen zu immer filigraneren komplexeren elektronischen Komponenten, die zum Teil den Einsatz hochempfindlicher Werkstoffe wie Lithium oder organischer Leiter und Halbleiter erfordern. Diese Werkstoffe reagieren vielfach sehr empfindlich auf Wasser und Sauerstoff. Um diese Wechselwirkung mit der Umgebung zu verhindern, wurden Hochbarriere-Multilayer-Folien entwickelt. Sie verhindern durch spezielle Barrierschichten die Permeation von Wasser und Sauerstoff auch bei sehr dünnen Folien. Das Grundsubstrat der Folie ist zumeist ein Polymer, um dadurch eine hohe Flexibilität der Folie zu erreichen. Konventionell werden die zu schützenden Bauteile umlaufend mit der Folie verklebt oder verschweißt, so dass sich eine Tasche ergibt, die z. B. die flexible organische LED enthält. Eine auch für hohen Durchsatz geeignete Fügetechnik stellt das Laserschweißen von Polymeren dar.

### Vorgehensweise

Kunststoffe haben in höheren Wellenlängenbereichen spezifische Absorptionsbanden. Die Lage und Ausprägung dieser Absorptionsbanden ist kunststoffabhängig. Bei Einsatz einer geeigneten Laserstrahlquelle kann bei einer Multilayer-Folie, die aus verschiedenen Kunststoffen besteht, auf diese Weise gezielt nur ein Layer aufgeschmolzen werden. Hierdurch

ist es z. B. beim Durchstrahlschweißen möglich, nur lokal den untersten Layer aufzuschmelzen, um diesen mit der gegenüberliegenden Folie zu verschweißen. In den darüberliegenden Schichten wird keine Energie deponiert.

### Ergebnis

Schweißversuche und Dünnschnitte zeigen die räumlich begrenzte Aufschmelzung in dem anvisierten Layer und keine Aufschmelzung in den darüberliegenden Layern.

### Anwendungsfelder

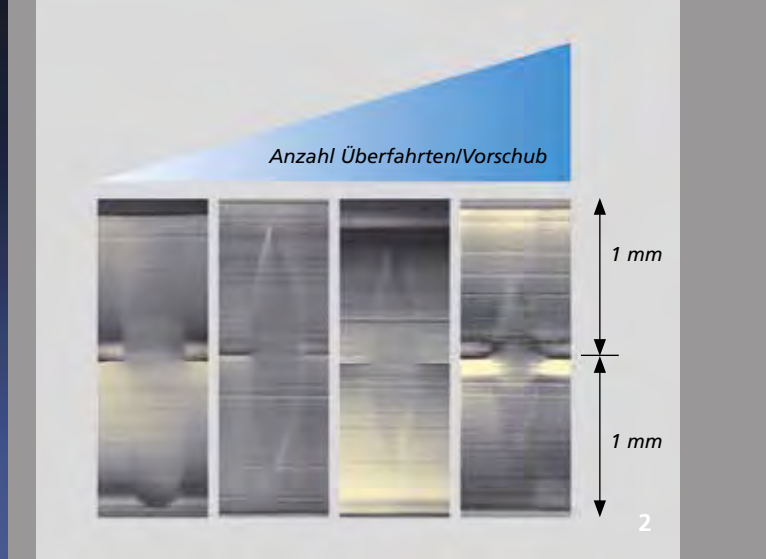
Das Spektrum des Einsatzgebiets der Technologie reicht dabei vom Foodpackaging mit geringerer Anforderung an die Dichtheit gegenüber Wasser und Sauerstoff über Medizinverpackungen mit erhöhter Anforderung bis hin zur geschilderten Verkapselung von organischen LEDs und Lithium-Feststoffbatterien.

Das unter anderem diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N13241 durchgeführt.

### 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



## QUASI-SIMULTAN- SCHWEISSEN ABSORBER- FREIER THERMOPLASTE

### Aufgabenstellung

Die Transparenz von Thermoplasten im Wellenlängenbereich klassischer beim Laserdurchstrahlschweißen eingesetzter Strahlquellen (800 - 1100 nm) erfordert in der Regel eine Modifizierung eines Fügepartners durch Absorber, um ihn für die Laserstrahlung zu sensibilisieren. Mithilfe entsprechender Strahlquellen lassen sich jedoch intrinsische Absorptionseigenschaften der Thermoplaste ausnutzen, um zwei Kunststoffteile ohne Absorberzusatz miteinander zu verschweißen. Dabei besteht die Herausforderung darin, beide Fügepartner möglichst selektiv im Kontaktbereich zu schmelzen.

### Vorgehensweise

Bisher lässt sich trotz angepasster Wellenlänge selbst mithilfe stark fokussierender Optiken keine selektive Aufschmelzung des Kontaktbereichs erreichen. Die weit entlang der Strahlachse ausgedehnte Wärmeeinflusszone (WEZ) kann bei flachen Bauteilen, wie beispielsweise Lab-on-a-Chip Anwendungen (Bild 1), zu Verzug führen und zudem Schmelzeaustritt sowie Verbrennungen auf der bestrahlten Oberfläche begünstigen. Eine kompaktere WEZ lässt sich durch das Quasisimultanschweißen erzielen, bei dem der Laserstrahl mit sehr hohem Vorschub ( $> 1 \text{ m/s}$ ) mehrmals hintereinander entlang der Schweißkontur geführt wird. Durch die schlechte Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen wird die Wärme in der Fügezone

akkumuliert, während sie an der Ober- und Unterseite durch die Elemente der Spannvorrichtung (Glas, Aluminium), die eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen, abgeführt wird.

### Ergebnis

Verglichen mit dem Konturverfahren lässt sich durch eine quasi-simultane Bestrahlung eine in Strahlrichtung wesentlich kompaktere WEZ realisieren (Bild 2). Die nahezu gleichmäßige Erwärmung der gesamten Schweißkontur ermöglicht einen Fügeweg, mit dem Restspalte zwischen den Fügeteilen ausgeglichen werden können. Trotz mehrerer Überfahrten bleibt die Schweißzeit aufgrund deutlich höherer Vorschübe vergleichbar mit dem Konturschweißverfahren.

### Anwendungsfelder

Das vorgestellte Verfahren zielt primär auf Anwendungen im Bereich der Medizintechnik (Bild 1) ab, bei denen der Einsatz von Absorbern ein Risiko für die Biokompatibilität darstellen kann. Aber auch in anderen Anwendungen, in denen Absorber aus optischen, wirtschaftlichen oder funktionellen Gründen unzulässig sind, kann das Verfahren eingesetzt werden.

### Ansprechpartner

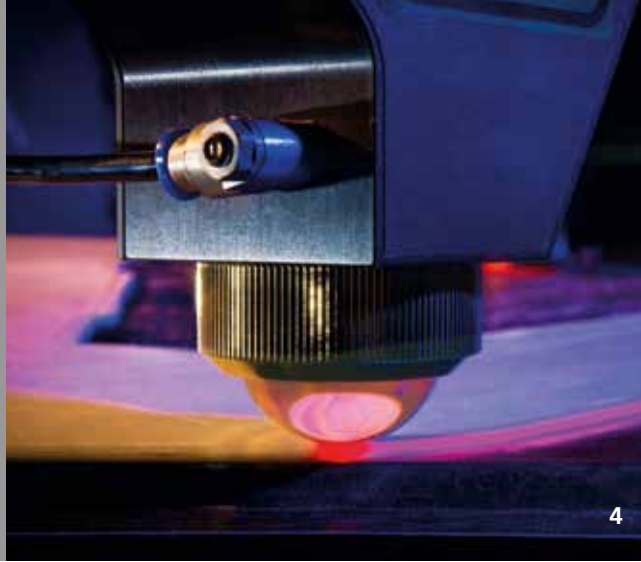
Dipl.-Ing. Viktor Mamuschkin  
Telefon +49 241 8906-8198  
viktor.mamuschkin@ilt.fraunhofer.de

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

1 Beispiel eines mikrofluidischen Bauteils.

2 WEZ bei zunehmender Überfahrtenanzahl.





---

## FORM- UND STOFFSCHLÜSSIGES FÜGEN VON CFK UND GFK

---

### Aufgabenstellung

Die Einsparung von Rohstoffen und Energie sowohl bei der Herstellung als auch in der Nutzung von Produkten ist eine immer wichtiger werdende Herausforderung. Die Leistungsfähigkeit der Bauteile soll dabei erhalten, wenn nicht sogar erhöht werden. Dies gilt insbesondere für die Fahrzeug- und Luftfahrtindustrie, bei denen zur Reduzierung des Eigengewichts vermehrt innovative Leichtbaukonzepte zum Tragen kommen, die zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und umweltrelevanter Emissionen beitragen sollen. Dabei werden immer häufiger Komponenten aus thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen (TP-FVK) hergestellt, welche sowohl eine Karbon- als auch eine Glasfaserverstärkung aufweisen können.

### Vorgehensweise

Mit einem neuen laserbasierten Ansatz wird ein innovatives Verbindungskonzept verfolgt, welches auf einem kombinierten Form- und Stoffschluss beruht. Zunächst werden in einem Multipass-Laserschneidprozess die formschlüssigen Komponenten aus CFK gefertigt. Dieser Prozess ermöglicht durch kurze Wechselwirkungszeiten zwischen Laserstrahlung und Material eine qualitativ hochwertige Schnittkante mit den benötigten hohen Genauigkeiten für den Formschluss. Im Anschluss werden die geschnittenen Komponenten ineinander gesteckt und durch einen Laserschweißprozess aneinander fixiert. Dazu wird ein lasertransparentes glasfaserverstärktes Material verwendet, welches das gleiche Matrixmaterial der CFK-Komponenten besitzt.

Das GFK-Material wird überlappend über dem formschlüssigen Bereich angeordnet, in einem Laserdurchstrahlenschweißprozess stoffschlüssig angebunden und der Formschluss damit quer zur Belastungsrichtung fixiert.

### Ergebnis

Mit dem beschriebenen Verbindungskonzept wurden erste Versuchsmuster gefertigt. Durch Skalierung und Anordnung der Formschlüsselemente kann die Auslegung der Verbindung an den Lastfall angepasst werden. Weitere Untersuchungen zu Größe und Form der Elemente und der transmissionsgefühten Flächen bieten Optimierungspotenzial.

### Anwendungsfelder

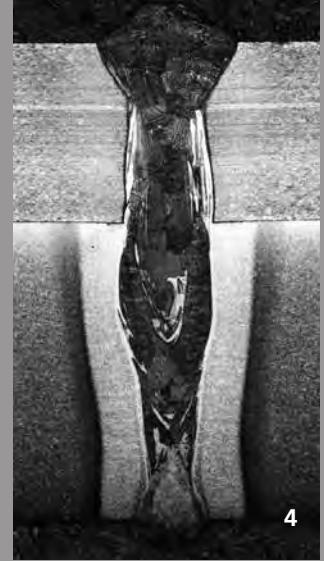
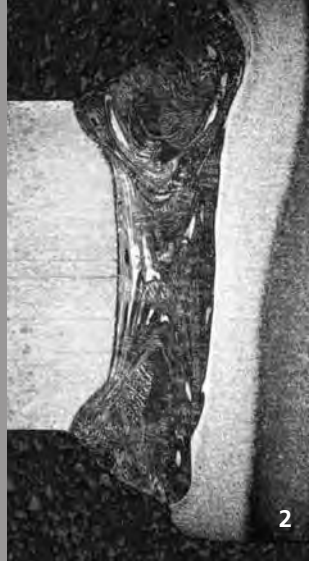
Die in diesem Verbindungsansatz demonstrierten Verfahren zum Schweißen und Schneiden thermoplastischer FVK-Bauteile bieten für die Verbindungstechnik unterschiedlichster Bauteile und Materialvarianten eine Alternative zur mechanischen Bearbeitung und zum Fügen durch Schraubverbindungen, Nieten oder Kleben. Ein weiteres potenzielles Einsatzfeld ist die Reparatur von Faserverbundbauteilen.

### Ansprechpartner

Dipl.-Wirt.Ing. Christoph Engelmann  
Telefon +49 241 8906-217  
christoph.engelmann@ilt.fraunhofer.de

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

- 3 Werkstückkanten mit Formschlussgeometrie.
- 4 Laserdurchstrahlfügen der Decklagen.
- 5 Form- und stoffschlüssige Verbindung.



## SCHWEISSEN HOCHMANGANHALTIGER STÄHLE IN ART-UNGLEICHEN VERBINDUNGEN

### Aufgabenstellung

Hochmanganhaltige austenitische Stähle zeichnen sich durch eine hohe Plastizität und Festigkeitssteigerung beim Kaltumformen aus. Diese macht sie zu idealen Kandidaten für den Leichtbau. Trotz hoher Kohlenstoffgehalte erweisen sich diese Stähle als schweißgeeignet, wobei auch die Schweißnähte einen hohen Umformgrad aufweisen. Die Kombination mit anderen Standardwerkstoffen und ultrahochfesten Güten ist aus schweißtechnischer Sicht zu untersuchen.

### Vorgehensweise

Die Schweißbeignung artungleicher Verbindungen mit 1.4678, kaltverformt auf 1100 MPa (H1100), auf der einen und 1.4301 (X6CrNi18-10) beziehungsweise gehärteter 1.4034 (X46Cr13) auf der anderen Seite ist zu untersuchen. Im Rahmen der Untersuchung wird die Wirkung des autogenen Laserstrahlschweißens ohne Vor- und Nachwärmern auf Nahtgeometrie, Mischungsverhalten und Härte geprüft.

1 Stumpfstoß 1.4678/1.4301.

2 Stumpfstoß 1.4678/1.4034.

3 Überlappstoß 1.4678/1.4301.

4 Überlappstoß 1.4678/1.4034.

### Ergebnis

Der kaltverformte Manganstahl verliert seine Festigkeit im Gussgefüge der Schweißnaht. In Verbindung mit dem metastabilen 1.4301 kann ein weicher Übergang der Festigkeiten im Stumpfstoß realisiert werden. Im Überlappstoß bleibt die Festigkeit in der Anbindungszone erhalten, da infolge der Durchmischung partiell Martensit gebildet wird. In der Verbindung mit dem gehärteten 1.4034 tritt ein drastischer Verlust an Härte auf. Grund hierfür ist die Aufmischung mit Mangan, wodurch die Bildung weichen Austenits begünstigt wird. Die grundlegenden Untersuchungen zeigen, dass ein Schweißen der oben angegebenen Kombinationen im Feinblechbereich möglich ist. Ob und wie weit sich die Festigkeiten durch Wärmebehandlung oder Belastung wieder herstellen lassen, ist im Fortgang der Arbeiten zu prüfen.

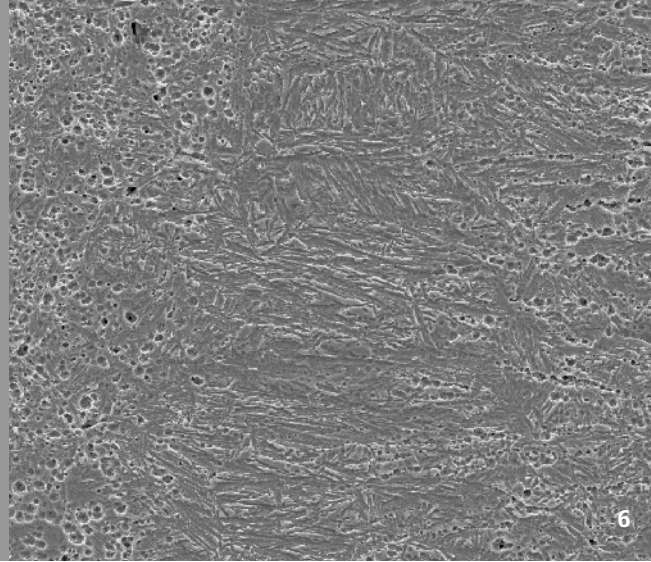
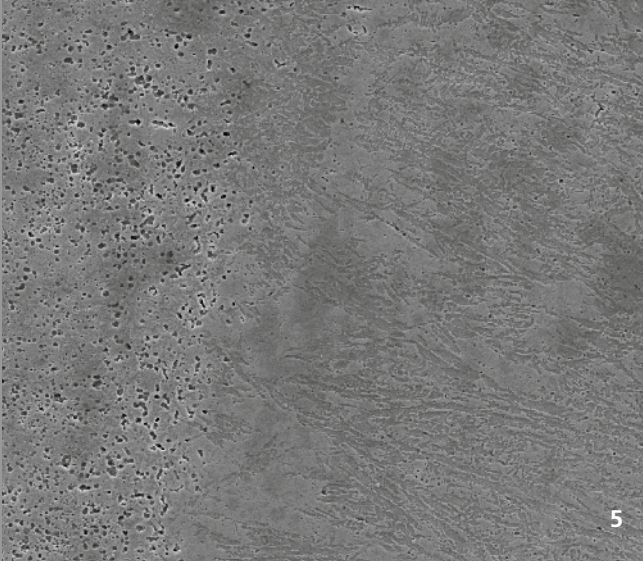
### Anwendungsfelder

Anwendungen finden sich dort, wo bei vorwiegend statischer Belastung die Vorteile der Kombination aus hoher Dehnfähigkeit und hoher Festigkeit genutzt werden sollen. So können Hohlkammerplatten aus Stahl mit verbesserter Dämpfung konstruiert werden. Aufgrund der schmalen Schweißnähte sind weitere konstruktive Möglichkeiten gegeben, deren Potenzial noch auszuloten ist.

### 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



## SENSITIVIERUNG IN DER SCHWEISSZONE PRESSGEHÄRTETER MARTENSITISCHER CHROMSTÄHLE

### Aufgabenstellung

Stähle mit mehr als 12 Massenprozent Chrom sind intrinsisch korrosionsbeständig. Aus diesem Grund finden verschiedene Güten Anwendung in Fahrzeugtechnik und Behälterbau. Ihre Festigkeit kann durch Presshärten gesteigert werden; mit steigendem Kohlenstoffgehalt wird eine höhere Festigkeit erreicht, wobei für das Fügen das Laserstrahlschweißen eingesetzt wird. Es ist zu untersuchen, wie und in welcher Weise ein Korrosionsangriff auf geschweißte Verbindungen erfolgt.

### Vorgehensweise

Das Ziel der Untersuchung ist zum einen die Prüfung der Anwendbarkeit des Oxalsäuretests auf martensitische Stähle. Zum anderen ist die Korrosionsanfälligkeit der Schweißzone in pressgehärteten Blechen sowie in geschweißten Blechen nach dem Presshärten zu untersuchen. Die Prüfung erfolgte an Güten mit Kohlenstoffgehalten von 0,03 bis 0,46 Massenprozent.

### Ergebnis

Durch vergleichende Versuche konnte gezeigt werden, dass der Oxalsäuretest nach ASTM 763-83 für die Prüfung pressgehärteter nichtrostender Chromstähle anwendbar ist. In Schweißnähten in pressgehärteten Werkstoffen steigt die Korrosionsempfindlichkeit mit dem Kohlenstoffgehalt und

bei Anwendung einer Schweißwärmebehandlung. Werden die Stähle nach dem Schweißen pressgehärtet, entstehen lediglich beim Stahl mit dem höchsten Kohlenstoffgehalt vereinzelt duale Ätzstrukturen.

### Anwendungsfelder

Mit der ASTM763-83 steht ein Verfahren für die vereinfachte Prüfung der interkristallinen Korrosion zur Verfügung. Die Ergebnisse zeigen, dass nichtrostende Chromstähle mit martensitischem Gefüge auf der Route Tailored Blanks keine Einbußen in ihrer Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Beim Schweißen pressgehärteter Werkstoffe liegt eine Sensitivierung vor. Dennoch liegt die Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion deutlich über der von unlegierten Stählen. Für viele Anwendungsgebiete liegt nun eine Aussage über die Schweißbignung der betrachteten Güten vor.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen IGF 17.433 N 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

5 1.4034 pressgehärtet nach dem Schweißen.

6 1.4034 nach dem Presshärten geschweißt.





## REPARATUR VON TRIEBWERKS- KOMPONENTEN DURCH LASERSTRAHLSCHNEIDEN UND -SCHWEISSEN

### Aufgabenstellung

Triebwerkskomponenten sind je nach Funktion und Betriebsweise hohem thermischen und mechanischen Verschleiß unterworfen. Bei Fluggeräten, die schon in den 1960ern in Betrieb genommen wurden, wird darüber hinaus die Versorgung mit Ersatzteilen schwierig. Aus diesen Gründen ist die Reparatur spezifischer Komponenten eine wichtige Methode der Erhaltung von Wert und Funktion. Das Laserauftragschweißen ist bereits ein wichtiges Verfahren bei Reparatur und Überholung.

### Vorgehensweise

Ziel verschiedener Untersuchungen ist die Feststellung der Einsatzfähigkeit des Laserstrahlschneidens und -schweißens als Reparaturverfahren für Triebwerkskomponenten. Orientiert an der Vielzahl der zu bearbeitenden Bauteile und Werkstoffe wird ein Verfahren entwickelt, das von der ersten Schweißprüfung über den Vorrichtungsbau und die Definition der Reparaturvorschrift bis zur Abnahme von Verfahren und Bauteilen eine zuverlässige Vorgehensweise für die Wiederaufarbeitung bereits gelaufener Komponenten darstellt.

1 *Aufgetrennter, gereinigter und wieder verschweißter Schmierölsammelbehälter.*

2 *Austausch von Anschlussbutzen an einem Verdichteraustrittsgehäuse.*

### Ergebnis

Zunächst ist die Schweißbeignung im Betrieb gealterter Werkstoffe zu prüfen. Hier kann es je nach Betriebstemperatur zu Ausscheidungen an den Korngrenzen kommen, die beim erneuten Fügen zu Aufschmelzrissen führen. Deren Vermeidung gelingt mit der Einstellung einer minimalen Energiezufuhr, die eine der Stärken des Laserstrahlschweißens ist. Der konzentrierte Energieeintrag ermöglicht auch konstruktive Änderungen an Bauteilen, die infolge des begrenzten thermischen Einflusses von den Genehmigungsbehörden akzeptiert werden. Vor einer Anwendung des Laserstrahlschneidens ist sicherzustellen, dass innere Strukturen nicht geschädigt werden bzw. deren Schädigung minimiert wird. Dies ist in vielen Fällen durch eine geeignete Schnittführung möglich.

### Anwendungsfelder

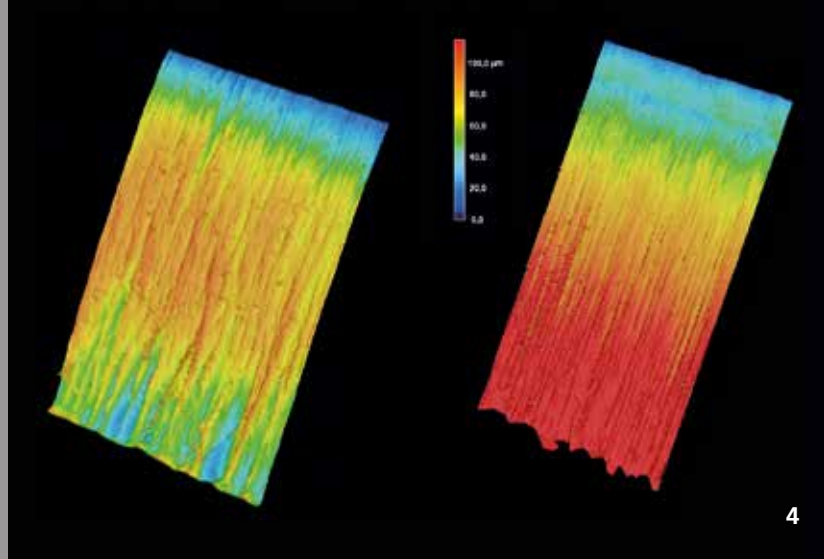
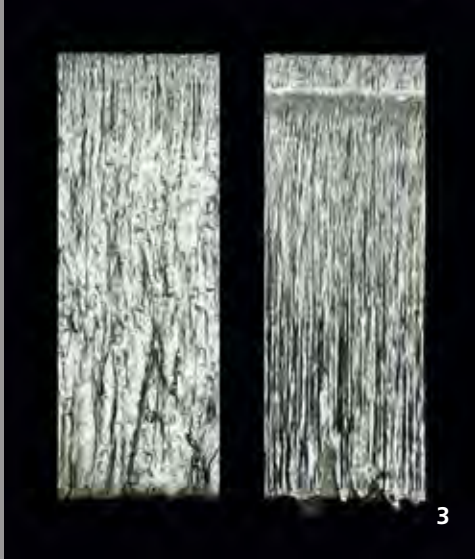
Die bisher entwickelten Verfahren werden in erster Linie für Komponenten von Flugtriebwerken eingesetzt. Deren Anwendung über die Wiederaufarbeitung hinaus in der Fertigung neuer Komponenten ist durchaus möglich. Eine Übertragung auf andere Gebiete mit hochwertigen Verschleißprodukten ist denkbar.

### 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





## IN-SITU-PROZESSDIAGNOSE BEIM LASERSTRAHL- SCHMELZSCHNEIDEN

### Aufgabenstellung

Instabilitäten der Laserschneidfront verursachen beim Laserstrahlschneiden unerwünschte Qualitätseinbußen in Form von Abtrag- und Erstarrungsriefen und können bis zur Bartbildung führen. Die in-situ Diagnose der Schmelz- und Erstarrungsdynamik beim Laserstrahlschmelzschneiden macht einen Prüfstand erforderlich, um eine optische Zugänglichkeit der Schneidfuge während des Prozesses zu ermöglichen.

### Vorgehensweise

Bei Besäumschnitten wird entlang einer bestehenden geradlinigen Werkstückflanke mit definiertem Laserstrahlüberlapp geschnitten. Zur Beibehaltung eines geführten Überschall-Gasstrahlverlaufs entlang des Schmelzfilms wird die fehlende Schnittflanke durch eine transparente Ersatzflanke (Schutzglas) simuliert. Die Qualität der sich bildenden Schnittflanke wird üblicherweise an mehreren Stellen in Form der gemittelten Rautiefe qualitativ angegeben. Dieses Qualitätskriterium spiegelt die Flankenbeschaffenheit allerdings nicht in idealer Weise wieder, weshalb die Oberfläche ganzheitlich betrachtet werden muss.

### Ergebnis

Der für die Besäumschnitte entwickelte Prüfstand ist ausgestattet mit zwei x/y-Tischen mit je einer Vorschub- und Zustellachse, womit Geschwindigkeiten von 0,05 - 120 m/min bei Positionier- und Wiederholgenauigkeiten < 2 µm und eine Parallelität < 15 µm in Vorschubrichtung erreicht

werden. In Verbindung mit einer unabhängigen »off-axis« angeordneten Kamera (opt. Auflösung < 5 µm) wird somit eine reproduzierbare Versuchsdurchführung ermöglicht.

Die mit dem beschriebenen Verfahren durchgeführten Besäumschnitte zeigen vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich Prozessanalyzierbarkeit sowie Prozessbeeinflussbarkeit. Eine höhere Prozessnähe wird mit einer sukzessiven Anpassung des Prüfverfahrens erreicht werden.

### Anwendungsfelder

Die in-situ Diagnose ist Basis für die Entwicklung von angepassten Prozessparametern zur Steigerung der Schnittflankenqualität bei gleichzeitiger Vermeidung von Bartbildung.

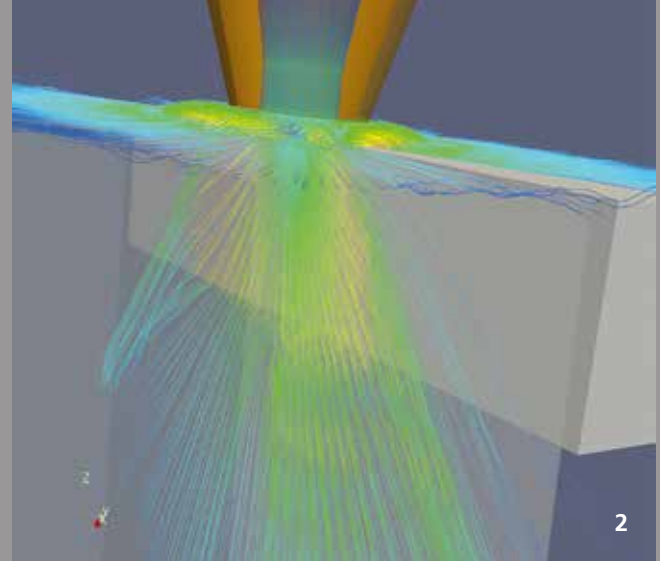
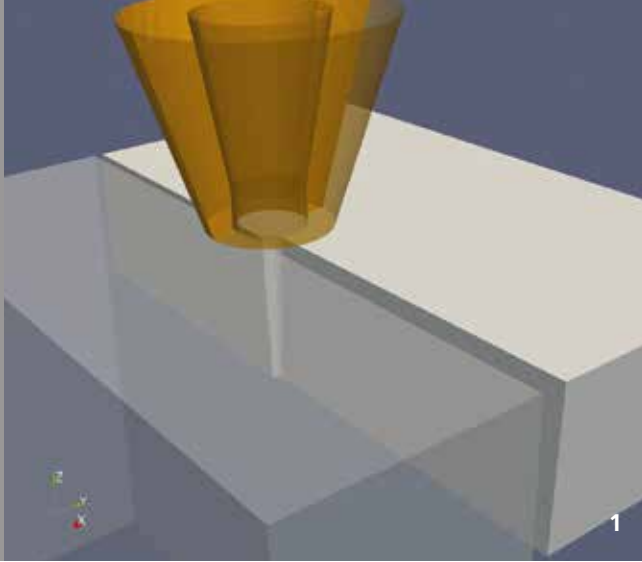
Das Vorhaben wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1120 »Präzision aus Schmelze« finanziert.

### Ansprechpartner

Dennis Arntz M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8389  
dennis.arntz@ilt.rwth-aachen.de

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

- 3 Foto einer realen Schnittflanke (li.) und einer mit Besäumverfahren erstellten Schnittflanke (re.).
- 4 3D-Ansicht einer realen Schnittflanke (li.) und einer mit Besäumverfahren erstellten Schnittflanke (re.).



## SIMULATION DER GASSTRÖMUNG FÜR DIE BESÄUMSCHNITT-IN-SITU-DIAGNOSE

### Aufgabenstellung

Bei der in-situ Diagnose des Laserstrahlschmelzscheidens durch Besäumschnitte wird die optische Zugänglichkeit der Schmelz- und Erstarrungsdynamik durch ein Quarzglas ermöglicht. Eine durch dieses Verfahren veränderte Schnittfugengeometrie führt zu Abweichungen bei den durch die Schneidgasströmung verursachten antreibenden Kräften auf die Schmelze im Vergleich zum realen Schnitt. Die Simulation ermöglicht eine Anpassung der Gasströmung an die Bedingungen eines realen Schnitts.

### Vorgehensweise

Ein bestehender Gasströmungssimulationscode wird zur unmittelbaren Auswertung der antreibenden Kräfte auf der Schneidfront erweitert. Die Dynamik der turbulenten Strömung wird dabei durch eine Discontinuous-Galerkin-Methode berechnet. Für eine Analyse der antreibenden Kräfte werden diese über einer für die vorliegende turbulente Strömung typischen Zeitskala gemittelt. Zur Berechnung der Gasströmung für unterschiedlichste Besäumschnittgeometrien wird ein Modul zum Laden von Berechnungsgittern aus einem kommerziellen Vernetzungswerkzeug ergänzt.

### Ergebnis

Die zur Vernetzung genutzte Software »COMSOL« verfügt über einen CAD-Importfilter und ermöglicht ein schnelles und effektives Erstellen parametrisierter Geometrien. Durch die Berechnung zeitlich gemittelter, d. h. effektiver Scherkräfte ist die Möglichkeit einer automatisierten Auswertung der Berechnungsergebnisse gegeben. Dadurch wird die simulative Auslegung von Gasströmungen erheblich vereinfacht und ein großer Teil des Work-Flows automatisiert.

### Anwendungsfelder

Der neu entwickelte Work-Flow zur Auslegung von Gasströmungen ermöglicht eine effektive Benutzung des Gasströmungslösers, so dass die Auslegung von Gasströmungen für Laseranwendungen wie Schneiden, Schweißen oder Bohren stark vereinfacht wird.

Die Arbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1120 gefördert.

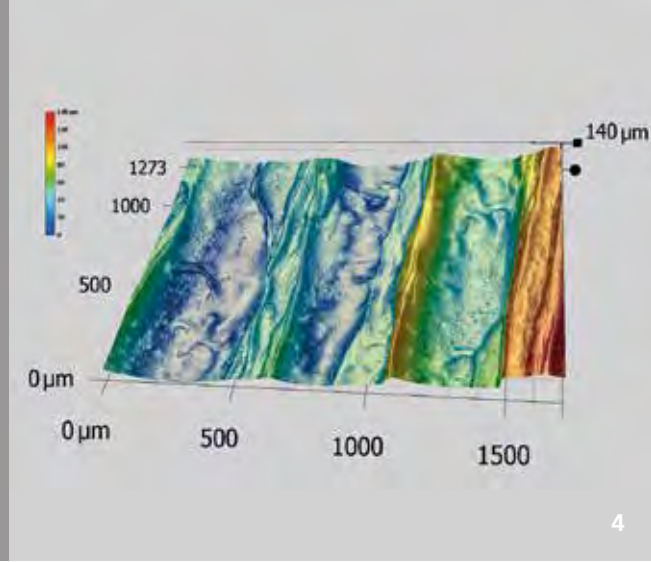
### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Ulrich Jansen  
 Telefon +49 241 8906-680  
 ulrich.jansen@nld.rwth-aachen.de

Dr. Markus Nießen  
 Telefon +49 241 8906-8059  
 markus.niessen@ilt.fraunhofer.de

1 Geometrie für die Besäumschnittdiagnose.

2 Stromlinien aus der Gasströmungssimulation.



## BEEINFLUSSUNG DES LASERSTRAHLSCHNEIDENS DURCH STRAHLFORMUNG

### Aufgabenstellung

Faser- und Scheibenlaser bieten zahlreiche technologische und wirtschaftliche Vorteile. Die Anzahl der jährlich verkauften fasergekoppelten Flachbett-Schneidanlagen übertrifft daher bald die der CO<sub>2</sub>-Lasieranlagen. Im Dickblechbereich ist die Schnittqualität von CO<sub>2</sub>-Lasern jedoch nach wie vor unübertroffen. Zur Steigerung der Qualität von Faserlaserschnitten soll daher innerhalb grundlegender Untersuchungen der Einfluss einer elliptischen Strahlformung auf den Prozess analysiert werden.

### Vorgehensweise

Die Strahlformung wird mithilfe von mehreren Zylinderlinsen unterschiedlicher Brennweiten realisiert. Der gewählte optomechanische Aufbau des Schneidkopfs gestattet weite Variationsmöglichkeiten der Strahlelliptizität. In Parameterstudien an 8 mm dicken Edelstahlblechen wird die Beeinflussbarkeit der Schnittflankenqualität sowie der Schmelzfilmdynamik an der Schneidfront untersucht. Der Schmelzfluss wird mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera mit über 100.000 Bildern pro Sekunde beobachtet. Die Aufnahmen werden anhand von Streak-Analysen ausgewertet, um wesentliche dynamische und statistische Größen des Schmelzflusses zu ermitteln.

### Ergebnis

Die Untersuchung des Einflusses einer elliptischen Strahlformung auf die Schmelzfilmdynamik trägt wesentlich zur Steigerung des Verständnisses der Wirkungsweise der beteiligten physikalischen Teilprozesse beim Laserstrahlschneiden bei. Im Zuge dieser Arbeit ist eine umfassende Schneiddatenbank entstanden, die neben Prozessparametern und Messungen der Schnittqualität von einigen Hundert Schnittproben auch die jeweiligen High-Speed-Aufnahmen des Schmelzflusses sowie daraus abgeleitete dynamische und statistische Kenngrößen des Schmelzflussverhaltens enthält.

### Anwendungsfelder

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Erarbeitung industrietauglicher Strahlformungskonzepte zur Steigerung der Produktivität und Schnittqualität von Faserlaserschneidanlagen ein. Darüber hinaus können die ermittelten experimentellen Daten zum Kalibrieren von numerischen Modellen sowie als Metamodell-Datensätze genutzt werden.

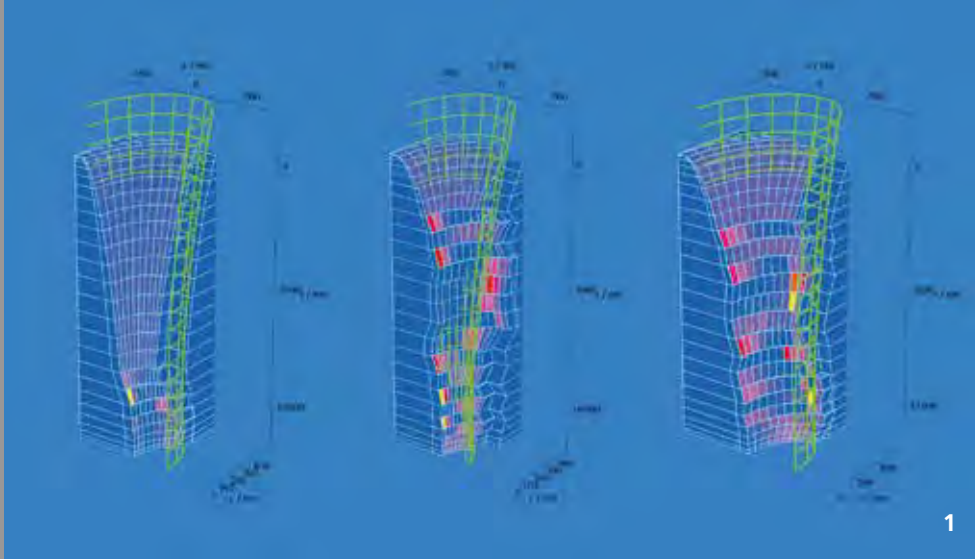
Die Arbeiten werden im Rahmen des EU-Projekts »HALO« (High Power Adaptable Laser Beams for Materials Processing) unter dem Förderkennzeichen FP7-314410 gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Stoyan Stoyanov  
 Telefon +49 241 8906-8080  
 stoyan.stoyanov@ilt.fraunhofer.de

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

- 3 Schneidprozess und Diagnoseaufbau.
- 4 Nahaufnahme der Topologie einer Schnittflanke.



## PROZESSOPTIMIERUNG DES LASERSTRAHLSCHNEIDENS MIT DEM SIMULATIONS-TOOL »CALCuT«

### Aufgabenstellung

Der Markt für Laserschneidanlagen erlebt seit fast 10 Jahren eine besonders dynamische Entwicklung. Inzwischen bieten nahezu alle Schneidmaschinenhersteller Systeme mit fasergekoppelten Laserquellen an. Ihr Marktanteil steigt bereits auf über 50 Prozent aller jährlich verkauften Flachbett-Schneidanlagen. Im Dünnpblechbereich ist der CO<sub>2</sub>-Laser schon zweite Wahl. Beim Dickblechschneiden von Edelstählen bleibt er jedoch immer noch unschlagbar was die erzielbare Schnittflankenqualität angeht. Nachhaltige Entwicklungssprünge erfordern heute mehr als nur empirische Parametervariationen. Um neue Prozesstechniken und Strahlformungskonzepte zu entwickeln und mit den Kunden erfolgreich umzusetzen, nutzt das Fraunhofer ILT seit langem die Simulationssoftware »CALCut«.

### Vorgehensweise

Der nach wie vor einmalige Umfang der in »CALCut« berücksichtigten physikalischen Teilprozesse gestattet die Berechnung der dreidimensionalen stationären Schneidfrontgeometrie und der resultierenden Fugengeometrie unter Berücksichtigung von Werkstoff, Materialdicke, Laserwellenlänge, Strahlqualität, Strahlleistung und -verteilung, Polarisierung, Rohstrahldurchmesser, Fokussieroptik, Brennweite, Fokusslage,

Schneidgasart- und -druck sowie der Schneidgeschwindigkeit. »CALCut« identifiziert die räumliche Verteilung der absorbierten Laserleistungsdichte, der Temperatur, der Ausdehnung und Strömungsgeschwindigkeit des Schmelzfilms sowie der Abdampfraten und des Abdampfdrucks. Die maximale Schneidgeschwindigkeit wird durch automatische Iteration ermittelt.

### Ergebnis

Das der Simulationssoftware »CALCut« zugrundeliegende Prozessmodell beschreibt die stationäre Lösung als Funktion der eingestellten Prozessparameter. Neuere Untersuchungen zeigen nun, dass auf Basis von »CALCut«-Rechnungen sogar die Schnittflankenqualität, also beispielsweise das Ausmaß der Rautiefe und der Bartbildung, vorhersagbar wird.

### Anwendungsfelder

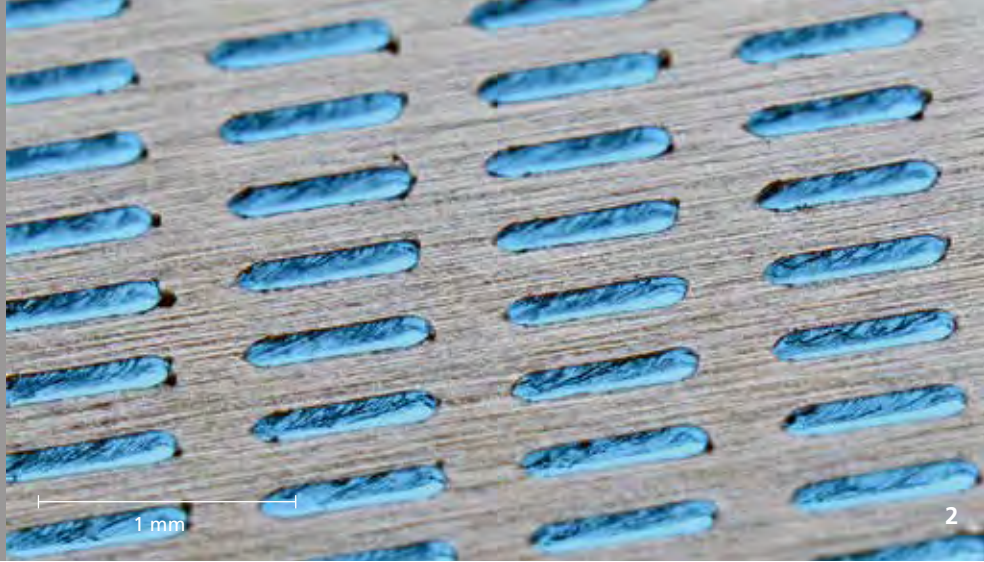
Eine aktuell vieldiskutierte Fragestellung betrifft den Einfluss unterschiedlicher Laserstrahlverteilungen auf die Schnittqualität. Simulationsrechnungen mit »CALCut« liefern fundierte Richtlinien zur Entwicklung optimierter, an die Schneidaufgabe angepasster Strahlverteilungen, die in zukünftigen Laserschneidanlagen zum Einsatz kommen werden.

### Ansprechpartner

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

1 *Simulierte Schneidfronten für unterschiedliche Strahlverteilungen.*





## HOCHGESCHWINDIGKEITS- SCHNEIDEN VON LANGLOCHARRAYS IM SUB-MILLIMETERBEREICH

### Aufgabenstellung

In eine 250 µm dicke Edelstahlfolie sollen großflächige Langlocharrays mit einer vorgegebenen Fugengeometrie und hohen Flächenraten mittels Laserstrahlung geschnitten werden. Der Prozess soll einstellbare Fugenbreiten im Sub-Millimeterbereich sowie eine einstellbare Lochgeometrie ermöglichen. Dabei sind gleichbleibend hohe Schnittqualität sowie Formtreue über die gesamte Arrayfläche gefordert. Neben den hohen Qualitätsanforderungen sollten hohe Perforationsraten von ca. 100.000 Bohrungen/min erzielt werden.

### Vorgehensweise

Als Laserstrahlquelle wird ein Faserlaser mit einer hohen Brillanz verwendet. Die hohe Bearbeitungsrate erfordert die Erzeugung der Fuge bei Schneidgeschwindigkeiten von mindestens 40 m/min. Die gewünschte Fugenform wird unmittelbar durch die gewählten Prozessparameter in einer on-the-fly Bearbeitung vorgegeben. Dabei werden die physikalischen Effekte des Hochgeschwindigkeitsschneidprozesses, bei dem der Einfluss der Schmelzströmung auf die Schnittfugengeometrie einen bedeutenden Einfluss hat, sowie eine Modulation der Laserleistung zur gezielten Ausbildung der Fugenformen eingesetzt. Um eine gleichbleibende Schnittqualität und Formtreue zu gewährleisten, werden Parametersätze gewählt, bei denen eine robuste Prozessführung sichergestellt ist.

### Ergebnis

Langlocharrays mit hoher Schnittqualität wurden mit Schneidgeschwindigkeiten von über 100 m/min erstellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Abmessungen der Löcher in breiten Grenzen im Sub-Millimeterbereich abgestimmt werden können.

### Anwendungsfelder

Die Anwendungsfelder der Technologie liegen im Bereich von industriellen Segmenten, in denen mikro- und strömungstechnisch optimierte Strukturen mit einer hohen Lochdichte und hohen Bohrlochqualitäten benötigt werden.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Stoyan Stoyanov  
Telefon +49 241 8906-8080  
stoyan.stoyanov@ilt.fraunhofer.de

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

2 Langlocharray mit einer  
Fugenbreite von 110 µm.



## FORMSCHNEIDEN SPRÖDER CARBONMATERIALIEN

### Aufgabenstellung

Die Bearbeitung harter und spröder Materialien, wie Diamanten, andere Formen des Kohlenstoffs oder keramische Werkstoffe, mit konventionellen Fertigungsverfahren wie dem mechanischen Trennen oder Schleifen führt oftmals zu unkontrollierten Ausbrüchen als Folge von eingebrachten mechanischen Spannungen. Die entstehenden Mikrorisse führen zu unerwünschten Ausbrüchen und entsprechenden Konturabweichungen. Abhängig vom Bearbeitungsverfahren sind Konturschnitte zudem nur eingeschränkt möglich. Die Verwendung von Ultrakurzpulslasern liefert häufig das erwünschte Schnittergebnis, ist aber bei dicken Materialien im Bereich mehrerer Millimeter sehr langsam oder gar nicht mehr anwendbar. Zur Reduzierung der Prozesszeit wird die Eignung von Faserlasern im Multikilowatt-Leistungsbereich untersucht.

### Vorgehensweise

Damit der thermische Einfluss gering gehalten wird, wird der Laserstrahl eines Faserlasers (bis max. 4 kW Laserleistung) mit hoher Geschwindigkeit (3 - 5 m/s) über das zu bearbeitende Werkstück geführt. Genutzt wurden hierfür Galvanometer-scanner bei ortsfestem Werkstück und ein 2D-Handlingsystem mit Festoptik bei bewegtem Werkstück. Als Bearbeitungsstrategie finden Mehrfachüberfahrten bei Nachführung der Fokusslage und unter Variation des Spurversatzes Anwendung.

- 1 Aus einem geschichteten Graphitkörper ausgearbeitete zylindrische Probe (Dicke 4 mm).
- 2 Laserstrahlgeschnittener »schwarzer Diamant« (Ø ~ 6 mm).

### Ergebnis

Minimale Materialschädigung und hochwertige Schnittkanten werden durch kurze Wechselwirkungszeiten erreicht. So konnten 4 mm dicke zylindrische Probenkörper aus Graphit mit einer effektiven Geschwindigkeit von 15 mm/s aus einem geschichteten Graphitkörper ohne Abplatzungen extrem materialschonend in Form geschnitten werden. Zusätzlich wurden die Probenoberflächen mit dem gleichen Lasersystem egalisiert. Ähnlich gute Ergebnisse wurden bei der Bearbeitung von »schwarzen Diamanten« erzielt.

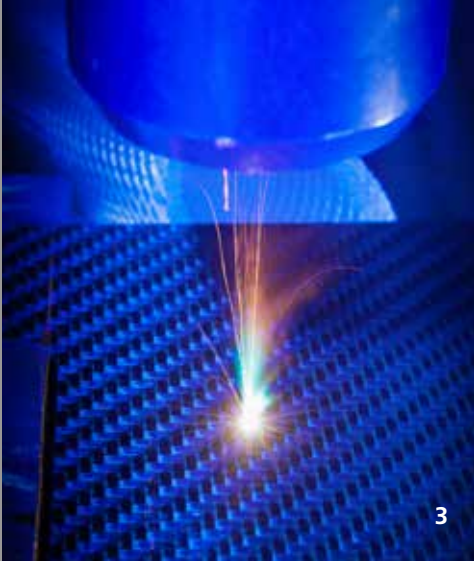
### Anwendungsfelder

Neben reinem Kohlenstoff ist der flexible Laserprozess auch auf andere schwer zu bearbeitende, hartspröde Werkstoffe, wie etwa CMC (Ceramic Matrix Composites), übertragbar.

### Ansprechpartner

Dennis Arntz M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8389  
dennis.arntz@ilt.rwth-aachen.de

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



## LASERSCHNEIDEN VON CFK

### Aufgabenstellung

Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK), deren Einsatz aufgrund des großen Leichtbaupotenzials immer größere Verbreitung findet, erzeugen bei der mechanischen Bearbeitung durch Fräsen oder Bohren einen hohen Werkzeugverschleiß, der mit berührungslosem Laserschneiden vermieden wird.

Die Ausbildung der Schnittfuge erfolgt zur Reduzierung des thermischen Einflusses scannend mit einem schichtweisen Abtrag. Mit zunehmender Materialdicke stellen sich gerade bei Verwendung sehr gut fokussierbarer Single-Mode-Laser Schachtverhältnisse ein, mit denen u. a. durch das Abtragverhalten und Abschattung kein effektiver Abtrag am Fugengrund erfolgt, sondern ein größerer Teil der Laserleistung lediglich zur Aufheizung führt und somit die wärmebeeinflusste Zone (WEZ) vergrößert. Zudem wird die Abfuhr des Materials aus dem Fugengrund durch die Schnittflanken mit steigendem Schachtverhältnis immer mehr behindert.

### Vorgehensweise

Durch zueinander versetzte Abtragspuren lässt sich die Fugenbreite vergrößern und damit die Zugänglichkeit für die Laserstrahlung und die Abfuhr der Emissionsprodukte verbessern. Spurversatz, Anzahl und Reihenfolge der Scans über die einzelnen Spuren sowie die Verteilung möglicher Abkühlphasen werden dazu für die Bearbeitung mit unterschiedlichen Strahlkaustiken variiert.

Ein Grenzfall dieser Bearbeitungsstrategien ist der Vorschnitt mit Parametern, die auf Effizienz optimiert sind, und eine finale Besäumschnittspur auf der vorgeschrittenen Kante, die auf minimale WEZ optimierte Parameter nutzt.

### Ergebnis

Mit den untersuchten Abtragvarianten lässt sich die WEZ deutlich, in einigen Fällen um bis zu 50 Prozent, reduzieren bzw. die bearbeitbare Schnitttiefe ohne Steigerung der WEZ steigern. Die Anzahl der erforderlichen Scans für einen Schnitt wird bei größeren Materialdicken gegenüber der Bearbeitung mit einzelnen Spuren reduziert, weil mit größerer Schnitttiefe die Abtragrate erhalten bleibt.

### Anwendungsfelder

Besäumen von CFK-Bauteilen oder Schneiden von Löchern sind Prozessschritte, die in allen CFK-verarbeitenden Bereichen erforderlich sind, insbesondere in der Luftfahrt und Automobilindustrie. Die hier vorgestellten Verfahrensvarianten erweitern das bearbeitbare Dickenspektrum, führen aber auch bei CFK-Bauteilen mit Materialdicken ab ca. 2 - 3 mm zu Verbesserungen der Schnittqualität.

### 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

3 Schneidprozess von CFK.

4 CFK-Schnittkante, 8 mm Materialdicke.





## DISPERSIONSFREIE, KONTINUIERLICHE AUFWEITUNG VON HOCHLEISTUNGSLASERSTRAHLUNG

### Aufgabenstellung

Viele Lasermaterialbearbeitungsverfahren erfordern die variable Anpassung des von der Laserstrahlquelle emittierten Rohstrahls zur Adaption des Fokus auf die Werkstückoberfläche. Aufgrund der thermischen Linsenwirkung von Halbleitermaterialien (z. B. ZnSe) bei der Verwendung von CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung ist die Verwendung von auf Transmission basierenden optischen Konzepten für Applikationen mit hoher Prozesssensitivität gegenüber thermo-optischen Effekten nicht zielführend. Spiegelbasierende Konzepte ermöglichen eine effektivere Ableitung anfallender Wärmelasten und darüber hinaus eine wellenlängenunabhängige Strahlformung. Die Rekonfiguration des gefalteten Strahlengangs ist herausfordernd für das Optikdesign sowie für die Automatisierung.

### Vorgehensweise

Für die Verwendung von Hochleistungslaserstrahlung ( $P > 6 \text{ kW}$ ) soll ein spiegelbasiertes Zoom-Teleskop realisiert werden, welches eine kontinuierliche, variable Aufweitung eines kollimierten Laserstrahls um den Faktor 2,2 ermöglicht. Eine wesentliche Herausforderung stellt die gemeinsame optische Achse dar, unter der der Strahl aus dem optischen System ein- und austreten soll.

### Ergebnis

Es wird ein vollautomatisiertes, spiegelbasiertes Zoom-Teleskop realisiert. Der Strahlengang weist drei asphärische sowie zwei Planspiegel auf, die mittels drei Linearachsen verschoben werden. Die wesentlichen Spezifikationen sind:

- Beugungsbegrenztes Design für 10,6  $\mu\text{m}$  sowie für 1064 nm
- Zulässige Laserleistung:  $P_{\text{cw}} = 30 \text{ kW}$
- Variable Aufweitung: 0,9 - 2,2

### Anwendungsfelder

Die Anwendungsfelder des spiegelbasierten Zoom-Teleskops sind vielfältig. Neben dem Einsatz von Hochleistungs-CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung ist das Konzept insbesondere für Anwendungen relevant, welche eine große Sensitivität gegenüber der thermisch induzierten Fokusverschiebung aufweisen.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Oliver Pütsch M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-617  
oliver.puetsch@ilt.fraunhofer.de

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

1 Vollautomatisiertes Hochleistungs-Zoom-Teleskop.



---

## TECHNOLOGIEFELD MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK

---

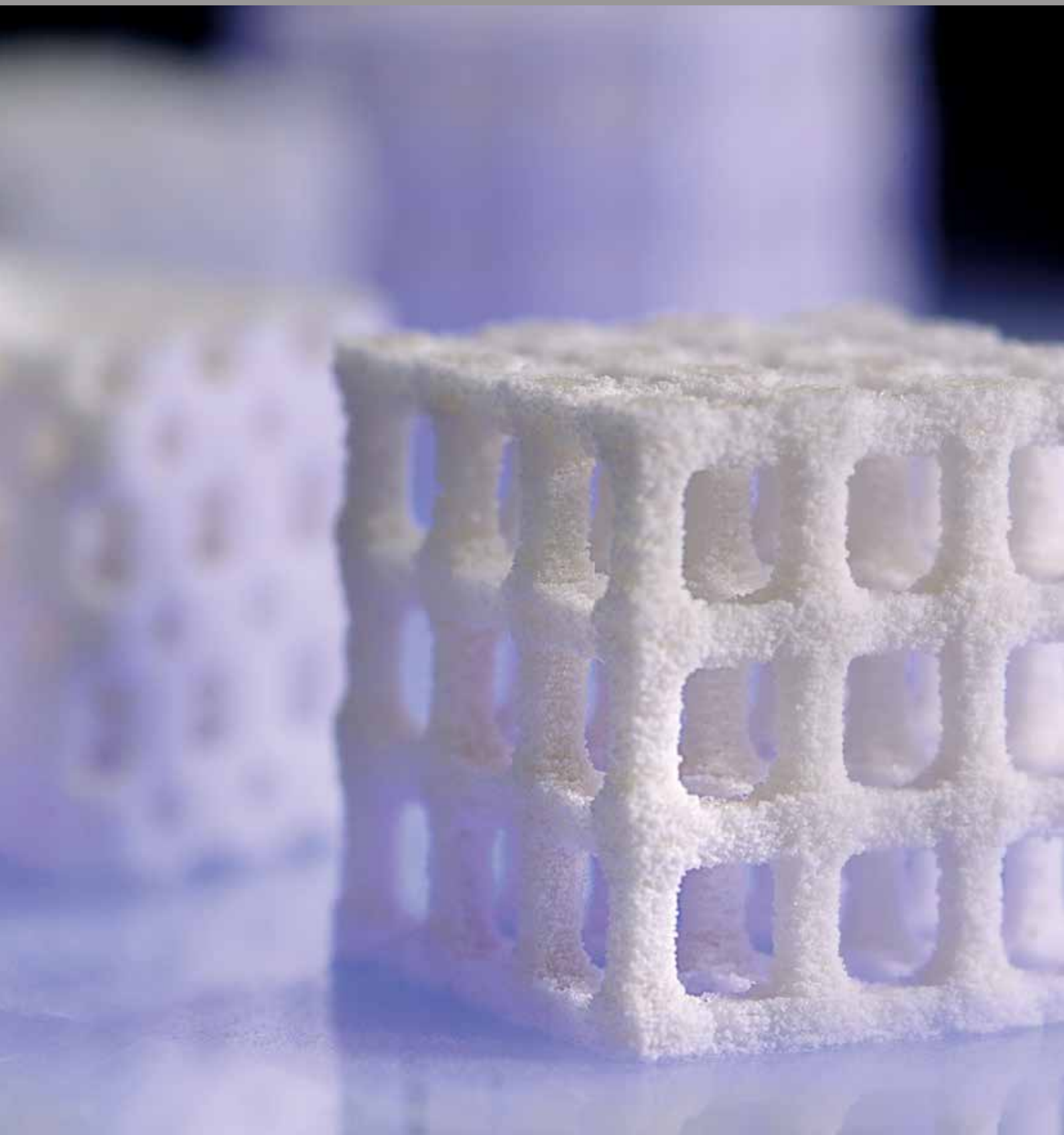
Gemeinsam mit Partnern aus den Life Sciences erschließt das Technologiefeld Medizintechnik und Biophotonik neue Einsatzgebiete des Lasers in Therapie und Diagnostik sowie in Mikroskopie und Analytik. Mit dem Selective Laser Melting Verfahren werden generativ patientenindividuelle Implantate auf der Basis von Computertomografie-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 photo-chemischen Oberflächenmodifikation leistet das Technologiefeld einen Beitrag zur Generierung biofunktionaler Oberflächen.

FORSCHUNGSERGEBNISSE 2015

# MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK



---

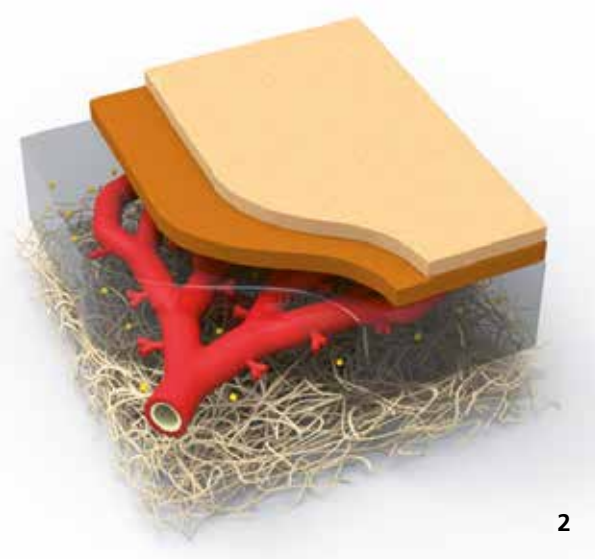
## INHALT

---

ArtiVasc 3D – Künstliche Blutgefäße im 3D-Druck	130
Additivfreie Thiol-En Polymerharze für den 3D-Druck	131
Selective Laser Melting von polymerbasierten bioresorbierbaren Implantaten	132
Selective Laser Melting von Magnesiumlegierungen	133
Aufbau von Mikrostrukturen aus einem NiTi-Werkstoff mittels $\mu$ SLM	134
Laserbasiertes Verfahren zur Beschichtung von Zahnoberflächen für die Kariesprävention	135
In-Vitro-Diagnostikum für partikelbasierte Multiplextests	136



1



2

## ARTIVASC 3D – KÜNSTLICHE BLUTGEFÄSSE IM 3D-DRUCK

### Aufgabenstellung

Künstliche Organe aus lebenden Zellen sind nur dann langfristig funktionsfähig, wenn diese mit Blutgefäßen versehen sind, die für eine Nährstoffversorgung und einen Abtransport von Stoffwechselprodukten sorgen. Die Herstellung solcher verzweigter Blutgefäße aus makroskopischen Gefäßen und Mikrokapillaren für die Generierung einer künstlichen dreilagigen Haut im Rahmen des EU-Projekts »ArtiVasc 3D« war daher eine wesentliche Fragestellung im Projekt.

### Vorgehensweise

In einem Konsortium aus 16 Partnern aus Forschung, Industrie und Klinik wurde ein Konzept erarbeitet, welches den dreilagigen Aufbau aus Unterhautfettgewebe, Dermis und Epidermis vorsieht. Die Isolation der gewebespezifischen Zellen sowie deren Kultivierung mussten im Rahmen des Projekts etabliert werden. Anschließend sollen innerhalb der Fettschicht künstliche Blutgefäße aus einem 3D-Drucker die umliegenden Zellen mit Nährstoffen versorgen.

### Ergebnis

Im Rahmen des vierjährigen Projekts konnten die Wissenschaftler durch enge Zusammenarbeit Materialien entwickeln, die die Anforderung der Biologie als auch der Prozessierbarkeit im 3D-Druck weitgehend erfüllen. Dadurch liegen heute verzweigte poröse Gefäße vor, die Fettzellen in einer Hydrogelmatrix mit Nährstoffen versorgen können. Ebenso konnte gezeigt werden, dass der dreilagige Aufbau realisiert werden kann und die Zellen sich gewebetypisch verhalten. Dennoch müssen Material und Prozesse zukünftig optimiert werden, um eine möglichst reproduzierbare Prozesskette zum Aufbau künstlicher Haut zu etablieren.

### Anwendungsfelder

Es gibt zwei große Anwendungsgebiete, die zukünftig von dieser Entwicklung profitieren. Das Nahziel adressiert den Aufbau eines Hautmodells als Ersatz für Tierversuche in der pharmakologischen Testung. Das Fernziel ist ein Hautmodell, welches als Implantat zur Versorgung von Patienten eingesetzt werden kann.

Die Arbeiten wurden durch die Europäische Kommission im Rahmen des Projekts »ArtiVasc 3D« unter dem Förderkennzeichen 236416 gefördert.

### Ansprechpartner

Dr. Nadine Nottrodt  
Telefon +49 241 8906-605  
nadine.nottrodt@ilt.fraunhofer.de

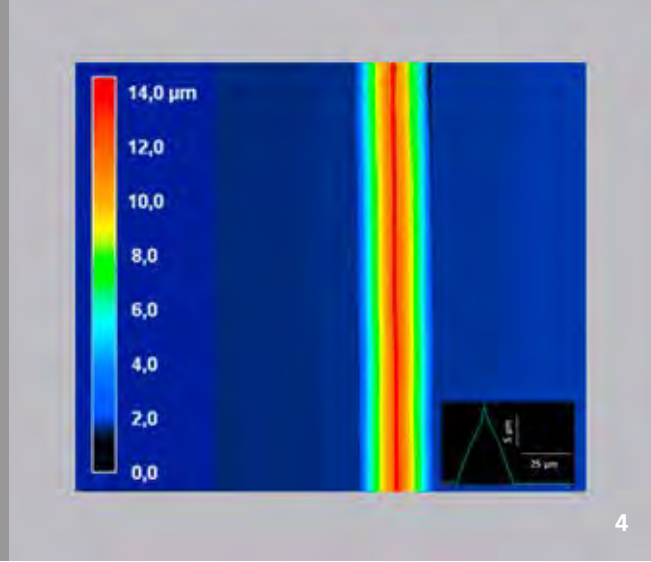
Dr. Arnold Gillner  
Telefon +49 241 8906-148  
arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de

1 Verzweigtes Blutgefäß aus einem 3D-Drucker.

2 Skizze des dreilagigen Hautmodells

(© Universität Loughborough, X.Han, R.J.Bibb).





## ADDITIVFREIE THIOL-EN POLYMERHARZE FÜR DEN 3D-DRUCK

### Aufgabenstellung

Die Stereolithographie ist ein 3D-Druck Verfahren, dessen Einsatzgebiet vom schnellen Prototypenbau bis hin zur Herstellung von funktionalen Endprodukten reicht. Die Produkteigenschaften werden durch das Verfahren, jedoch maßgeblich durch die Zusammensetzung der Photoharze bestimmt. Die photochemische Thiol-En (Poly-) Addition bietet dabei eine Alternative zu den herkömmlich eingesetzten Acrylat und Epoxy Harzen. Nahezu alle herkömmlichen Stereolithographiesysteme nutzen blaues oder nahes UV-Licht (340 - 405 nm) in Kombination mit Photoinitiatoren zum Aushärten der Photoharze. Die Aushärtetiefe (curing depth) wird dabei durch Zugabe von Absorbern realisiert. Die Thiol-En Reaktion ermöglicht eine homogene Polymerisation ohne Additive wie Photoinitiator oder Absorber bei einer Wellenlänge von 266 nm.

### Vorgehensweise

Die Thiol-En Harze werden durch tiefe UV-Laserstrahlung räumlich kontrolliert ausgehärtet, um Schicht für Schicht feste dreidimensionale Objekte aufzubauen. Da die Intrinsische Absorption und Initiierung durch die Monomere selbst ausreichend ist, um Schichten in Größenordnungen von 1 - 100 µm zu realisieren, kann vollständig auf Additive verzichtet werden. Dadurch können transparente Produkte mit hohen Brechungsindizes und zusätzlich verringerter Toxizität verwirklicht werden.

### Ergebnis

Im Projekt »Thiolight« wurde aus trifunktionalen Thiolen und Enen ein hochtransparentes, elastisches Photopolymer entwickelt, welches mit einem 266 nm Laser (cw) erfolgreich zu hochaufgelösten 3D-Objekten im Stereolithographie-Prozess ohne Photoinitiatoren und Absorbern verarbeitet werden kann. Die Prozessgeschwindigkeiten liegen dabei im Bereich vergleichbarer Materialsysteme. Die geringe Sauerstoffinhibierung, weniger Spannung und der verzögerte Gelpunkt sind weitere prozessbedingte Vorteile dieser Harze.

### Anwendungsfelder

Mögliche Applikationen für diese neuartigen Photoharze sind beispielsweise Polymeroptiken, medizintechnische Geräte oder Implantate sowie anderweitige Polymerbauteile mit besonderen Anforderungen an mechanische Eigenschaften, Transparenz oder Toxizität.

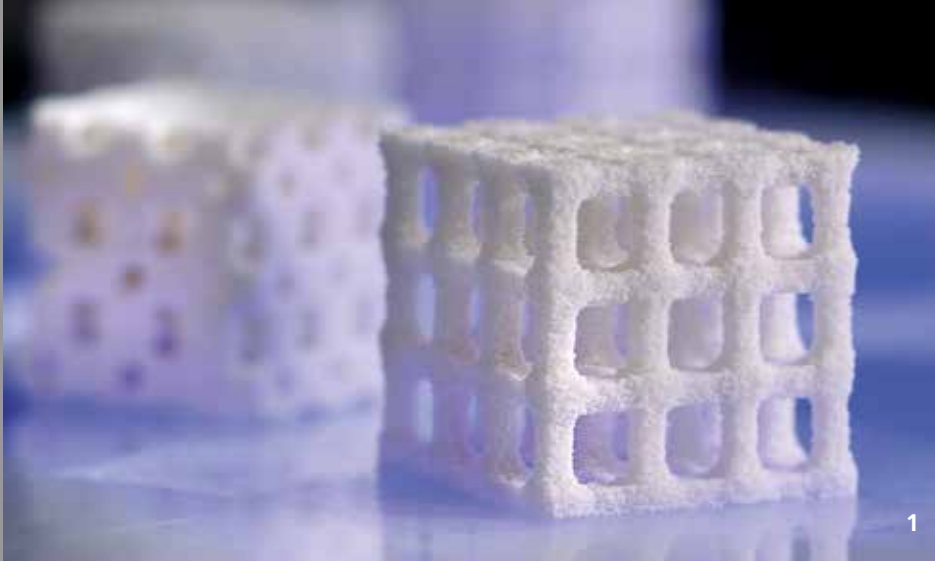
Das Projekt »ThioLight« wird durch die Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen von mittelstandsorientierter Eigenforschung gefördert.

### Ansprechpartner

Dipl.-Chem. Holger Leonards  
Telefon +49 241 8906-601  
holger.leonards@ilt.fraunhofer.de

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

- 3 Stereolithographieaufbau (266 nm) und gedruckte 3D-Struktur.  
4 Linienprofil einer Thiol-En Struktur zur Bestimmung der Aushärtetiefe.



## SELECTIVE LASER MELTING VON POLYMERBASIERTEN BIORESORBIERBAREN IMPLANTATEN

### Aufgabenstellung

Poly(lactid)basierte Kompositwerkstoffe mit  $\beta$ -Tricalciumphosphat ( $\beta$ -TCP) oder Calciumcarbonat als Füllstoff bieten die Möglichkeit, bioresorbierbare Knochenersatzimplantate mit steuerbarer Resorptionskinetik und einstellbaren mechanischen Eigenschaften herzustellen. Bisher mangelt es jedoch an einem formgebenden Fertigungsverfahren, das die Herstellung von patientenindividuellen Implantaten mit interkonnektierender Porenstruktur ermöglicht, um das Einwachsen des Knochens zu optimieren. In Zukunft könnte das Selective Laser Melting (SLM) die Fertigung solcher maßgeschneiderter Implantate ermöglichen. Am Fraunhofer ILT wurde die Verarbeitung eines Kompositwerkstoffs aus Poly(lactid) und  $\beta$ -TCP mit SLM bereits im Labormaßstab realisiert. Im Hinblick auf eine industrielle Umsetzung des Verfahrens sind folgende Schritte notwendig: Scale-up der Werkstoffsynthese, Verwendung von kommerziell verfügbarer Anlagentechnik sowie Verbesserung des Werkstoffs durch Verwendung von pufferfähigem Calciumcarbonat zur Neutralisation der sauren Abbauprodukte des Poly(lactids).

1 Mittels SLM gefertigte Gitterstruktur  
(Strebendicke ca. 1 mm) aus einem Poly(lactid)/  
Calciumcarbonat-Kompositwerkstoff.

### Vorgehensweise

Das SLM-Verfahren wird für einen neuen Kompositwerkstoff aus Poly(lactid) und Calciumcarbonat entwickelt, welcher mithilfe eines skalierbaren und lösungsmittelfreien Trockenmahlprozesses gemäß den Anforderungen der Medizintechnik synthetisiert werden kann. Die SLM-Verfahrensentwicklung erfolgt mit einer EOS Formiga P 110-Anlage, wobei die Verfahrensparameter (z. B. Laserleistung und Scangeschwindigkeit) an den neuen Kompositwerkstoff angepasst werden.

### Ergebnis

Komplexe Geometrien können aus einem Poly(lactid)/ Calciumcarbonat-Kompositwerkstoff unter Verwendung von kommerziell verfügbarer Anlagentechnik hergestellt werden. Im nächsten Schritt soll die biologische sowie mechanische Charakterisierung der hergestellten Geometrien erfolgen.

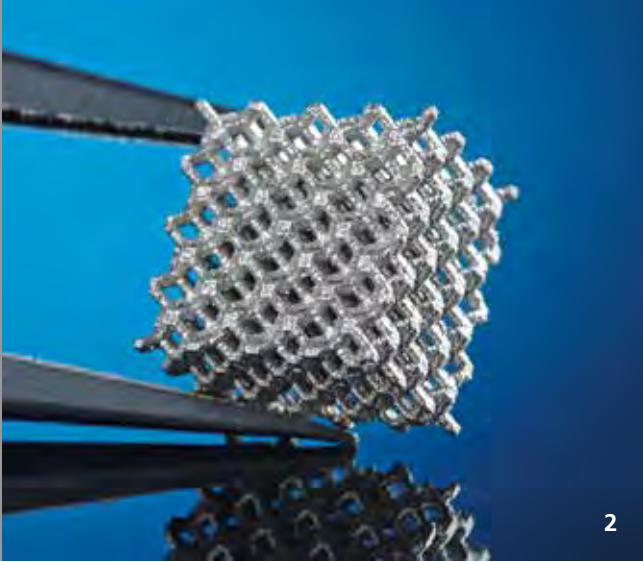
### Anwendungsfelder

Selective Laser Melting kann für die Fertigung von patientenindividuellen bioresorbierbaren Knochenersatzimplantaten genutzt werden, wobei das Hauptanwendungsfeld der Mund-, Kiefer- und Gesichtsbereich ist.

Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag der EOS GmbH, der SCHAEFER KALK GmbH & Co KG sowie der Karl Leibinger Medizintechnik GmbH & Co KG im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts »ActiveBone« durchgeführt.

### Ansprechpartner

Christoph Gayer M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8019  
christoph.gayer@ilt.fraunhofer.de



2



3

## SELECTIVE LASER MELTING VON MAGNESIUMLEGIERUNGEN

### Aufgabenstellung

Magnesiumlegierungen werden heutzutage aufgrund ihrer geringen Dichte vor allem im Leichtbau eingesetzt. Eine neue, innovative Anwendung finden Magnesiumlegierungen in der Medizintechnik. Hier werden resorbierbare Implantate aus Magnesiumlegierungen hergestellt, die sich im Körper auflösen und durch körpereigenen Knochen ersetzt werden. Die Verarbeitung von Magnesiumlegierungen mit additiven Fertigungsverfahren wie Selective Laser Melting (SLM) hätte für beide Anwendungen wesentliche Vorteile. So könnten Bauteile in geringen Stückzahlen (Prototypenbau, Individualimplantate) oder mit einzigartigen Funktionseigenschaften (topologieoptimiert, definiert porös) wirtschaftlich hergestellt werden.

### Vorgehensweise

Eine wesentliche Herausforderung bei der Verarbeitung von Magnesiumlegierungen mittels SLM stellt die starke Rauchentwicklung durch Verdampfung im Prozess aufgrund der kleinen Temperaturdifferenz zwischen Schmelz- und Verdampfungstemperatur dar. Zur effektiven Rauchabfuhr während des Prozesses wird in Kooperation mit der Aconity3D GmbH eine Prozesskammer entwickelt, die eine Anpassung der Schutzgasführung (z. B. Strömungsprofil und Volumenstrom) an Prozess und Werkstoff ermöglicht.

### Ergebnis

Durch Optimierung der Schutzgasführung für die Verarbeitung von Magnesiumlegierungen sowie einer entsprechenden Anpassung der wesentlichen SLM-Verfahrensparameter wie Scangeschwindigkeit, Laserleistung und Belichtungsstrategie können Bauteile aus den Magnesiumlegierungen AZ91 und WE43 mit Bauteildichten größer 99,5 Prozent in einem robusten Prozess hergestellt werden. Die mechanischen Eigenschaften der Bauteile erfüllen dabei die Anforderungen an Gussbauteile gemäß DIN EN 1753. Auch die Herstellung von komplexen Strukturen wie beispielsweise Implantate mit interkonnekter Porenstruktur aus WE43 ist mit Strukturlösungen kleiner 400 µm möglich.

### Anwendungsfelder

SLM von Magnesiumlegierungen kann zum einen im Leichtbau eingesetzt werden. Hier bietet sich die Möglichkeit der Funktionsoptimierung von Bauteilen beinahe ohne Einschränkung im Design. Zum anderen können in der Medizintechnik resorbierbare Implantate hergestellt werden, die an den individuellen Defekt des Patienten angepasst werden können und gleichzeitig eine interkonnektive Porenstruktur zum besseren Einwachsen von neuem Knochengewebe aufweisen.

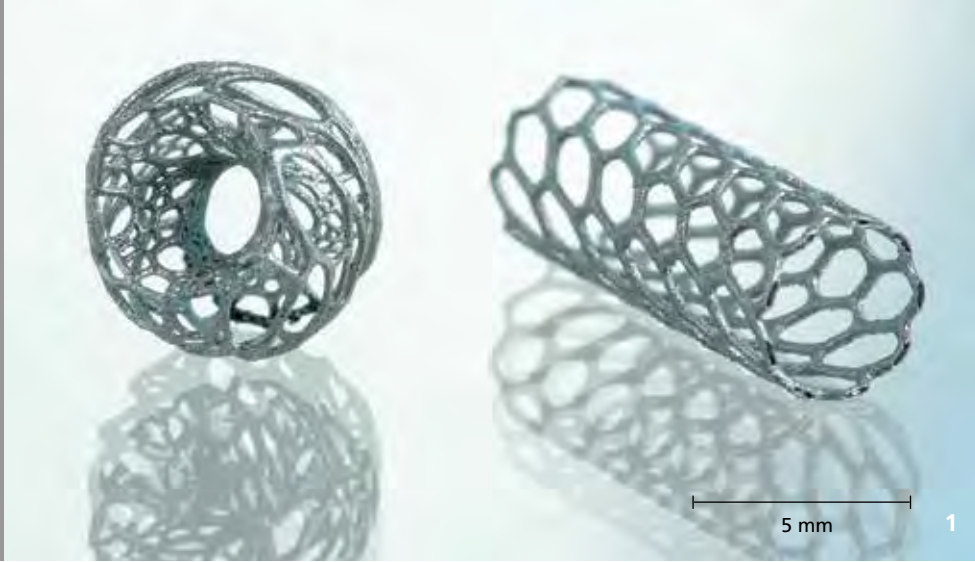
Dieses Projekt wurde finanziell durch die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt.

### Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Lucas Jauer  
 Telefon +49 241 8906-360  
 lucas.jauer@ilt.fraunhofer.de

2 Bioresorbierbarer Scaffold aus WE43.

3 Demonstrator für eine topologieoptimierte Gabelbrücke aus AZ91 (Maßstab 1:4).



## AUFBAU VON MIKROSTRUKTUREN AUS EINEM NiTi-WERKSTOFF MITTELS $\mu$ SLM

### Aufgabenstellung

Mit der Weiterentwicklung des Selective Laser Melting (SLM) zum Mikro-SLM ( $\mu$ SLM) konnten die Oberflächenqualität und die Detailauflösung von kleinen ( $\leq 10$  mm) Funktionsbauteilen signifikant gesteigert werden. Um die Potenziale des  $\mu$ SLM-Verfahrens hinsichtlich der Herstellung von Implantaten und Mikrostrukturen aufzuzeigen, soll eine binäre Legierung aus Nickel und Titan (NiTi) für das  $\mu$ SLM-Verfahren qualifiziert werden. NiTi eignet sich aufgrund des Formgedächtniseffekts und der nachgewiesenen Biokompatibilität für potenzielle Anwendungen aus dem Bereich der Medizintechnik. Die Vorteile des  $\mu$ SLM-Verfahrens sind im Hinblick auf die vergleichsweise aufwendige Verarbeitung des kostenintensiven Materials und der Komplexität der potenziellen Funktionsteile besonders evident.

### Vorgehensweise

Für den Werkstoff NiTi sollen Prozessparameter und Belichtungsstrategien identifiziert werden, mit denen komplexe Strukturen und Funktionsteile in sub-Zentimeter Größe mit einer hohen Detailauflösung und einer gesteigerten Oberflächenqualität hergestellt werden können.

### Ergebnis

Durch eine Anpassung der herkömmlichen SLM-Anlagentechnik und dem Einsatz modulierter Laserstrahlung können nun komplexe Strukturen und funktionsintegrierte Mikro-Bauteile aus einem NiTi Werkstoff gefertigt werden. Hierfür wurde ein Parametersatz aus Scangeschwindigkeit, Laserleistung, Spurabstand, Pulsfrequenz und Pulsweite identifiziert, mit dem es möglich ist, dünnwandige Strukturen mit einer minimalen Breite von  $32 \mu\text{m}$  und einer Oberflächenrauheit von  $R_a = 1,3 \mu\text{m}$  herzustellen.

### Anwendungsfelder

In der Medizintechnik wird NiTi bereits als Werkstoff für endovaskuläre Stents und für Osteosynthese-Implantate genutzt. Das  $\mu$ SLM-Verfahren besitzt das Potenzial, filigrane Implantate individuell und effizient herzustellen.

Neben den Anwendungen aus der Medizintechnik existiert eine Vielzahl von Mikrobauteilen, die sich aufgrund ihrer Komplexität nur mit dem  $\mu$ SLM-Verfahren herstellen lassen.

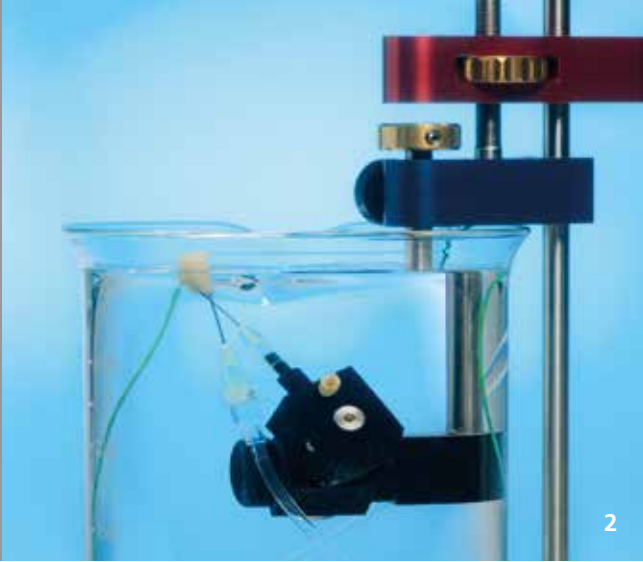
### Ansprechpartner

Lukas Masseling M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-8349  
lukas.masseling@ilt.fraunhofer.de

Dr. Wilhelm Meiners  
Telefon +49 241 8906-301  
wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de

1 Mikrostrukturen aus NiTi (Wandstärke:  $32 \mu\text{m}$ , Oberflächenrauheit:  $R_a = 1,3 \mu\text{m}$ ).





## LASERBASIERTES VERFAHREN ZUR BESCHICHTUNG VON ZAHNOBERFLÄCHEN FÜR DIE KARIESPRÄVENTION

### Aufgabenstellung

Verstärkter Zahnhartsubstanzenverlust durch Kariesbefall oder Erosion aufgrund von säurehaltigen Lebensmitteln ist nach wie vor eines der Haupt-Mundgesundheitsprobleme. Derzeitige Präventivmaßnahmen wie das Versiegeln der gefährdeten Bereiche mit kunststoffbasierten Kompositmaterialien sind in ihrer Haltbarkeit limitiert. Um eine dauerhafte Präventivmaßnahme gegen verstärkten Zahnhartsubstanzenverlust verfügbar zu machen, soll ein auf der Zahnoberfläche in Form einer mikropartikulären Dispersion applizierter Beschichtungswerkstoff mittels Laserstrahlung funktionalisiert werden. Die besondere Herausforderung ergibt sich aus der Differenz der hohen Brenntemperaturen zwischen 700 - 1000 °C der glaskeramischen Materialien und dem darunter liegenden Zahnmaterial, welches bei Temperaturänderungen von 5,5 °C am Gewebe irreversibel geschädigt werden kann.

### Vorgehensweise

Die Zahnhartsubstanzen werden zunächst ohne Beschichtung mit modulierter CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung bearbeitet. Zur Nachbildung der im Mund herrschenden Bedingungen wird dazu in Zusammenarbeit mit der Klinik für Zahnerhaltung der RWTH Aachen University ein Aufbau entwickelt, der den Zahn während der

Laserbearbeitung auf Körpertemperatur erwärmt und den Blutfluss durch den Zahn simuliert. Gleichzeitig werden die Temperaturen sowohl im Zahninneren mittels Thermoelemente als auch auf der Zahnoberfläche mit einer Thermokamera gemessen.

### Ergebnis

Die Untersuchungen zeigen, dass bei Erreichen der für das Aufschmelzen der Glaskeramik notwendigen Temperatur an der Zahnoberfläche bei geeigneter Wahl der Verfahrensparameter die kritische Temperaturdifferenz von 5,5 °C im Zahninneren nicht überschritten wird.

### Anwendungsfelder

Das Anwendungsfeld des Verfahrens zur Funktionalisierung der glaskeramischen Schichten ist die präventive Zahnheilkunde.

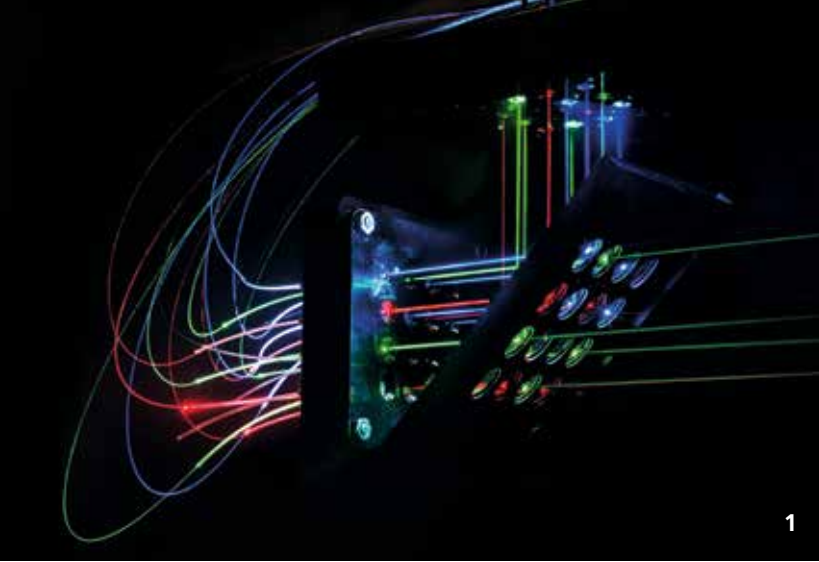
Das diesem Bericht zugrundeliegende FuE-Vorhaben wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter dem Förderkennzeichen GZ PO 591/40-1 gefördert.

### Ansprechpartner

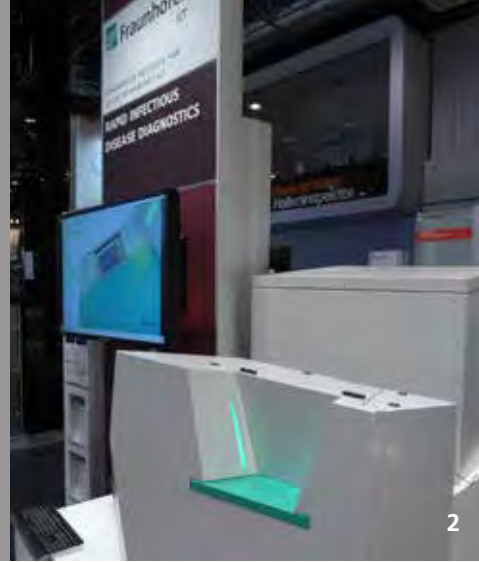
Susanne Wollgarten M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-372  
susanne.wollgarten@ilt.fraunhofer.de

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

*2 Zahn in einem auf Körpertemperatur erwärmten Wasserbad vor der Laserbehandlung.*



1



2

## IN-VITRO-DIAGNOSTIKUM FÜR PARTIKELBASIERTE MULTIPLEXTESTS

### Aufgabenstellung

Bei einem partikelbasierten Multiplextest werden gleichzeitig verschiedene Partikelfractionen eingesetzt, wobei jede Fraktion einen spezifischen Bindungspartner für ein bestimmtes Molekül auf der Oberfläche seiner Partikel immobilisiert hat. Nachzuweisende Analytmoleküle in Lösung werden von ihren Bindungspartnern der korrespondierenden Partikelfraktion spezifisch angebonden. Der optische Nachweis ihrer Bindung erfolgt durch Zugabe eines Sekundärmarkers, der alle partikelgebundenen Analytmolekülfractionen des Multiplextests markiert. In einem Durchflusssystem kann die Bindung der Analytfractionen über die Fluoreszenz des Sekundärmarkers nachgewiesen werden. Die Partikel weisen zudem eine Eigenfluoreszenz auf, die sich spektral von der Fluoreszenz des Sekundärmarkers unterscheidet. Diese Partikelfluoreszenz codiert über die Intensität die jeweilige Partikelfraktion.

### Vorgehensweise

Zum Auslesen solcher partikelbasierten Multiplex-Assays stehen keine standardisierten Diagnosegeräte zur Verfügung, die darüber hinaus in einen automatisierten Prozess integriert werden können. Dies stellt eine starke Limitierung für die Verbreitung partikelbasierter Multiplex-Assays dar, die

im Hinblick auf Empfindlichkeit und Materialeinsatz den herkömmlichen Mikrotiter-basierten Tests überlegen sind. Um diese technologische Lücke zu schließen, wurde am Fraunhofer ILT eine Gerätetechnologie entwickelt, die verschiedene Anregungswellenlängen im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich sowie die dazugehörigen Detektionskanäle zur Verfügung stellt.

### Ergebnis

Die Technologie wurde als kompaktes Tischgerät für die Multiplexdiagnostik umgesetzt und kann in Kombination mit einem fluidischen Durchflusssystem für die Vermessung von partikelbasierten Assays verwendet werden. Das System ist sowohl als Stand-Alone-Lösung als auch als integrierbares Modul für eine vollautomatisierte Probenanalyse einsetzbar.

### Anwendungsfelder

Anwendungsfelder für die entwickelte Gerätetechnik zum Auslesen von partikelbasierten Multiplextests sind die klinische Diagnostik sowie die Lebensmittel- und Umweltdiagnostik.

### 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

1 Faserbasierte Multistrahlanordnung für die Anregung verschiedener Fluoreszenzmarker.

2 Demonstrator für ein In-vitro-Diagnostikum zum Auslesen von partikelbasierten Multiplextests.

---

## TECHNOLOGIEFELD 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.

FORSCHUNGSERGEBNISSE 2015

# LASERMESSTECHNIK UND EUV-TECHNOLOGIE





---

## INHALT

---

Dockingmonitor – Positions- und Geschwindigkeitsüberwachung von Schiffen	140
Inline-Dicken- und Rauheitsmessungen von Papier- und Kartonbahnen mit »bd-2«	141
Gewinnung von Wertstoffen aus Altelektronik	142
Bestimmung des Kalkstandards flüssiger Schlacken mit der Laser-Direktanalyse	143
Verwechslungsprüfung verzunderter Walzblöcke	144
Inline-Partikelanalytik mit dynamischer Lichtstreuung	145
Konsortialstudie: Inline-Prozessanalytik mit Licht – InLight	146
Kompakte Strahlungsquelle im extremen Ultraviolett	147
Laserinduzierte Strahlungsquelle im extremen Ultraviolett	148
Alternative Emitter für effiziente Strahlungsquellen bei 6,7 nm	149
Metrologie zur Charakterisierung von Strahlungsquellen bei einer Wellenlänge um 6,7 nm	150
Charakterisierung von Photoresists im EUV-Strahlungsbereich	151



## DOCKINGMONITOR – POSITIONS- UND GESCHWINDIGKEITSÜBER- WACHUNG VON SCHIFFEN

### Aufgabenstellung

Für die Überwachung des Anlege- und Ladungstransferprozesses von großen Schiffen, insbesondere von Öl- und Gastankern, werden Systeme benötigt, die automatisch Position und Geschwindigkeit, d. h. Drift des Schiffs relativ zur Kaimauer und zu den Entladesystemen, überwachen. Im Gegensatz zu bereits existierenden Produkten wurde ein portables Messsystem entwickelt, das die Notwendigkeit von verteilten Abstandssensoren an Hafenanlagen beseitigt.

### Vorgehensweise

Das Anlege- und Driftüberwachungssystem »DockingMonitor« besteht aus zwei Hauptkomponenten:

- Transversal Movement Monitor (TMM)
- Longitudinal Movement Monitor (LMM)

Das TMM basiert auf einer scannenden Laserentfernungsmessung anhand der Laufzeit und erfasst die transversale Bewegung von Tankern während der Annäherung an die Landungsbrücken. Das LMM nutzt ein innovatives maschinelles Sehen, um die Bewegung von Tankern quer zu den Landungsbrücken während der Be- und Entladephase zu detektieren und die Driftgeschwindigkeiten zu messen. Eine Elektronik wurde für die Steuerung und Integration der beiden Sensorsysteme entworfen und umgesetzt. Ex-geschützte Gehäuse wurden entsprechend den geltenden Vorschriften für Öl- und Gasterminals ausgewählt und dimensioniert.

1 DockingMonitor-Prototyp.

### Ergebnis

Der DockingMonitor-Prototyp ist ein portables System, befestigt auf einem rollbaren Transportwagen für eine schnelle Positionierung parallel zu den Landungsbrückenkanten. Entsprechende Schalter ermöglichen ein leichtes Ein- und Ausschalten der Systeme vor Ort. Das kompakte System benötigt keine verteilten Sensoren und ermöglicht eine präzise Messung der Längsbewegung von Schiffen durch »Feature Tracking«-Algorithmen, eine Funktion, die bei heutigen Systemen nicht verfügbar ist. Zum Projektabschluss wurde das entwickelte System in einer Hafenanlage unter industriellen Bedingungen erprobt und validiert.

### Anwendungsfelder

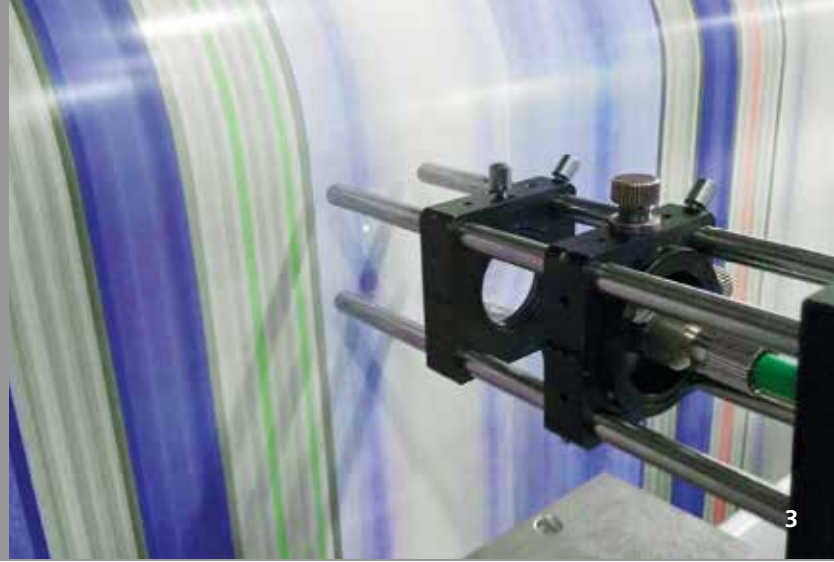
Das portable System eignet sich für eine Vielzahl von unterschiedlichen Hafenanlagen. Neben Öl- und Gasterminals ist ein Einsatz in Containerhäfen als auch in Schüttguthäfen möglich.

Die Arbeiten wurden mit Mitteln des siebten Rahmenprogramms der Europäischen Union unter der Vereinbarung 77045 (DockingMonitor) gefördert im Unterauftrag der Firmen Marimatech AS, Cortem SPA und S&F Systemtechnik GmbH.

### Ansprechpartner

Wolfgang Fiedler M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-390  
wolfgang.fiedler@ilt.fraunhofer.de

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



## INLINE-DICKEN- UND RAUHEITSMESSUNGEN VON PAPIER- UND KARTON- BAHNEN MIT »bd-2«

### Aufgabenstellung

Bei der Herstellung von Papier und Karton ist das Flächengewicht die zentrale Produkteigenschaft. Zu dessen Bestimmung werden radiometrische Sensoren eingesetzt, die berührungsfrei arbeiten, aber ein hohes Maß an Sicherheitsvorkehrungen zum Schutz der Mitarbeiter erfordern. Eine Alternative dazu sind induktive und kapazitive Sensoren, die für den Menschen ungefährlich sind, die aber die zu vermessende Bahnware berühren oder nur durch einen dünnen Luftspalt von der Oberfläche getrennt sind. Gemeinsam ist diesen drei Messverfahren, dass sie die Dicke der Papier- und Kartonbahnen nur indirekt messen und dabei temperatur- und feuchtigkeitsabhängig sind. Diese liefern keine Informationen zur Oberflächenstruktur.

### Vorgehensweise

In der Papier- und Kartonproduktion werden bereits Lasersensoren für verschiedene Zwecke erfolgreich eingesetzt, z. B. zur Bestimmung der Bahngeschwindigkeit oder der Feuchte des Papiers. Dickenmessverfahren wie die Laser-Triangulation erreichen wegen des Speckle-Effekts nur eine unzureichende Messgenauigkeit. Im Rahmen von Studien hat das Fraunhofer ILT erstmals Versuche zur Dickenmessung von Papier- und Kartonbahnen mittels absolut messender Interferometrie durchgeführt. Die am Fraunhofer ILT entwickelten »bd-2«-Sensoren haben kompakte rotationssymmetrische Messköpfe

mit bidirektionaler Strahlführung, d. h. Hin- und Rückstrahl verlaufen entlang derselben Achse. Dies bietet entscheidende Vorteile bei der Integration der Messköpfe in Fertigungsmaschinen oder Prüfvorrichtungen.

### Ergebnis

»bd-2«-Sensoren nutzen eine spektral breite Strahlungsquelle, so dass sie gegen Störungen durch den Speckle-Effekt unempfindlich sind. Dies wurde in Feldversuchen an Papierveredelungsmaschinen bei Bahngeschwindigkeiten von bis zu 100 m/min bestätigt. Die Dicke konnte mit einer Genauigkeit im Mikrometerbereich gemessen werden. In weiteren Versuchen soll nun gezeigt werden, dass die absolut messende interferometrische Sensorik auch bei Bahngeschwindigkeiten von bis zu 2000 m/min zuverlässig funktioniert.

### Anwendungsfelder

Neben dem Flächengewicht ist die Oberflächenstruktur von Papier und Karton für weitere Veredelungsschritte und für den vorgesehenen Gebrauch von großer Bedeutung. Zusätzlich zur Dicke kann mit »bd-2«-Sensoren auch die Rauheit von unbehandeltem, gestrichenem, geprägtem, geglätteten oder satiniertem Papier oder Karton gemessen werden.

### Ansprechpartner

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

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

2 Messkopf mit Lichtwellenleiter,  
L x Ø = 55 mm x 18 mm, m = 40 g.

3 Messkopf bei der Inline-Vermessung  
einer Kartonbahnoberfläche.



1



2

## GEWINNUNG VON WERTSTOFFEN AUS ALTELEKTRONIK

### Aufgabenstellung

Moderne Elektronik enthält eine Vielzahl von Materialien, wie z. B. die sogenannten Technologiemetalle, die in Europa als wertvolle oder kritische Rohstoffe angesehen werden. Am Ende der Nutzungsdauer der Geräte werden diese Rohstoffe mit den gegenwärtigen Recyclingmethoden jedoch nur zum Teil zurückgewonnen.

### Vorgehensweise

Das Fraunhofer ILT koordiniert das europäische Verbundvorhaben »ADIR«, in dem technologische Lösungen erarbeitet werden, um die einzelnen Wertstoffe automatisiert wiederzugewinnen. Hierzu sollen die wertvollen Elektronik Elemente identifiziert und gezielt entnommen werden, um sie in separierten Fraktionen der Wiederverwertung zuzuführen. Beispielhaft werden die Methoden für die Verarbeitung von Mobiltelefonen und von kommerziell genutzten Elektronikplatinen aus der Netzwerktechnik erprobt.

### Ergebnis

Die Lasertechnik spielt eine entscheidende Rolle an mehreren Kernpunkten des Lösungsansatzes. Einerseits wird die Lasermesstechnik zur Identifikation der wertstoffhaltigen Bauelemente benötigt, da im Allgemeinen keine Daten von den Herstellern oder ihren Zulieferern vorliegen. Hierfür werden Methoden zur Materialanalytik, Geometriemessung und Objekterkennung eingesetzt. Andererseits kommt der Laser auch als Werkzeug zum Einsatz, um selektiv wertstoffhaltige Bauelemente oder Baugruppen gezielt zu entnehmen, beispielsweise durch Laserentlöten oder Laserschneiden.

### Anwendungsfelder

Das Projekt »ADIR« zielt zunächst auf die Elektronik aus dem Telekommunikationsbereich. Durch die Bereitstellung einer Technologie zur verbesserten Rückgewinnung der Rohstoffe wird eine ökonomisch und ökologisch attraktive Verwertung der Altelektronik gestärkt. Die Einführung vernetzter und intelligenter Elektronik in immer mehr privaten und wirtschaftlich genutzten Gütern führt zukünftig zu einem breiten Anwendungspotenzial der laserbasierten Rückgewinnung. Die Arbeiten werden im Rahmen des EU-Projekts »ADIR« unter dem Förderkennzeichen 680449 gefördert.

### Ansprechpartner

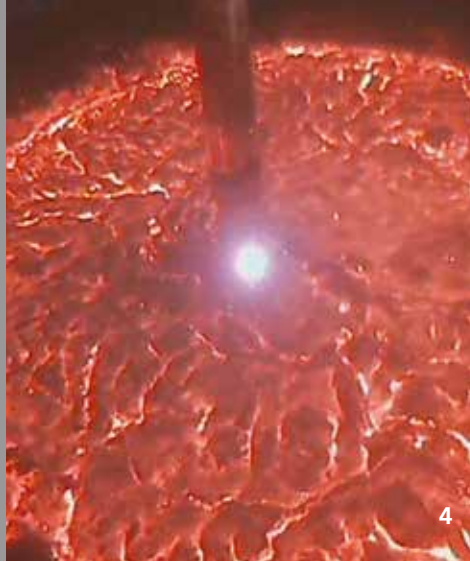
Dr. Cord Fricke-Begemann  
Telefon +49 241 8906-196  
cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de

Priv.-Doz. Dr. Reinhard Noll (Koordinator)  
Telefon +49 241 8906-138  
reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de

1+2 *Elektronik aus defektem*

*Smartphone mit wertvollen Werkstoffen  
zur Wiederverwertung.*





## BESTIMMUNG DES KALK- STANDARDS FLÜSSIGER SCHLACKEN MIT DER LASER-DIREKTANALYSE

### Aufgabenstellung

Die bei der Rohstahlerzeugung anfallenden LD-Schlacken der Firma voestalpine Stahl GmbH in Linz sollen mit der Laser-Direktanalyse (LIBS) im Kübel von Schlacketransportern analysiert werden, um den Kalkstandard zu bestimmen. Die Schlacken im Kübel sind flüssig oder an der Oberfläche teilweise erstarrt bei Temperaturen im Bereich von 600 °C bis über 1300 °C. Die Messung dient der Klassifizierung der Schlacken für deren gezielte Verwertung. Die Lasermesseinrichtung war für einen automatisierten Betrieb im 24/7-Einsatz zu konzipieren, zu erstellen und in Betrieb zu nehmen.

### Vorgehensweise

Die grundsätzliche Eignung und die erzielbaren Analyseigenschaften bei den gegebenen Randbedingungen wurden in Voruntersuchungen gezeigt und die Verfahrensparameter wurden bestimmt. Großes Augenmerk musste bei der Verfahrensentwicklung sowie bei der Auslegung und Auswahl der Komponenten auf die Anforderungen des Dauerbetriebs, der großen Messabstände sowie der Hitze- und Staubeinwirkung gelegt werden. Die Abstimmung der Schnittstellen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber.

### Ergebnis

Die Messung erfolgt nach dem Start durch den Fahrer des Schlacketransporters automatisch. Dabei passt sich die LIBS-Messeinrichtung variierenden Füllhöhen der Schlackekübel an. Zur Mittelung wird die Messung entlang einer Linie auf der Schlackeoberfläche durchgeführt und dabei die Höhenvariation des Oberflächenprofils berücksichtigt. Die Dauer der Analyse von der Freigabe bis zur Übertragung zum Leitsystem beträgt weniger als 2 Minuten. Die Messeinrichtung läuft im 24/7-Einsatz und bisher wurden insgesamt über 12.000 Messungen in der Entwicklungs- und Betriebsphase durchgeführt.

### Anwendungsfelder

Die erarbeiteten Methoden und Vorrichtungen sind für die automatisierte Analyse mineralischer Stoffe im Produktionsprozess unter schwierigsten Randbedingungen geeignet. Damit können im Produktionsablauf anfallende Stoffe frühzeitig klassifiziert und einer gezielten Verwertung zugeführt werden.

### Ansprechpartner

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

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

- 3 *Transporter mit Schlackekübel unter dem Messportal.*  
4 *Schlackeoberfläche und Laser-Direktanalyse.*



## VERWECHSLUNGSPRÜFUNG VERZUNDERTER WALZBLÖCKE

### Aufgabenstellung

Auch bei weitgehend automatisierten Produktionsabläufen ist stets ein Risiko von Materialverwechslungen gegeben. So werden beim Walzen von Stahlblöcken mehrere Hundert unterschiedliche Güten verarbeitet, deren Einschleusung am Anfang der Walzstraße meist manuell gesteuert wird, sodass Verwechslungen nicht vollständig auszuschließen sind. Diese können erhebliche wirtschaftliche Schäden zur Folge haben, angefangen bei Schäden an der Fertigungslinie bis hin zu Folgeschäden bei Anwendern. Um solche Verwechslungen vor der Verarbeitung zu erkennen, soll eine Prüfung aller eingesetzten Blöcke hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung durchgeführt werden.

### Vorgehensweise

Die Laser-Emissionsspektroskopie (LIBS) zur quantitativen Analyse von Metallen und zur Verwechslungsprüfung von Halbzeugen hat sich auch unter industriellen Einsatzbedingungen bewährt. Die Herausforderungen in diesem Vorhaben liegen in der Vielzahl der Materialien und der Primärzunderschicht der Stranggussblöcke, die eine nicht repräsentative Oberflächenschicht aufweisen. Mit einer auf Abtrag optimierten Laserpulsfolge kann jedoch das zu analysierende Grundmaterial lokal freigelegt und in einem weiteren Schritt – ebenfalls per Laser – direkt in der Produktionslinie chemisch analysiert werden. Ein Funktionsmuster wird aufgebaut zur semiautomatischen Messung von Walzblöcken auf einem Rollgang.

*1 Walzblock auf dem Rollgang  
während der Lasermessung.*

### Ergebnis

In Produktionsumgebung wird mit dem Funktionsmuster eine Prüfdauer von unter 50 s erreicht. An mehreren Hundert niedrig- und hochlegierten Walzblöcken werden die gemessenen Gehalte von über 14 Elementen mit den Sollgehalten verglichen und eine gute Übereinstimmung konnte gezeigt werden. Die Wechsel bei den Güten werden erkannt und insbesondere kritische Verwechslungen können mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden. Verbesserungen zum Nachweis weiterer Elemente sind in Planung.

### Anwendungsfelder

Der primäre Einsatzbereich ist die Analyse verzunderter Metallblöcke sowie weiterer verzunderter Zwischenprodukte in der Metallverarbeitung. Ein weiteres Anwendungsfeld der Kombination aus Abtrag und Analyse ist die Messung von Tiefenprofilen bis in eine Tiefe von mehreren Millimetern.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des EFRE-Programms für Nordrhein-Westfalen im Ziel »Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung« 2007-2013 unter dem Förderkennzeichen 300113002 gefördert und mit Mitteln der Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt.

### Ansprechpartner

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

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



2



3

## INLINE-PARTIKELANALYTIK MIT DYNAMISCHER LICHT- STREUUNG

### Aufgabenstellung

In vielen chemischen Prozessen spielen Partikelgrößen im Bereich weniger Nanometer bis zu einigen Mikrometern eine entscheidende Rolle und beeinflussen Produkteigenschaften maßgeblich. Optische Verfahren für die Partikelanalytik in diesem Größenbereich – wie die dynamische Lichtstreuung (DLS) – sind jedoch in der Regel Offline-Verfahren, so dass ein direktes Monitoring von Produktionsprozessen wie beispielsweise Polymerisationsreaktionen oder Mahl- und Dispergiervorgänge nicht möglich ist.

### Vorgehensweise

Die dynamische Lichtstreuung beruht auf einer optischen Messung der Eigenbewegung von Partikeln in Flüssigkeiten (Brownsche Molekularbewegung). Durch Konvektionsbewegungen in einem aktiv durchmischten Reaktor werden diese Eigenbewegungen der Partikel überlagert, so dass DLS-Messungen in einer solchen Umgebung nicht einsetzbar sind. Eine faseroptische Rückstreusonde wurde mit einem neuartigen Messkopf ausgestattet, der eine »in situ-Probenahme« ermöglicht und ein kleines Probenvolumen mit Hilfe eines drehbaren Flügelrads von der umgebenen Flüssigkeit abtrennt. Dadurch wird ein Inline-Monitoring der Partikelgröße auch in aktiv durchmischten Flüssigkeiten möglich.

### Ergebnis

Der neuartige Messkopf wurde in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen University (Sonderforschungsbereich 985 – Funktionale Mikrogele) entwickelt und aufgebaut. Vergleichsmessungen zwischen einer Offline-Messung nach Probenahme und einer Inline-Messung in einem stark gerührten Becherglas zeigen die Funktionsfähigkeit des neuartigen Messkopfs.

### Anwendungsfelder

Anwendungsfelder der Inline-DLS-Messtechnik finden sich in allen Prozessen, in denen Partikelgrößen zwischen wenigen Nanometern und einigen Mikrometern inline in einem Prozess überwacht und ohne Probenahme gemessen werden müssen. Beispiele sind die Überwachung chemischer Polymerisationsreaktionen, die Herstellung von Farben und Lacken, Prozesse in der Lebensmittelindustrie (Milch und Milchprodukte) sowie verschiedene Mahl- und Dispergierprozesse.

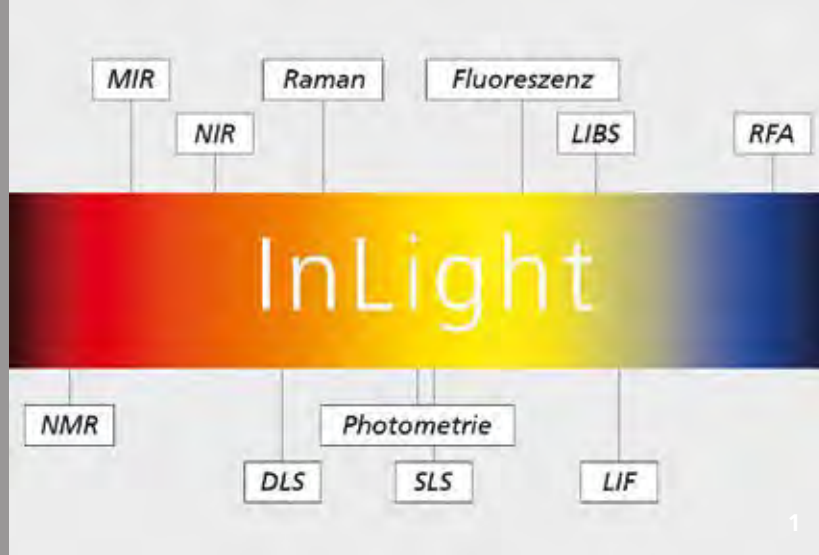
### Ansprechpartner

Dr. Christoph Janzen  
Telefon +49 241 8906-8003  
christoph.janzen@ilt.fraunhofer.de

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

2 Messkopf für Inline-DLS-Messungen.

3 Konstruktionszeichnung des Messkopfs.



## KONSORTIALSTUDIE: INLINE-PROZESSANALYTIK MIT LICHT – INLIGHT

### Aufgabenstellung

Chemische und physikalische Messgrößen in einem Prozess direkt zu messen, ohne eine Probe zu entnehmen, das ist die Domäne der Inline-Prozessanalytik mit Licht. Gerätehersteller und Anwender von optischer Prozessanalytik stehen vor der Aufgabe, den wachsenden Anforderungen in diesem Aufgabenfeld mit innovativen Lösungsansätzen und technologischen Neuentwicklungen zu begegnen, um ihre Marktposition zu stärken und eine Vorreiterrolle einzunehmen. Das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik führt zusammen mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der RWTH Aachen University gemeinsam mit Partnern aus der Industrie eine Konsortialstudie durch, in der eine Technologie-Roadmap zur zukünftigen Entwicklung der optischen Prozessanalytik erarbeitet wird. Diese Studie soll als Leitfaden zur Ausrichtung künftiger FuE-Vorhaben sowie verfahrens-, technologie- und produktorientierter Entwicklungsaufgaben dienen.

### Vorgehensweise

In einer Serie von Treffen und Workshops innerhalb eines Jahres werden die Forschungsinstitute sowie die teilnehmenden Unternehmen die Grundlagen für die Technologie-Roadmap erarbeiten. Die Unternehmen definieren die inhaltlichen Schwerpunkte der Studie, die Forschungsinstitute analysieren die technologischen Entwicklungen und Zukunftspotenziale der optischen Prozessanalytik und erstellen die Technologie-Roadmap.

1 *Methodenspektrum  
der optischen Prozessanalytik.*

### Ergebnis

Anhand von vier verschiedenen Querschnittsthemen (Methoden und Prozesse, Auswerteverfahren, Komponenten sowie Modellierung und Integration) werden unterschiedliche Aspekte der optischen Prozessanalytik untersucht. Die künftige Marktentwicklung wird in die Analyse des Themenfelds mit einbezogen. Darüber hinaus bildet sich ein Netzwerk aus Forschungsinstituten, Anbietern und Anwendern von Prozessanalytik, das in konkrete Verbundforschungsprojekte münden soll.

### Anwendungsfelder

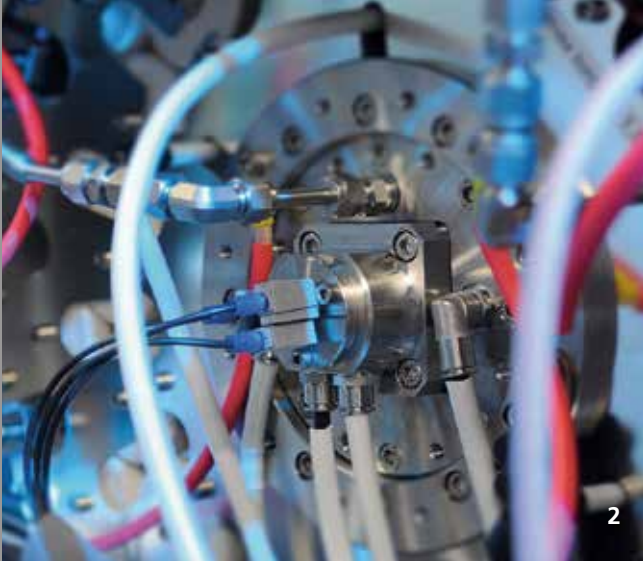
Die Anwendungsfelder der optischen Prozessanalytik sind vielfältig und reichen von der Überwachung chemischer Prozesse über die Qualitätssicherung bis hin zur Umweltanalytik. Die in der Studie angesprochenen Anwendungsfelder werden von den Studienteilnehmern definiert.

### Ansprechpartner

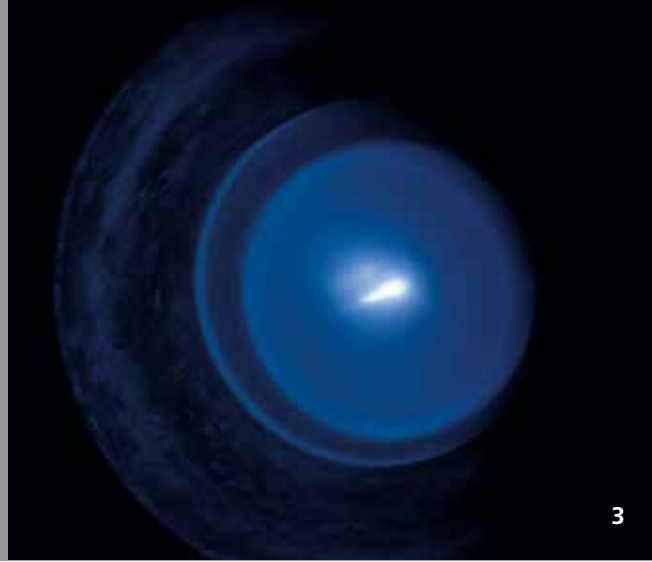
Priv.-Doz. Dr. Reinhard Noll (Leiter der Konsortialstudie)  
Telefon +49 241 8906-138  
reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de

Dr. Christoph Janzen  
Telefon +49 241 8906-8003  
christoph.janzen@ilt.fraunhofer.de





2



3

## KOMPAKTE STRAHLUNGS- QUELLE IM EXTREMEN ULTRAVIOLETT

### Aufgabenstellung

Entladungsbasierte Strahlungsquellen im extremen Ultraviolett, vornehmlich bei einer für die künftige Chipproduktion interessanten Wellenlänge von 13,5 nm, stellen eine kostengünstige und benutzerfreundliche Lösung dar. Bei solchen Quellen wird ein dichtes und heißes Plasma durch eine gepulste Entladung elektrisch gespeicherter Energie erzeugt. Am Fraunhofer ILT werden diese Quellen entwickelt und in kommerzielle Anwendungen überführt. Um diese Quellen für den Nutzer attraktiver zu machen und auch um weitere Anwendungsfelder zu erschließen, wurde ein Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten auf die Steigerung des Wartungsintervalls gelegt.

### Vorgehensweise

Die Arbeiten zielen sowohl auf die Reduktion der durch das Plasma unvermeidlichen Erosion der Elektroden aufgrund von Sputtern durch Verwendung anderer Elektrodenmaterialien als auch auf die Erschließung von Betriebsparametern, die den Betrieb der Quelle toleranter gegen die geometrischen Änderungen der Elektroden machen. Dies konnte insbesondere durch eine neue elektrische Schaltung zur Zündung des Plasmas erreicht werden. Dabei wurde nicht nur der Betrieb der Quelle mit Elektroden demonstriert, die ansonsten schon hätten ausgetauscht werden müssen, vielmehr konnte auch eine Steigerung der Effizienz für die Umwandlung elektrischer Energie in EUV-Strahlung durch den Zugang zu einem größeren Betriebsparameterfeld erreicht werden.

### Ergebnis

Mit den gefundenen Lösungen wird eine Steigerung des Wartungsintervalls um mindestens einen Faktor 5 möglich, was einem Dauerbetrieb von etwa einer Woche (24/7) entspricht.

### Anwendungsfelder

Die Strahlungsquelle ist für verschiedene Anwendungen im Umfeld der Halbleiterlithographie wie zum Beispiel die Charakterisierung von Optiken, Kontaminationsstudien oder die Entwicklung neuer Fotolacke geeignet.

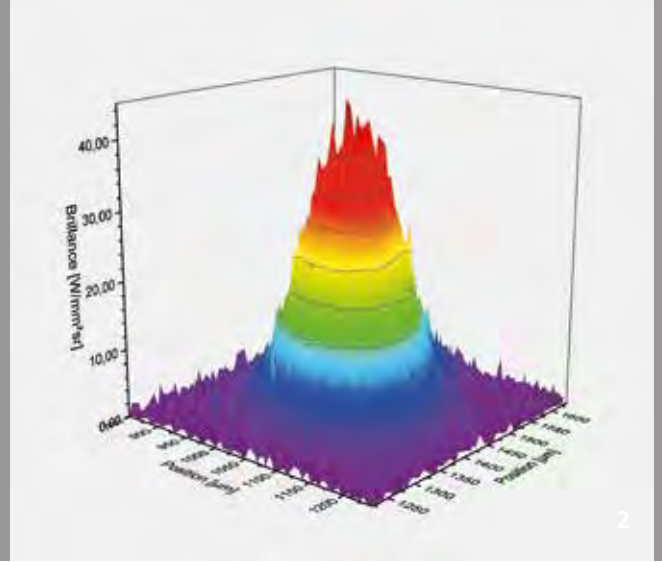
Das diesem Bericht zugrunde liegende FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen KF2118109NT4 durchgeführt.

### Ansprechpartner

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

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

- 2 Rückseite des Elektrodensystems der EUV-Strahlungsquelle.  
3 Off-Axis-Abbildung des Plasmas im koaxialen Elektrodensystem.



## LASERINDUZIerte STRAHLUNGSQUELLE IM EXTREMEN ULTRAVIOLETT

### Aufgabenstellung

Laserinduzierte Plasmen gelten als hoch brillante Strahlungsquellen im Spektralbereich des extremen Ultraviolett und des weichen Röntgenbereichs. Eine wesentliche technologische Hürde stellt dabei die Bereitstellung eines effizienten Targets dar. Das Targetmaterial, welches durch einen Laserpuls zur Emission von für das Material charakteristischer Strahlung angeregt wird, soll möglichst in einem regenerativen Targetkonzept bereitgestellt werden. Für Strahlungsquellen bei einer für die Halbleiterproduktion interessanten Wellenlänge von 13,5 nm ist heute die Injektion von Zinn-Tröpfchen in eine Vakuumkammer eine verbreitete Methode. Dieser Ansatz ist allerdings mit einem erheblichen technologischen Aufwand verbunden, insbesondere im Hinblick auf die Lebensdauer der Injektionsdüse und die Stabilität des Tröpfchenstrahls.

### Vorgehensweise

Ein alternatives Targetkonzept stellt ein mit flüssigem Zinn benetztes rotierendes Rad dar. Dabei wird mit einem Laser auf der sich ständig regenerierenden Oberfläche ein intensiv bei 13,5 nm emittierendes Zinn-Plasma erzeugt. Dieses Konzept wurde bereits erfolgreich für ein entladungs-basiertes Elektrodensystem, dem lasergezündeten Vakuumfunken, von der Firma Ushio demonstriert. Der thermische Haushalt des Rads erlaubt dabei den elektrischen Leistungseintrag von mehreren zehn Kilowatt.

### Ergebnis

In einem ersten Experiment wurde die Tauglichkeit dieses Konzepts mit einem gepulsten Multi-Kilohertz-Laser demonstriert. Ohne weitere Optimierung des Systems konnte eine Effizienz für die Emission bei 13,5 nm von mehr als 2 Prozent ( $2\pi\text{sr}$  2% b.w.) für die eingekoppelte Laserleistung erreicht werden. Die dabei nachgewiesene Brillanz beträgt etwa  $40 \text{ W/mm}^2\text{sr}$ , was bereits für die kommerzielle Nutzung bei der Maskeninspektion ausreichend wäre.

### Anwendungsfelder

Das wichtigste Anwendungsfeld dieser hochbrillanten Strahlungsquelle im extremen Ultraviolett ist die Halbleiterlithographie, bevorzugt zum Beispiel für die Inspektion von Masken.

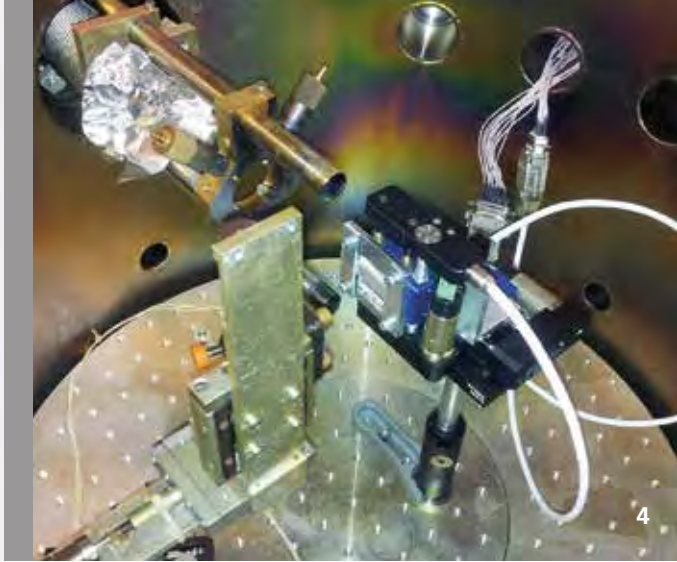
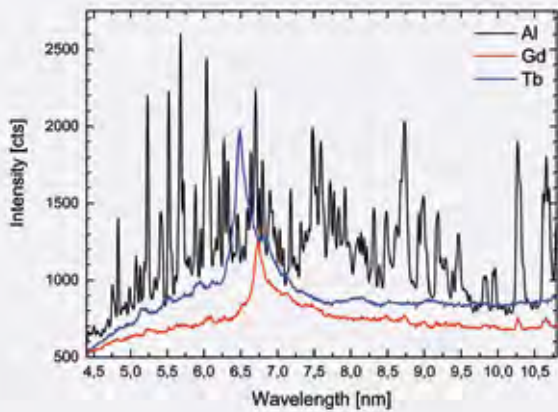
Diese Arbeit wurde in Kooperation mit der Firma Ushio/BLV Licht- und Vakuumtechnik durchgeführt.

### Ansprechpartner

Alexander von Wezyk M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-376  
alexander.von.wezyk@ilt.fraunhofer.de

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

- 1 Mit Zinn benetztes Rad als Target für laserinduzierte Plasmen.
- 2 Gemessenes Strahlprofil bei einer Wellenlänge von 13,5 nm.



## ALTERNATIVE EMITTER FÜR EFFIZIENTE STRAHLUNGSQUELLEN BEI 6,7 NM

### Aufgabenstellung

Dichte, heiße Plasmen werden als Strahlungsquellen für die nächste Generation der Lithographie bei 6,7 nm sowohl als Metrologie- als auch als Produktionsquelle diskutiert. Die favorisierten Targetmaterialien sind derzeit Gadolinium (Gd) oder Terbium (Tb), die als isoelektronische Fortsetzung von Zinn, als intensiver Emitter bei 13,5 nm, vergleichbare Emissionscharakteristiken mit einer Vielzahl von Emissionslinien aufweisen. Beide Elemente müssten in einer kommerziell nutzbaren Strahlungsquelle als regenerative Targets im flüssigen Aggregatzustand eingesetzt werden. Dabei können sich der hohe Schmelzpunkt und die damit einhergehende Problematik der Handhabbarkeit dieser Elemente in flüssiger Form als technologisch und wirtschaftlich ungeeignet herausstellen.

Als Alternative werden in diesem Vorhaben die Elemente Aluminium (Al) und Magnesium (Mg) untersucht. Diese Elemente weisen intensive Linienübergänge in dem interessierenden Spektralbereich auf und sind aufgrund ihres niedrigeren Schmelzpunktes attraktiv.

### Vorgehensweise

Die Emission laserproduzierter Plasmen (LPP) von Al und Mg wird mit Gd und Tb quantitativ verglichen. Weiterhin werden Überlegungen zu niedrigschmelzenden Gd/Tb-haltigen Legierungen angestellt, um ein alternatives regeneratives Target zu erhalten.

### Ergebnis

In ersten Experimenten wurde Strahlung bei 6,7 nm mit Al und Mg als Emitter nachgewiesen, wobei die Emission im direkten Vergleich mit Gd und Tb für die gleichen Versuchsparameter in der gleichen Größenordnung liegt. Eine Studie zu niedrigschmelzenden Legierungen ergab vielversprechende Systeme mit Schmelzpunkten unter 500 °C auf Basis von Al oder Mg.

### Anwendungsfelder

Die Strahlungsquellen auf Basis der niedrigschmelzenden Mg- oder Al-Legierungen sind insbesondere für künftige Metrologiequellen bei 6,7 nm interessant.

Dieses Projekt wird intern durch die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt. Die Arbeiten zur LPP-Emission werden in Kooperation mit der Arbeitsgruppe X-Optics der Fachhochschule Koblenz durchgeführt.

### Ansprechpartner

Alexander von Wezyk M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-376  
alexander.von.wezyk@ilt.fraunhofer.de

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

3 Al-, Gd- und Tb-LPP-Spektren  
und Reflexionskurve 6,x Spiegel.

4 Vakuumkammer mit Probenhalter.



## METROLOGIE ZUR CHARAKTERISIERUNG VON STRAHLUNGSQUELLEN BEI EINER WELLENLÄNGE UM 6,7 NM

### Aufgabenstellung

Für die Produktion zukünftiger Halbleiterbauelemente wird die Lithographie bei einer Arbeitswellenlänge zwischen 6 und 7 nm ( $6, \times$  nm) diskutiert. Sowohl für die Produktion der Chips als auch für die begleitende Metrologie dieser Technologie eignen sich heiße Plasmen als Strahlungsquellen. Für die Charakterisierung dieser Quellen ist eine Messtechnik sowohl für den absoluten Photonenfluss als auch für die räumliche Ausdehnung der Quellen erforderlich. Insbesondere für laserinduzierte Plasmen stellt die Bestimmung der Größe mit einer Auflösung von wenigen Mikrometern bei der Zentralwellenlänge eine Herausforderung dar.

### Vorgehensweise

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Optik und Feinmechanik IOF in Jena wurden verschiedene abbildende Systeme auf Basis von Lanthan-Borkarbid basierten Vielschichtspiegeln konzipiert und realisiert. Als Detektoren können sowohl empfindliche CCD-Kameras als auch Fluoreszenzschirme eingesetzt werden. Bei der Konstruktion wurde insbesondere auf die Tauglichkeit für den täglichen Einsatz im Labor Wert gelegt, d. h. eine akzeptable Länge des Aufbaus bei großem Arbeitsabstand zum Plasma und hinreichender Vergrößerung.

1 Hochauflösende Kamera für eine Zentralwellenlänge von 6,7 nm.

### Ergebnis

Zwei Systeme werden mit jeweils einer Vergrößerung von ca.  $M = 3$  und  $M = 9$  realisiert, mit denen eine Ortsauflösung im Bereich weniger Mikrometer erreicht werden kann. Das  $M = 3$ -System besteht aus einem ebenen und einem sphärischen Spiegel, das  $M = 9$ -System besteht aus zwei sphärischen Spiegeln in einer Schwarzschild-Objektiv-Anordnung, um bei möglichst hoher Vergrößerung eine kleine Gesamtlänge von ca. 1,5 m bei einem Abstand zum Plasma von etwa 40 cm gewährleisten zu können.

### Anwendungsfelder

Die Kameras können nicht nur im Umfeld der  $6, \times$  nm Lithographie sondern allgemein zur räumlichen Charakterisierung von Strahlungsquellen eingesetzt werden. Die Anpassung auf andere Wellenlängen erfolgt jeweils durch den Austausch der Vielschichtspiegel mit entsprechend angepasstem Schichtsystem.

Dieses Projekt wird intern durch die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt.

### Ansprechpartner

Alexander von Wezyk M.Sc.  
Telefon +49 241 8906-376  
alexander.von.wezyk@ilt.fraunhofer.de

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





## CHARAKTERISIERUNG VON PHOTORESISTS IM EUV-STRAHLUNGSBEREICH

### Aufgabenstellung

In lithographischen Herstellungsverfahren von z. B. Mikrochips werden zunächst Photolacke (engl.: Resists) mittels lithographischer Verfahren strukturiert. Erst darauf folgend werden die darin hergestellten Strukturen in das eigentliche (darunterliegende, teilweise maskierte) Zielmaterial mittels Ätzverfahren übertragen. Der Charakterisierung dieser Photoresists kommt daher eine besondere Bedeutung zu, da diese es ermöglichen müssen, die Intensitätsverteilung mit gegebenem Intensitätskontrast auflösen zu können. Um eine Fertigung innerhalb gegebener Prozesstoleranzen (Zeit, Genauigkeit) zu ermöglichen, müssen die Empfindlichkeit und der Kontrast des Photoresists bei benötigter Auflösung ausreichend hoch sein.

### Vorgehensweise

An der EUV-Laborbelichtungsanlage EUV-LET (Laboratory Exposure Tool) werden mittels extrem ultravioletter Strahlung Resists flächig belichtet (EUV, hier in einem Wellenlängenbereich von 10 nm bis 17 nm). Im realisierten Aufbau kann so eine Dosis von bis zu 1 mJ/cm<sup>2</sup> innerhalb einer Sekunde in den Resist eingebracht werden. Typische Belichtungszeiten für die verwendeten Photolacke liegen daher bei wenigen Minuten. Die eingebrachte Dosis wird zur Ermittlung der Kontrastkurven schrittweise erhöht, sodass nach nasschemischer Entwicklung des Photolacks eine Kontrastkurve aus dem Belichtungsergebnis extrahiert werden kann, die auch Auskunft über

die Empfindlichkeit des Resists bei jeweiliger Entwicklungsprozedur gibt. Des Weiteren verfügt das EUV-LET über ein Quadrupol Massenspektrometer, das es ermöglicht, das Ausgasverhalten des jeweiligen Resists vor und während der Belichtung zu beobachten, um eine mögliche Kontamination von Optiken zu vermeiden.

### Ergebnis

Mit der entwickelten Messmethode können verschiedenste Photoresists im EUV-Strahlungsbereich hinsichtlich Kontrast, Sensitivität und Ausgasverhalten charakterisiert werden.

### Anwendungsfelder

Sowohl Firmen im Bereich der Resistentwicklung als auch Forschungseinrichtungen haben nun die Möglichkeit, mittels eines kompakten Laboraufbaus neuartige Photoresists in-house zu charakterisieren. Ebenfalls können alternative Entwicklerflüssigkeiten und Entwicklungsprozeduren hinsichtlich ihres Potenzials zur Erhöhung des Kontrasts bewertet werden.

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Sascha Brose  
Telefon +49 241 8906-525  
sascha.brose@ilt.fraunhofer.de

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

2 *Belichtungsergebnis.*

3 *Belichtungsstation EUV-LET.*

# PATENTE

## Patenterteilungen Deutschland

**DE 10 2014 002 298**  
Vorrichtung zur potential-  
getrennten Übertragung  
von Steuersignalen  
für einen kaskadierten  
Hochspannungsschalter

**DE 10 2014 000 330**  
Verfahren zur Überwachung  
und Regelung der Fokusslage  
eines Bearbeitungslaserstrahls  
beim Laserschneiden

**DE 10 2014 200 633**  
Bearbeitungsvorrichtung  
und -verfahren zur Laserbear-  
beitung einer Oberfläche

**DE 10 2010 026 107**  
Vorrichtung und Verfahren  
zum prozessgasbegleiteten  
Bearbeiten von Werkstücken  
mit energetischer Strahlung

**DE 50 2011 007 944.3**  
Vorrichtung und Verfahren  
zur schichtweisen Herstellung  
von 3D-Strukturen sowie  
deren Verwendung

**DE 10 2011 012 592**  
Verfahren und Vorrichtung  
zum automatisierten  
Identifizieren, Abtrennen,  
Vereinzeln und Sortieren von  
Komponenten elektronischer  
Baugruppen und Geräte

**DE 10 2011 100 456**  
EHLA Extremes Hochge-  
schwindigkeitslaserauftrags-  
schweißen

**DE 10 2013 015 429**  
Verfahren zum Schneiden  
von Materialien

## Patenterteilungen Europa

**EP 2 621 713 B1**  
Vorrichtung und Verfahren  
zur schichtweisen Herstellung  
von 3D-Strukturen sowie  
deren Verwendung

**EP 2 414 127**  
Verfahren zum Schweißen  
einer Vertiefung eines  
Bauteiles durch außerhalb  
oder um die Kontur  
angelegte Schweißbahnen;  
entsprechender Bauteil

**EP 2 280 801**  
Verfahren und Vorrichtung  
zum Schweißen von Werk-  
stücken aus hochwarmfesten  
Superlegierungen

## Patenterteilungen USA

**US 8,988,766 B2**  
Optical resonator with  
direct geometric access to  
the optical axis

**US 9,002,683 B2**  
Method for determining  
the cut quality of laser cutting  
process using a simulation  
program

**US 9,035,217**  
Method for machining  
material using laser radiation  
and apparatus for carrying  
out the method

**Patenterteilungen  
China**

**102006965**

Bauteil mit Schweißnaht und Verfahren zur Herstellung einer Schweißnaht

**ZL201080045589.7**

Ceramic or glass-ceramic article and methods for producing such article

**102039494B**

Verfahren und Vorrichtung zum Schweißen von Werkstücken aus hochwarmfesten Superlegierungen

**Patenterteilungen  
Japan**

**5797887**

Verfahren und Vorrichtung zum Schweißen von Werkstücken aus hochwarmfesten Superlegierungen

**Patentanmeldungen  
Deutschland**

**10 2015 200 795.2**

Anordnung zur Bestrahlung einer Objektfläche mit mehreren Teilstrahlen ultrakurz gepulster Laserstrahlung

**10 2015 201 140.2**

Bearbeitungskopf für die Materialbearbeitung

**10 2015 201 268.9**

Verfahren zur Defektinspektion an Multilayer-Spiegelschichten für EUV- oder weiche Röntgenstrahlung

**10 2015 202 470.9**

Verfahren und Vorrichtung zur hochgenauen optischen Messung an Objekten mit anhaftenden fluidischen Schichten

**10 2015 208 181.8**

Anordnung und Verfahren für winkelaufgelöste Reflektometrie insbesondere im extremen ultravioletten Spektralbereich

**10 2015 210 361.7**

Flächendetektor für EUV- und/oder weiche Röntgenstrahlung

**10 2015 213 898.4**

Verfahren zum Fügen mikrooptischer Komponenten mit Laserstrahlung

**10 2015 213 897.6**

Anordnung und Verfahren zur zeichnungsfreien zweidimensionalen Ablenkung von räumlich ausgedehnten Intensitätsverteilungen

**10 2015 010 369.5**

Schädigungsfreies Abtragen von sprödharten Werkstoffen (Bohrstop-elliptisch)

**10 2015 215 559.5**

Verfahren zur hochauflösenden Abbildung eines Oberflächenbereiches bei streifendem Einfall der Messstrahlung

**10 2015 009 622.2**

Schädigungsfreies Abtragen von sprödharten Werkstoffen (Bohrstop-taper)

**10 2015 218 459.5**

Verfahren und Anordnung zur Ansteuerung einer Laserdiode oder einer Anordnung von Laserdioden

**10 2015 014 060.4**

Verfahren zum Fügen von zwei Bauteilen im Bereich einer Fügezone mittels mindestens einem Laserstrahl sowie Verfahren zum Erzeugen einer durchgehenden Füge-naht (LIMBO)

**10 2015 225 300.7**

Verringerung der Grenzflächenadhäsion bei der Photopolymerisation

**10 2015 224 534.9**

Verfahren zur Erzeugung von extremer Ultraviolett- und/oder weicher Röntgenstrahlung

## PATENTE

## VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE

### Patentanmeldungen Europa

**PCT/EP2015/054716**

Laserauftragschweißen von hochwarmfesten Superlegierungen mittels oszillierender Strahlführung

**PCT/EP2015/057955**

Verfahren zur Laserbearbeitung einer Oberfläche

**PCT/EP2015/059825**

Anordnung und Verfahren zum Laserstrahl-Auftragschweißen

**PCT/EP2015/060484**

Verfahren und Anordnung zur spektralen Verbreiterung von Laserpulsen für die nichtlineare Pulskompression

**PCT/EP2015/066047**

Verfahren und Anordnung zur generativen Fertigung von Bauteilen

**PCT/EP2015/067360**

Anordnung und Abtastung einer Oberfläche mit mehreren Laserstrahlen und Verfahren zum Betrieb der Anordnung

**PCT/EP2015/072697**

Aufbaustrategie für einen Kronenboden einer Turbinenschaufel und Turbinenschaufel

**PCT/EP2015/076263**

Verfahren und Vorrichtung zum Sortieren von Mikropartikeln in einem Fluidstrom

**PCT/EP2015/050489**

Bearbeitungsvorrichtung und -verfahren zur Laserbearbeitung einer Oberfläche

### Patentanmeldungen China

**201480030334.1**

Verfahren zum Abtragen von sprödhartem Material mittels Laserstrahlung, Brechung Eintrittskante

**201480030330.3**

Verfahren zum Abtragen von sprödhartem Material mittels Laserstrahlung, Weichzeichnung

### Veröffentlichungen und Vorträge

Eine Liste der wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Vorträge des Fraunhofer ILT im Jahr 2015 finden Sie auf unseren Internetseiten unter:  
[www.ilt.fraunhofer.de/de/mediathek.html](http://www.ilt.fraunhofer.de/de/mediathek.html)



# DISSERTATIONEN

# BACHELORARBEITEN

## Dissertationen

**16.1.2015 – Sebastian Engler**

Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoffen mit brillanten Strahlquellen im infraroten und grünen Wellenlängenbereich

**15.4.2015 – Stephan Eifel**

Effizienz- und Qualitätssteigerung bei der Lasermikrobearbeitung mit UKP-Lasern durch neue optische Systemtechnik

**13.5.2015 – Joachim Ryll**

Technologieentwicklung zum Wendelschneiden von Edelstahl mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

**22.5.2015 – Sörn Ocylok**

Herstellung und Eigenschaften nanopartikulär verstärkter Beschichtungen durch Laserauftragsschweißen zum Verschleißschutz von Schmiedegesenken

**7.9.2015 – Melanie**

**Meixner**  
Laserfunktionalisierung von nasschemisch applizierten piezoelektrischen Blei-Zirkonat-Titanat-Schichten

**9.10.2015 – Simon Merkt**

Qualifizierung von generativ gefertigten Gitterstrukturen für maßgeschneiderte Bauteilfunktionen

**30.10.2015 – Markus Brunk**

Charakterisierung und Kompensation geometrischer Einflüsse auf die Laser-Emissionsspektroskopie bei der Inline-Werkstoffanalyse

**8.12.2015 – Wolfgang**

**Thiele**

Laserauftragsschweißen mit der Aluminiumlegierung AlSi10Mg

**22.12.2015 – Toufik**

**Al Khawli**

A metamodeling approach towards virtual production intelligence

## Bachelorarbeiten

**Balli, Reha Andre**

Untersuchung des Zusammenhangs von Schnittqualität und Schmelzfilmdynamik an der Schneidfront beim Laserstrahlschneiden mit Faserlasern unter Einsatz elliptischer Strahlformung

**Barthels, Thilo**

Auslegung und Erprobung eines Strahlrotationsprinzips basierend auf einem Schmidt-Pechan-Prisma

**Bartsch, Christian**

Spektrale Prozessbeobachtung beim selektiven Laserschmelzen von Inconel 718

**Behnke, Lars Peter**

Analyse feldwinkelabhängiger Deformationen ultrakurzer Laserpulse für die Materialbearbeitung

**Bertholdt, Daniel**

Machbarkeitsuntersuchung zum Laserbeschichten von Stahl mit gradierten Schichten aus Stahl/Wolfram und zum Beschichten mit Wolfram

**Bogner, Jan Pascal**

Laserbasierte Herstellung von Silberleiterbahnen aus nanopartikulären Dispersionen

**Burgfeld, Robert**

Verfahrensentwicklung für SLM mit Multi-Diodenlaser-Array

**Dunker, Thomas**

Selektives Abtragen von SiN auf ITO beschichteten Glassubstraten mit Hochleistungs-Kurzpulslasern

**Esser, Alexander**

SLM von PLA-basierten Kompositwerkstoffen zur Herstellung bioresorbierbarer Implantate

**Flaig, Roman**

Untersuchung der Eignung gepulst modulierter Laserstrahlung zur Verkleinerung der Oberflächenrauheit von SLM-Bauteilen

**Geus, Jan Fabian**

Toleranzanalyse eines optisch parametrischen Oszillators für satellitengestützte Methanmessungen

**Gropp, Benedikt**

Untersuchung des Einkoppelgrades beim Laserstrahlmikroschweißen von Aluminium unter Verwendung von örtlicher Leistungsmodulation

**Ibach, Alexander**

Modellbasierte Untersuchung der Korrelation zwischen Charakteristiken laserbasierter Kurzzeittemperaturbehandlungen und der Rissentstehung in Floatglas

**Kaden, Nicolaj**

Experimentelle Qualifizierung eines Lichtleitkabels mit Top-Hat-Kupplung zum Laserpolieren von Metallen

**Kappner, Kai Tobias**

Theoretische und konstruktive Auslegung einer rotierenden Dove-Hülse unter Verwendung von Tellerfedern

**Keusgen, Alexander**

Qualifizierung des hochwarmfesten Stahls 1.4313 für die kommerzielle SLM-Anlage Concept M1 cusing

**Kosugi, Takeshi**

Aufbau, Inbetriebnahme und Charakterisierung eines aktiven optischen Systems für die 3D-Laserumschmelzstrukturierung

**Mayer, Marimel**

Aufbau und Charakterisierung miniaturisierter elektro-mechanischer Scannerspiegel

**Mengel, Alexander**

Selective Laser Melting vorgesinterter metallischer Werkstoffe

**Meyer, Alexander Albert**

Planung und Auswertung von statistischen Versuchsplänen zur Erstellung von Prozesslandkarten bezüglich Geometrietreue und Oberflächenrauheit bei der Kurzpuls-Laserablation

**Miaskowski, Clemens**

Fertigung eines Brenner-elementes einer stationären Gasturbine aus Inconel 625 mittels SLM

**Mösbauer, Pascal**

Verfahrenstechnische Grundlagen für das Bohren von CFK-Preforms mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

**Pascher, Benjamin**

Machbarkeitsuntersuchung zur Verarbeitung einer spröden Eisenbasislegierung mittels Selective Laser Melting

**Pastors, Felix Johannes**

Untersuchung des Einflusses von Anlagenparametern auf die Bauteilqualität beim SLM von Inconel 718

**Poppe, Marcus-Thomas**

Einfluss der Finite Elemente Netzstruktur auf thermo-optische Simulationen

**Schmitz, Peter**

Reduktion von Wasserstoffporosität in AlSi10Mg

**Schneider, Tobias**

Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit beim Feinstabtrag zur Formkorrektur von Quarzglas mittels CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung

**Schürmann, Alexander**

Einfluss der örtlichen Leistungsmodulation auf Nahtoberflächenrauheit und Einschweißtiefe beim Laserstrahlmikroschweißen

**Schulz, Martin**

Schweißen mittels Laser Impact Welding

**Scholz, Patrick**

Auswahl und Erprobung eines Abstandsmesssystems für das Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen

**Streit, Felix**

SLM von FeAl und Fe-Al-Ti-B

**Thümler, Malte**

Untersuchung des Einflusses von Selective Laser Erosionen auf die Oberflächenrauheit von SLM-Bauteilen

# MASTERARBEITEN

## **Ambrosius, Manuel**

Einfluss des Laserstrahldurchmessers und der Leistungsdichteverteilung auf die mechanischen Eigenschaften beim Werkstoff Inconel 718

## **Bahrenberg, Lukas**

Dark-field reflection microscopy at short wavelengths

## **Bindel, Kai Fabian**

Laserbasierte Herstellung piezoelektrischer Schichten aus partikulären Materialien

## **Brenner, Andreas**

Optimierung laserstrukturierter Elektroden resistiver Partikelsensoren auf keramischer Basis

## **Burkhardt, Irmela**

Laserbasierte Kunststoff-Metall-Hybridverbindungen durch Metall-Mikrostrukturierung mittels UKP-Laserstrahlung

## **Deelmann, Martin**

Aufbau und Inbetriebnahme einer Ringstrahloptik für das Laserschweißen absorberfreier Thermoplaste

## **Deuter, Valerie**

Untersuchungen des Einflusses von verschiedenen Temperatur-Zeit-Verläufen auf das Benetzungs- und Adhäsionsverhalten von partikulären Polymerschichten auf Metalloberflächen

## **Dietz, Thomas**

Untersuchung von INNOSLAB-Pulsverstärkern mit resonant-gepumpten Erbium-dotierten Granatkristallen

## **Doshi, Hemang**

AlSi10-Mg-interlayers for processing laser metal deposition of AlSi10Mg on die cast aluminium and steel

## **Drosner, Peter-Andrej**

Kombinationsprozess aus Laserstrahlschneiden und Laserwärmebehandlung von Bauteilen pressgehärteter Stähle

## **Duffner, Felix**

Lokales Schutzgasführungssystem für ein neuartiges SLM-Belichtungskonzept

## **Eiselt, Patrick**

Untersuchung von Ho:YLF als Lasermedium in Laseroszillatoren im Energiespeicherebetrieb

## **Ermakova, Galina**

Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters zur Herstellung von dichten und oberflächenoptimierten Bauteilen aus CuCr1Zr mittels SLM

## **Feicks, Simon**

Einfluss der Bauteilgeometrie auf die SLM Gefügestruktur am Beispiel von TiAl6V4

## **Fernandes, Jason**

Development of a new Material Model for Simulation of Laser Cutting of CFRP

## **Haasler, Dennis**

Darstellung der Schutzgasströmung in einer SLM Maschine mittels PIV

## **Haschke, Felix**

Untersuchung verschiedener Strukturierungsstrategien bei der laserbasierten Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybriden

## **Helm, Johanna**

Untersuchung des Anbindungsvorganges beim Lasermikroschweißen von Metallisierungen mittels örtlicher Leistungsmodulation

## **Herzig, Tobias**

Design und Charakterisierung eines mehrkanaligen faserbasierten Fluoreszenzensors zur Detektion von Pathogenen in mikrofluidischen Systemen

## **Heußen, Daniel**

Generative Serienfertigung mittels SLM – Potentiale und Voraussetzungen einer frühzeitigen Integration in den Produktentstehungsprozess

## **Hermesen, Leonhard**

Untersuchung der Verarbeitbarkeit des Einsatzstahls 16MnCr5 und des Vergütungsstahls 42CrMo4 mittels Selective Laser Melting (SLM)

## **Hilmes, Tobias**

Trennen und Strukturieren von Optohalbleitern mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

## **Holub, Hans-Lukas**

Grundlagenuntersuchungen zu neuartiger SLM-Prozessführung mittels Multi-Diodenlaser-Array

**Ibrom, Markus**

Thermographie zur Prozessüberwachung beim SLM

**Inacker, Patrick**

Investigation of the effects of system noise on the performance of the first OPA stage of the HERACLES laser system

**Ingenhag, Christian**

Untersuchung zur Vergrößerung der Auflösung beim SLE von Glas

**Jaberi, Parisa**

Experimental and theoretical investigations of thermally induced optical effects in Selective Laser Melting

**Jeitner, Carolin**

Interferometrische Untersuchung der Dampfkapillardynamik beim Laserstrahlschweißen mit zeitlicher Leistungsmodulation

**Khavkin, Evgeniy**

Untersuchungen zur generativen Fertigung unter Nutzung der Verfahren SLM und LMD mit der Nickelbasislegierung IN718

**Klein, Sarah**

Laser-Multiplexer mit integrierter Frequenzstabilisierung

**Klerks, Tobias Peter**

**Johannes**  
Lasermikrobearbeitung mit diffraktiv geformten Intensitätsverteilungen durch Verwendung von elektronisch ansteuerbaren Phasenmodulatoren

**Krebs, Vitali**

Laserschweißen absorberfreier Thermoplaste mithilfe dynamischer Strahlüberlagerung

**Kroll, Philipp**

Generative Fertigung eines pylon bracket aus IN 718 mittels High Power SLM

**Li, Yue**

Untersuchung zum Laserdurchstrahlschweißen absorberfreier Kunststoffe mithilfe von Ultrakurzpulslasern

**Lumberg, Dirk**

Justagevorrichtung für Hochleistungsdiodenlaser

**Maurath, Manuel**

Untersuchungen zur generativen Fertigung von IN718 auf einkristallinen Substraten

**Mersch, Jonas**

Untersuchung des Ressourcenverbrauchs für verschiedene SLM-Prozessführungen bei der Fertigung eines Leitschaukelcluster

**Pelzer, Martin**

Parameteroptimierung und Untersuchung verschiedener Bestrahlungsstrategien für das laserbasierte Fügen von Aluminiumprofilen mit FVK

**Pichler, Tobias**

Generative Serienfertigung mittels Selective laser melting SLM

**Schmadtke, Johannes**

Technische und wirtschaftliche Analysen von Prozessketten zur generativen Fertigung eines Brennelementes mittels SLM

**Schmitt, Christoph**

Untersuchungen zur Schutzgasführung beim SLM der Magnesiumlegierung AZ91

**Staasmeyer, Jan-Helge**

Minimierung von Muschelausbrüchen bei der Bearbeitung von Glaswerkstoffen mittels Inversem Laserstrahlbohren

**Tenner, Vadim**

Technologiescouting alternativer Fügeverfahren zum Kleben, zur Produktion mikrooptischer Systeme

**Tetz, Thomas**

Reduction of substrate thickness for LED chips and consequential efficiency increase by the use of ultra-short pulsed laser radiation during the separation process

**Uzun, Ergün**

Identifikation von Verfahrensparametern zur Verarbeitung von CoCr mittels SLM unter Verwendung eines Softwaremoduls zur Bauteilgeometrie angepassten Laserleistungsvorgabe

**Walochnik, Martin**

Untersuchungen zur Machbarkeit und Funktion eines Laser-basierten Kraftsensors

**Walter, Simon**

Analyse der Kostentreiber von SLM-Produktionsanlagen

**Wedemeyer Markus**

Introduction of 3D Scan Technology to the Aeronautical Fuselage Assembly



# VERANSTALTUNGEN



## Welschhof, Lukas

Oberflächenbehandlung SLM  
gefertigter Turbinenschaufeln

## Wolfring, David

Untersuchung zur Ressourc-  
ceneffizienz von Prozess-  
ketten in der laserbasierten  
generativen Fertigung

## Wu, Yingchao

Experimentelle Ermittlung  
von Bearbeitungsparametern  
zum Feinstabtrag von  
Quarzglas mit gepulster  
CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung

## Zhang, Xiang

Untersuchungen zur  
Reduktion der Porosität  
beim additiven Aufbau einer  
γ-Titanaluminiumlegierung  
mittels Laserstrahlaufrag-  
schweißen

## Yalcin, Safak

Realization of a control  
system for automated  
adjustment of a laser  
resonator mirror

## Zhao, Tong

Integration of monitoring  
components in an inside laser  
cladding head for real-time  
process control

## VERANSTALTUNGEN

### SINO – Chinesisch-Deutsches Symposium

**21.1. - 23.1.2015, Aachen**

Rund 35 hochrangige Forscher von Instituten und Universitäten aus China und Deutschland trafen sich zum zweitägigen Chinesisch-Deutschen Symposium. Ein wichtiges Ziel des Symposiums ist die Vertiefung der bilateralen Kooperation der führenden Experten Chinas und Deutschlands im Bereich Laser Additive Manufacturing (LAM) und der Bearbeitung von Hochleistungswerkstoffen.

### Eröffnungsveranstaltung des BMBF-Forschungscampus »Digital Photonic Production (DPP)«

**23.1.2015, Aachen**

Pünktlich zum Start des »Internationalen Jahres des Lichts und der lichtbasierten Technologien« der Vereinten Nationen wurde in Aachen der neue BMBF-Forschungscampus »Digital Photonic Production (DPP)« durch den Parlamentarischen Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung Thomas Rachel eröffnet. Der Forschungscampus auf dem RWTH Aachen Campus besitzt Signalwirkung, denn es startet hier eine neue Form der Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft unter einem Dach. Ziel des Forschungscampus »DPP« ist die Erforschung und Weiterentwicklung von Licht als Werkzeug für die Produktion der Zukunft.

*1 Prof. Dr. E. Schmachtenberg (Rektor der RWTH Aachen University), R. Henke (Mitglied des deutschen Bundestags), T. Rachel (Staatssekretär im BMBF) und Prof. Dr. R. Poprawe (v. l. n. r.) bei der DPP-Eröffnungsveranstaltung in Aachen.*



*Gut besucht: 3rd International Conference on Turbomachinery Manufacturing – ICTM 2015.*

**3rd International Conference on Turbomachinery Manufacturing ICTM**

**25.2. - 26.2.2015, Aachen**

Höhere Effizienz und niedrigere Emissionswerte sind die zentralen Ziele bei den neuesten technologischen und fertigungstechnischen Entwicklungen, die den rund 240 Teilnehmern der International Conference on Turbomachinery Manufacturing ICTM präsentiert wurden. Auf der Konferenz hielten Experten, vorwiegend aus den Bereichen Luft- und Raumfahrt sowie Energiegewinnung (Alstom, Pratt & Whitney, MTU Aero Engines, MAN Diesel & Turbo, Rolls-Royce Deutschland, Siemens und andere) Vorträge. Weitere Beiträge leisteten Vertreter von Systemlieferanten, die Neuentwicklungen direkt in Praxisanwendungen implementieren, sowie von FuE-Organisationen, die an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Einsatz von Turbomaschinen tätig sind (GE Global Research, Fraunhofer IPT und ILT).

**3. Ultrakurzpulslaser (UKP)-Workshop**

**22.4. - 23.4.2015, Aachen**

Über 20 Referenten aus 8 verschiedenen Ländern boten den rund 160 Teilnehmern neben den Grundlagen der UKP-Technologie eine Übersicht der aktuellen Strahlquellenentwicklungen und neuen Systemtechniken, wie zum Beispiel Multistrahloptiken und neue Scannerkonzepte. Im Bereich Prozesstechnik diskutierten Referenten die neuesten Anwendungen und Verfahrensansätze, durch die sich heutige Grenzen hinsichtlich Materialspektrum, Bearbeitungsgeschwindigkeit und -qualität erweitern lassen.

**Batterietagung**

**27.4. - 29.4.2015, Aachen**

Tagung für Energiespeichersektor

Seit dem Aufkommen des Themas Elektromobilität vor rund sechs Jahren beschäftigt sich das Fraunhofer ILT mit dem laserbasierten Batteriefügen, also dem Verbinden einzelner Zellen zu Packs. Während der Batterietagung 2015 präsentierten das Fraunhofer ILT und die F&K Delvotec Bondtechnik GmbH ihr Gemeinschaftswerk, das im Rahmen eines öffentlich geförder-ten Projekts zu diesem Thema entstanden ist, an ihrem Stand auf der Fachtagung »Kraftwerk Batterie« im Eurogress in Aachen. Es gelang den Forschern, das Laserschweißen in einen konventionellen Bändchenbonder zu integrieren.

**Management Circle Trendforum »3D-Druck«**

**4.5. - 5.5.2015, Düsseldorf**

Der Management Circle veranstaltete in Kooperation mit dem Fraunhofer ILT das 3. Trendforum zum Thema »3D-Druck« unter der fachlichen Leitung von Prof. Reinhart Poprawe. Es richtete sich an Fach- und Führungskräfte aus den Bereichen Produktion, FuE, Konstruktion, Innovations- und Technologiemanagement, Logistik, Ersatzteilmanagement, Business Development Management, Strategische Unternehmensplanung, Recht, Marketing und Vertrieb. Inhaltliche Schwerpunkte waren unter anderem die Frage nach den derzeitigen technologischen und wirtschaftlichen Grenzen und den wirtschaftlichen Perspektiven des 3D-Drucks sowie seine Abgrenzung zu konventionellen Fertigungsverfahren. Experten zeigten auf, wie Unternehmen schon jetzt die Technologie erfolgreich für sich nutzen.



*NRW-Ministerpräsidentin Hannelore Kraft zu Besuch im Fraunhofer ILT bei ihrer Sommertour »NRW 4.0«.*



*Richtfest des Clusters »Photonik« am 26. August 2015 in Aachen.*

### **Sommertour »NRW 4.0«**

**13.7.2015, Aachen**

Im Rahmen ihrer Sommertour »NRW 4.0« besuchte NRW-Ministerpräsidentin Hannelore Kraft den RWTH Aachen Campus, um sich dort über die Forschung zu Industrie 4.0 und deren Auswirkungen auf die Arbeitswelt zu informieren. Begleitet wurde sie unter anderem von Karl Schultheis, Sprecher der SPD-Landtagsfraktion im Ausschuss für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landtags. Beim abschließenden Austausch fasste die Ministerpräsidentin ihre nachhaltigen Eindrücke zu folgendem Credo zusammen: »Wir sind stolz auf das, was Sie hier tun. Machen Sie weiter so!«

### **Richtfest Cluster »Photonik«**

**26.8.2015, Aachen**

Mit zahlreichen Gästen feierten das Fraunhofer ILT, die RWTH Aachen Campus GmbH und die ante4c GmbH, Partner der Landmarken AG als Projektentwickler, das Richtfest des ersten Bauabschnitts des Clusters »Photonik« auf dem RWTH Aachen Campus. Die Feier fand im lichtdurchfluteten Atrium des Gebäudes statt, einem Raum der Begegnung, der Kommunikation und des Wissensaustauschs zwischen Wirtschaft und Wissenschaft.

### **ACAM Kick-off Meeting**

**23.9.2015, Aachen**

Die Auftaktveranstaltung der ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing GmbH war mit über 100 Interessenten sehr gut besucht. Die Fraunhofer-Institute für Produktionstechnologie IPT und für Lasertechnik ILT initiierten gemeinsam mit Partnern aus der Wissenschaft das ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing mit dem Ziel, die Generative Fertigung für produzierende Unternehmen sinnvoll und gewinnbringend in ihre Produktionsprozesse einzusetzen.

### **High Power Diode Laser and Systems Conference**

**14.10.- 15.10.2015, Coventry, Großbritannien**

Im Rahmen der Messe Photonex fand die vom Scottish Chapter of the IEEE Photonics Society organisierte Konferenz HPD in Coventry statt. Neben einem Keynote-Vortrag von Christian Hinke zum Thema »Selective Laser Melting for Additive Manufacturing: Perspectives for Diode Lasers« präsentierte das Fraunhofer ILT Forschungsergebnisse aus dem Bereich Hochleistungs-Diodenlaser, die im Rahmen des EU-geförderten Projekts Bridle ([www.bridle.eu](http://www.bridle.eu)) erzielt wurden.

### **ArtiVasc 3D-Abschlussveranstaltung:**

#### **Biofabrication of Artificial Vascularized Tissue**

**28.10. - 29.10.2015, Aachen**

Auf der Abschlussveranstaltung am Fraunhofer ILT stellten die ArtiVasc 3D-Forscher ihre Ergebnisse detailliert vor. Mit der Entwicklung eines künstlichen durchbluteten dreilagigen Hautmodells und eines 3D-Druckverfahrens zur Herstellung künstlich verzweigter Blutgefäße aus neuartigen Materialien stößt das EU-Forschungsprojekt »ArtiVasc 3D« in eine neue Dimension vor.

### **Workshop »Laser Diodes for Space Applications«**

**23.11. - 24.11.2015, Palaiseau, Frankreich**

Gemeinsam mit der ESA organisierte das EU-geförderte Projekt Britespace ([www.britespace.eu](http://www.britespace.eu)) einen zweitägigen Workshop, bei dem aktuelle Fragestellungen und zukünftige Trends, die sich aus dem Weltraumeinsatz von Diodenlasern ergeben, diskutiert wurden. Martin Traub stellte hier Forschungsergebnisse zu dem Thema »Beam Shaping of High Power Laser Diodes for Space Applications« vor.



# INTERNATIONAL YEAR OF LIGHT



## »LIGHT«-EXPONAT DES FRAUNHOFER ILT

Die Vereinten Nationen haben das Jahr 2015 zum »Internationalen Jahr des Lichts« ausgerufen. Unter der Koordination der UNESCO wurden in zahlreichen Ländern Aktivitäten durch Unternehmen und öffentliche Einrichtungen organisiert, die die Bedeutung von Licht als elementare Lebensvoraussetzung für Menschen, Tiere und Pflanzen und als zentralen Bestandteil von Wissenschaft und Kultur hervorgehoben haben.

Die Fraunhofer-Gesellschaft leistet mit vielen Instituten – insbesondere aus dem Verbund »Light and Surfaces« – einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der optischen Technologien. So wirkt das Fraunhofer ILT seit über 30 Jahren als anerkannter Innovationspartner für Laserhersteller und -anwender.

Zu den stark nachgefragten Kernkompetenzen des Fraunhofer ILT zählen die laserbasierten additiven Fertigungsverfahren insbesondere zur Herstellung metallischer Bauteile für den Industriebereich. Für das Selective Laser Melting SLM wurde das Fraunhofer ILT mehrfach prämiert. Additive Verfahren kommen dort zum Einsatz, wo komplexe Bauteilgeometrien, kurze Reaktionszeiten, hohe Individualität und ein ressourcenschonender Umgang mit dem Werkstoff erforderlich sind.

*1 Auf der Ausstellung »MakeLightLab« im BMBF Mitte Oktober 2015 findet das Exponat »LIGHT« nicht nur bei Prof. Johanna Wanka, Bundesministerin für Bildung und Forschung, große Beachtung.*

Um seitens Fraunhofer einen öffentlichkeitswirksamen Beitrag zum Jahr des Lichts zu leisten, wurde ein Leitexponat entwickelt, das einen Bezug zu den optischen Technologien im Bereich der Produktionstechnik herstellt und gleichzeitig eine Fraunhofer-Kernkompetenz widerspiegelt, die national und international von Relevanz ist. Hier bot sich als Leitthema die additive Laserfertigung bzw. der 3D-Druck an.

### **Mannshohes Exponat mittels additiver Fertigung**

Das vom Fraunhofer ILT konzipierte Leitexponat besteht aus dem Schriftzug »LIGHT«. Die sichtbare Hohlraumstruktur der einzelnen Buchstaben wurde mittels 3D-Druck hergestellt und ist in dieser Größe und Machart einmalig (H: 1,9 m x B: 5,9 m x T: 0,6 m). Durch die Kombination der Begrifflichkeiten »leicht« und »Licht«, die in der englischen Übersetzung identisch »LIGHT« lauten, ergibt sich neben dem optischen Effekt ein schönes Wortspiel. Licht und Leichtigkeit – eine naheliegende Verbindung im Zeichen von Digital Photonic Production.

Die Innenhohlraumstruktur der Buchstaben wurde aus Flüssigpolymer mittels Stereolithographie in Europas größter Anlage bei der Firma Materialise, einem Kooperationspartner des Fraunhofer ILT, in Leuven (B) hergestellt. Im Anschluss an den generativen Prozess wurden die Strukturen mit einer Metalllackierung versehen, um den Bezug zur Herstellung metallischer Bauteile mit SLM am Fraunhofer ILT zu visualisieren. Im Metallbereich können derzeit Bauteile mit Abmaßen von ca. 65 cm hergestellt werden.

Die einzelnen Buchstaben wurden anschließend komplett in eine transparente Acrylglasverschalung eingebettet, sodass die wabenförmige Innenhohlraumstruktur gut sichtbar blieb. Die Rückseite der Buchstaben wurde mit flächigen LED-Leuchten ausgestattet, die das Exponat in bunten Farben erleuchten.





## Stationen des »LIGHT«-Exponats

### Jahrestagung der Fraunhofer-Gesellschaft

**9. - 10.6.2015, Wiesbaden**

Im Umfeld der Jahrestagung der Fraunhofer-Gesellschaft konnten sich rund 700 Besucher aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik im Foyer des Wiesbadener Kurhauses von der Strahlkraft des Leitexponats überzeugen. Ehrengäste waren Bundespräsident Joachim Gauck und der hessische Ministerpräsident Volker Bouffier. In einer Sonderführung konnte Prof. Poprawe den beiden Ehrengästen sowie dem Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft die Besonderheiten des Leitexponats und die damit verbundenen Chancen und Perspektiven für Industrie und Gesellschaft näher erläutern.

### LASER World of PHOTONICS

**22. - 25.6.2015, München**

Das Schwerpunktthema des Fraunhofer ILT lautete: Leichtbau. Das Leitexponat untermauerte mit dem ansprechenden Wort- und Bildspiel diesen thematischen Schwerpunkt. Rund 12.000 der insgesamt 27.000 Fachbesucher wurden in der Halle A3 während der Messe verzeichnet. Desweiteren besuchte Frau Dr. Flavia Schlegel, beigeordnete Generaldirektorin für Naturwissenschaften der UNESCO, den Fraunhofer-Stand.

### Zentrale der Fraunhofer-Gesellschaft

**29.06 - 18.09.2015, München**

Das »Light«-Exponat erhellte für zweieinhalb Monate das Foyer der Fraunhofer-Zentrale in München. Neben den über 500 Mitarbeitern konnten auch zahlreiche Besucher das Exponat besichtigen.

### Ausstellung »MakeLightLab« im BMBF

**10. - 18.10.2015, Berlin**

Im Rahmen des »Festival of Light« der Bundeshauptstadt Berlin veranstaltete das Bundesforschungsministerium im neuen Dienstsitz am Kapelle-Ufer vom 10. bis zum 18. Oktober 2015 eine Themenwoche rund um Licht und seine vielfältigen Anwendungen. In diesem Umfeld stellte das BMBF über den Projektträger VDI TZ das Exponat »LIGHT« aus. Ministerin Prof. Wanka eröffnete die Veranstaltung und informierte sich u.a. über das technologische und kreative Potenzial des 3D-Drucks. Der Bezug zur Maker-Szene, die sich ebenfalls mit 3D-Druck befasst, war naheliegend. Neben den Besuchern der Ausstellung wurden rund 400 Maker und Schüler in den Kursen und Workshops des VDI TZ verzeichnet.

### Ausstellung im »Centre Charlemagne«

**30.11.2015 - 10.1.2016, Aachen**

Im Fenster des »Centre Charlemagne« strahlte das Fraunhofer-Leitexponat vom 30.11.2015 bis zum 10.1.2016 über den Katschhof – dem zentralen Platz der Aachener Altstadt zwischen Dom und Rathaus. Insbesondere für die rund 1 Million Besucher des Aachener Weihnachtsmarkts war das Exponat ein leuchtender Hinweis auf das »Centre Charlemagne«, in dem die Geschichte Karls des Großen erläutert wird. Gleichzeitig wurde das Exponat seitens der Stadt Aachen als Vorbote für das bevorstehende »Future Lab 2016 Aachen« – das Wissenschaftsjahr der Stadt – breitenwirksam genutzt.

*2 SLM-generiertes Leichtbau-Exponat aus Metall, ca. 10 cm hoch.*

*3 Exponat »LIGHT« auf der Fraunhofer-Jahrestagung, v.l.n.r.: Hess. Ministerpräsident V. Bouffier, Bundespräsident J. Gauck, Fraunhofer-Präsident Prof. R. Neugebauer.*



*Gut besucht: 50. Aix-Laser-People-Treffen am 24. Juni 2015 im Seehaus in München während der LASER World of PHOTONICS.*

## AIX-LASER-PEOPLE

**24.6.2015, München**

**50. Seminar des Ehemaligenclubs »Aix-Laser-People« mit Business-Speed-Dating und 25-jährige Jubiläumsfeier des Arbeitskreises Lasertechnik e.V.**

Am Rande der LASER World of Photonics 2015 in München beging der Arbeitskreis Lasertechnik e.V. sein 25-jähriges Jubiläum. Er wurde gegründet, um die industrielle Lasertechnik in Deutschland voranzubringen. Heute verbindet er 154 Wissenschaftler und Manager, Praktiker und Dozenten, die gemeinsam neue Ideen für die Nutzung der Lasertechnik in verschiedenen Industriezweigen entwickeln und austauschen. Als der Arbeitskreis Lasertechnik – kurz AKL e.V. – 1990 als gemeinnütziger Verein durch Prof. Dr. Gerd Herziger – dem Gründer des Fraunhofer ILT – Prof. Dr. Reinhart Poprawe und Dr. Ernst Wolfgang Kreutz in Aachen gegründet wurde, stand die Lasertechnik in Deutschland vor einer entscheidenden Wende: Nach zwei Jahrzehnten intensiver Entwicklungsarbeit hatten Forscher und Lasersystemanbieter robuste Lösungen für den industriellen Einsatz der Lasertechnik erarbeitet. Nun galt es, die Einführung dieser hoch innovativen Technik bei den Anwendern auf breiter Front zu unterstützen. Dazu gehörte die Initiierung staatlicher und privatwirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsprojekte ebenso wie die gezielte Förderung von technischem Nachwuchs.

Der Vereinszweck der »Unterstützung des wissenschaftlichen Gedankenaustauschs über das Gebiet der Lasertechnik« wurde mit zahlreichen Publikationen der Mitglieder, Preisverleihungen und Veranstaltungen systematisch verfolgt. Neben regelmäßigen eigenen Seminaren unterstützt der AKL e.V. als ideeller Träger den International Laser Technology Congress AKL. In diesem Umfeld wird auch der mit 10.000 Euro dotierte Innovation Award Laser Technology verliehen, den

der AKL e.V. gemeinsam mit dem European Laser Institute ELI an Einzelpersonen und Projektgruppen für herausragende Leistungen alle 2 Jahre vergibt.

Im Kern ist der AKL e.V. immer noch ein Personennetzwerk von Laser-Profis und Laser-Enthusiasten, das sich zum größten Teil aus ehemaligen wissenschaftlichen Mitarbeitern des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik der RWTH Aachen zusammensetzt. Viele Mitglieder sind immer noch in der Laserbranche tätig oder interessieren sich für die neuesten Entwicklungen dieser Technologie – unabhängig von der Branche, in der sie gerade tätig sind. Diese persönlichen Netzwerke werden systematisch durch den AKL e.V. gefördert. Sie bieten eine offene kreative Atmosphäre, in der neue Projekte angedacht werden und so mancher Universitätsabsolvent eine neue berufliche Herausforderung gefunden hat.

Speziell für die Kontaktpflege der Ehemaligen vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT und den vier damit verbundenen Lehrstühlen der RWTH wurde in Aachen (Französisch Aix-la-Chapelle) der Ehemaligenclub »Aix-Laser-People« gegründet. Über 450 Namen stehen auf der Adressliste des Clubs. Viele der Aix-Laser-People sind in den AKL e.V. eingetreten, um sich nachhaltig in der Lasertechnik zu engagieren und die persönlichen Netzwerke weiter zu pflegen und auszubauen. Auch die Weitergabe von beruflichen Erfahrungen an junge engagierte Nachwuchskräfte zählt dazu.

Vernetzung und Erfahrungsaustausch gehören auch in Zukunft zu den wichtigsten Anliegen des Vereins. Die Gelegenheit dafür bieten nicht nur die Fachkongresse sondern auch gemeinsame Firmen- und Institutsbesuche, die der AKL e.V. mehrmals im Jahr organisiert. Auch Business Speed Datings zwischen Wissenschaftlern und Industriepartnern – wie eines auch in München während der Jubiläumsfeier am 24.6.2015 stattfand – werden in Zukunft weiter durchgeführt und tragen aktiv zur Erweiterung des Netzwerkes bei.



*MINT-Studentinnen des FemTec-Förderprogramms  
bei einer Vorführung im Fraunhofer ILT.*

**30.9./1.10.2015, Stuttgart**

**51. Seminar des Arbeitskreises Lasertechnik e.V.  
und des Ehemaligenclubs »Aix-Laser-People«**

bei TRUMPF und Porsche in Stuttgart. Zu Beginn des ersten Tages begrüßte Dr. Peter Leibinger, stellvertretender Vorsitzender der Geschäftsführung der TRUMPF GmbH & Co KG, die rund 35 Aix-Laser-People. Anschließend präsentierten Dr. Hartmut Zefferer, Director International Sales, und Dr. Alexander Knitsch, Vertriebsbereichsleiter bei TRUMPF, in Vorträgen und informativen Werksrundgängen u.a. 3D-Lasermaschinen, Stanz-Laser-Kombimaschinen und Geräte für die Blechbearbeitung. Im Applikationslabor Lasertechnik bot sich den Teilnehmern Gelegenheit zum intensiven Austausch mit den TRUMPF-Laserexperten über die verschiedenen Laserfertigungsverfahren und aktuelle Entwicklungen. Der zweite Tag führte die Gruppe zu Porsche in Stuttgart-Zuffenhausen. Nach einer interessanten Besichtigung der modernen Produktionsstätten hielt Alexander Georgoudakis aus dem Bereich Markenstrategie der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG noch einen informativen Vortrag mit anschließender Diskussion. Zum Abschluss gab es noch eine fachkundige Führung durch das beeindruckende Porsche Museum in Zuffenhausen.

**17.12.2015, Aachen**

**52. Seminar des Arbeitskreises Lasertechnik e.V.  
und des Ehemaligenclubs »Aix-Laser-People«**

bei der Clean-Lasersysteme GmbH in Herzogenrath. Nach einer kurzen Begrüßung der rund 25 Gäste hielt Dipl.-Ing., Dipl.-Kfm. Edwin Büchter, Geschäftsführer der Clean-Lasersysteme GmbH, einen Vortrag zum Thema »Laserstrahl reinigen mit System - vom tragbaren »Rucksack-Laser« bis hin zur vollautomatisierten Anlage für die Serienproduktion«. Anschließend berichtete Dr. Arnold Gillner, Leiter des Kompetenzfeldes Abtragen und Fügen im Fraunhofer ILT, über Stand und Perspektiven der Materialbearbeitung mit Ultrakurz-pulsLasern. Nach einer abschließenden Diskussion konnten die Teilnehmer noch die Produktionshallen der Clean-Lasersysteme GmbH besichtigen.

## VERANSTALTUNGEN FÜR SCHÜLER UND STUDENTEN

**27.1.2015, Aachen**

**Studentenführung**

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für Studenten der RWTH Aachen University.

**23.4.2015, Aachen**

**Girls'Day – Mädchenzukunftstag**

An diesem Tag erleben Schülerinnen ab Klasse 5 die Arbeitswelt in Technik, Handwerk, Ingenieur- und Naturwissenschaften oder lernen weibliche Vorbilder in Führungspositionen in Wirtschaft, Wissenschaft und Politik kennen. Das Fraunhofer ILT hat zusammen mit dem Fraunhofer IPT und Fraunhofer IME an diesem bundesweiten Berufsorientierungstag für Mädchen zwischen 10 und 15 Jahren teilgenommen.

**27.5.2015, Aachen**

**Fraunhofer BfC-Regionaltreffen**

Führung durch die Labore für ca. 14 westdeutsche Beauftragte für Chancengleichheit (BfC) der Fraunhofer-Gesellschaft.

**29.5.2015, Aachen**

**Studentenführung**

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für Studenten der FH Südwestfalen.

**21.6.2015, München**

**Exkursion zur LASER 2015 in München**

Besuch der LASER World of Photonics 2015 im Rahmen der Exkursionswoche der RWTH Aachen mit einer Gruppe Studierender.





*Fraunhofer ILT bei der »Nacht der Unternehmen« in Aachen.*

**6.7. - 10.7.2015, Aachen**

**Schüleruniversität Maschinenbau**

Die RWTH Aachen bietet in den Sommerferien Schüleruniversitäten zu den MINT-Fächern (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik) für Schülerinnen und Schüler ab Jahrgangsstufe 9 an. Dabei lernen die Schüler eine Woche lang das Universitätsleben kennen. Das Fraunhofer ILT hat sich daran gemeinsam mit anderen Instituten aus dem Fachbereich Maschinenbau A und der Fachschaft Maschinenbau mit Vorlesungen und Laborübungen zum Thema Lasertechnik beteiligt.

**6.10.2015, Aachen**

**FEMTEC-Exkursionstag**

Initiative FemTec - Promoting Talents

Über 50 MINT-Studentinnen des FemTec-Förderprogramms informierten sich während einer Exkursionswoche über persönliche, fachliche und berufliche Entwicklungsmöglichkeiten im Bereich der Forschung und Entwicklung. Auch die Fraunhofer-Gesellschaft lud als Partner der FemTec zum Dialog ein. Bei einem Besuch des Standorts Aachen nutzten die Studentinnen die Gelegenheit, sich am Fraunhofer ILT und IPT über Forschungsinhalte beider Institute sowie über Einstiegs- und Entwicklungschancen bei der Fraunhofer-Gesellschaft zu informieren.

**15.10.2015, Aachen**

**Studentenführung**

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für Erstsemesterstudenten der RWTH Aachen University.

**3.11.2015, Aachen**

**Nacht der Unternehmen**

Karriere- und Jobmesse

Unter dem Motto »DOCH« präsentierte sich das Fraunhofer ILT bei der 8. »Nacht der Unternehmen«. Über 2000 Hochschulabsolventen, Studierende und Fachkräfte informierten sich bei den rund 100 ausstellenden Unternehmen und Instituten über Gestaltungsmöglichkeiten ihrer beruflichen Laufbahn. Zuvor informierte das Fraunhofer ILT im Rahmen einer breit angelegten und crossmedialen DOCH-Personalmarketingkampagne über Einstiegs- und Karrieremöglichkeiten am Standort Aachen. Highlights der Kampagne waren unter anderem die vier »Riesenbuchstaben« vor der Mensa Academica und die Promotion-Aktion am 28.10.2015.

**2.12.2015, Aachen**

**Bonding**

Firmenkontaktmesse

Das Fraunhofer ILT präsentierte sich am 2. Dezember 2015 neben 300 weiteren Ausstellern auf der 28. Bonding in Aachen, um über Einstiegs- und Karrieremöglichkeiten zu informieren.

**17.12.2015, Aachen**

**Schülerführung**

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für eine Schülergruppe des Gymnasiums Gerollten.





*Fraunhofer-Gemeinschaftsstand auf der LASER World of PHOTONICS mit dem »LIGHT«-Exponat des Fraunhofer ILT.*

## MESSEN UND KONGRESSE

### **Fraunhofer ILT auf der LASER World of PHOTONICS**

Unter dem Stichwort »LIGHT« präsentierte sich das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT auf der LASER World of PHOTONICS durchaus doppeldeutig: Sowohl der Schwerpunkt Leichtbau als auch die neuen Systeme zur Erzeugung von Laserlicht wurden damit angesprochen. Darüber hinaus zeigte das Institut noch eine Vielzahl von neuen Ideen für die industrielle Lasertechnik auf der mit über 30.000 Besuchern weltgrößten Photonik-Messe.

#### **Eye-Catcher aus dem 3D-Drucker**

Einer der auffälligsten Blickfänger der Messe begrüßte die Gäste am Fraunhofer-Stand: Mit mannshohen Buchstaben wurde das diesjährige Motto »LIGHT« verkündet. Die eigentliche Überraschung steckte in der Gitterstruktur der Buchstaben, sie war in Europas größter kommerzieller Stereolithographie-Anlage bei dem Unternehmen Materialise in Leuven Belgien hergestellt worden. Das Verfahren gehört zu den gängigen 3D-Druck-Methoden zur Herstellung von Kunststoffbauteilen.

Das Interesse der Industrie an solchen generativen Verfahren für die Fertigung maßgeschneiderter Bauteile und Werkzeuge ist groß, zumal einige dieser Verfahren inzwischen im industriellen Alltag angekommen sind. Auf dem Stand des Fraunhofer ILT wurden verschiedene metallische Bauteile aus dem Automobilbau, der Flugzeugindustrie, der Medizintechnik und dem Werkzeugbau gezeigt, die mit dem am Fraunhofer ILT patentierten Verfahren des Selective Laser Melting SLM hergestellt werden. Besonders im Leichtbau werden SLM-gefertigte Bauteile zunehmend eingesetzt, da sie durch eine luftige Innenstruktur gewichtsoptimiert werden können. Je nach Bedarf kann dabei ein Füllfaktor zwischen 10 und 100 Prozent definiert werden.

#### **Ultrakurzpulslaser für den industriellen Einsatz**

Ein weiteres Highlight waren die Ultrakurzpuls(UKP)-Laser des Fraunhofer ILT. Neben Strahlquellen und Verstärkern mit bis zu 1,5 kW Ausgangsleistung wurden auch verschiedene Module zum Beispiel zur Pulsverkürzung oder für die abstimmbare Wellenlängenkonvertierung angeboten. Alle Systeme sind speziell für den industriellen Einsatz entwickelt. Sie bieten sowohl bei der Standzeit als auch der Produktivität deutliche Vorteile gegenüber der vorhandenen Technik.

#### **Fügen von Werkstoffkombinationen im Leichtbau**

Ob im Flugzeugbau oder der Automobilbranche - Leichtbauwerkstoffe sind im Trend. Die meisten von ihnen stellen jedoch besondere Anforderungen an die Verarbeitung, gerade auch wenn verschiedene Stoffe miteinander verbunden werden sollen. Lasertechnologien bieten dafür effiziente Lösungen, wie das Fraunhofer ILT gleich mit mehreren Exponaten auf der Messe zeigte.

Ein Beispiel war das klebstofffreie Fügen von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) und Metall. Dafür wird mit dem Laser die Oberfläche des Metallbauteils strukturiert und der flüssige Kunststoff fließt in die 100 µm tiefen Strukturen hinein. Beim Aushärten verkrallt er sich dann regelrecht in der Metalloberfläche. Am Fraunhofer-Stand wurde eine Autotür mit Kunststoffverstärkung gezeigt, die nach diesem Verfahren gefertigt wird.



Fraunhofer-Gemeinschaftsstand auf der JEC Europe 2015.



Prof. R. Neugebauer (Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft) und Prof. H. Walth (Audi Vorstand Produktion) auf der IAA in Frankfurt.

### **SPIE Photonics West**

**7.2. - 12.2.2015, San Francisco, USA**

Internationale Fachmesse für Optik und Photonik  
Das Fraunhofer ILT war auf der internationalen Fachkonferenz Photonics West mit den 10 Vorträgen »Two-wavelength approach for control of coagulation depth during laser tissue soldering«, »Radiation tests on erbium-doped garnet crystals for spaceborne CH4-Lidar applications«, »High stability single-frequency Yb fiber amplifier for next generation gravity missions«, »Brightness and average power as driver for advancements in diode lasers and their applications« (Invited Paper), »Advantages and drawbacks of Thiol-ene based resins for 3D-printing«, »Laser transmission welding of absorber-free thermoplastics using dynamic beam superposition«, »Application of laser beam welding for joining ultra-high strength and supra-ductile steels«, »Laser transmission welding of long glass fiber reinforced thermoplastics«, »Process observation in selective laser melting (SLM)«, »Active optical system for advanced 3D surface structuring by laser remelting« vertreten. Zudem stellte das Fraunhofer ILT auf dem Gemeinschaftsstand der Bundesrepublik Deutschland innovative Entwicklungen im Bereich Laserstrahlquellen und Optiken aus.

### **JEC Europe**

**10.3. - 12.3.2015, Paris, Frankreich**

Composite Show & Conferences  
Das Fraunhofer ILT präsentierte auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand wirtschaftliche Fertigungsverfahren für Faserverbundwerkstoffe. Hierzu wurden FVK-Bauteile sowie Kunststoff-Metall-Hybridbauteile aus der im BMBF-geförderten Projekt entwickelten »InProLight« Prozesskette sowie Schnitte von Front-End-Komponenten gezeigt. Zudem hielt das

Fraunhofer ILT zusammen mit dem Institut für Kunststoffverarbeitung IKV der RWTH Aachen einen Vortrag zum Thema »Process chain for next generations TP-FRP components: 3-d fibre spraying, variothermal consolidation and laser processing«.

### **LASER World of PHOTONICS China**

**17.3. - 19.3.2015, Shanghai, China**

Internationale Fachmesse für Optik und Photonik  
Auf dem Fraunhofer ILT Stand wurden aktuelle Innovationen und Trends aus dem Bereich Lasermaterialbearbeitung gezeigt. Dazu gehörten u. a. Ergebnisse aus dem Bereich UKP-Strahlung, wie z. B. die Multistrahlbearbeitung, sowie Wendelbohrschneiden, Dünnschichtabtrag für OLEDs und Lasermaterialbearbeitung mit cw-Strahlung (Fügen/Trennen).

### **Rapid Tech**

**10.6. - 11.6.2015, Erfurt**

Das Fraunhofer ILT war mit Exponaten zum Thema 3D-Druck auf einem Gemeinschaftsstand mit der FH Aachen in Erfurt vertreten. Hierbei wurde das »Aachen Zentrum für 3D-Druck«, eine Kooperationsinitiative des Fraunhofer ILT und der FH Aachen, in den Fokus gestellt. Zudem konnten sich die Besucher im Fabbus der FH Aachen die Prozesskette ansehen.

### **Paris Air Show**

**15.6. - 21.6.2015, Paris, Frankreich**

Internationale Luftfahrtmesse  
Auf der »International Paris Air Show« präsentiert das Fraunhofer ILT eine mehrstufige BLISK, die mit einer neuen adaptiven Prozesskette hergestellt wurde. Diese schafft mehr Freiräume im Bauteildesign und ermöglicht bessere Produktions- und Reparaturprozesse. Die Forschungsarbeiten sind ein Teilprojekt des Innovationsclusters »AdaM – Adaptive Produktion für Ressourceneffizienz in Energie und Mobilität«.



*Fraunhofer ILT auf der LASER  
World of PHOTONICS China in Shanghai.*



*Viele interessierte Besucher auf dem  
Fraunhofer-Gemeinschaftsstand der Paris Air Show.*

## **LASER – World of PHOTONICS**

**22.6. - 25.6.2015, München**

LASER 2015 World of Photonics and World of Photonics Congress 2015

Unter dem Stichwort »LIGHT« präsentierte sich das Fraunhofer ILT auf der LASER World of Photonics. Sowohl der Schwerpunkt Leichtbau als auch die neuen Systeme zur Erzeugung von Laserlicht wurden angesprochen. Darüber hinaus zeigte das Institut noch eine Vielzahl von neuen Entwicklungen für die industrielle Lasertechnik auf der mit über 30.000 Besuchern weltgrößten Photonik-Messe.

## **66. IAA Internationale Automobil-Ausstellung**

**15.9. - 18.9.2015, Frankfurt**

Internationale Leitmesse für Mobilität, Transport und Logistik  
Das Fraunhofer ILT präsentierte zusammen mit 16 weiteren Fraunhofer-Instituten das Verbundprojekt »Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität II«. Anhand des Beispiels »Leichtbaubatteriepack« demonstrierten sie den Besuchern, wie mit dem Einsatz von Leichtbautechniken Fahrzeugantriebsenergie bereitgestellt werden kann. Gezeigt wurden drei unterschiedliche und teilweise komplementäre Prozesstechniken.

## **IAC – 66th International Astronautical Congress**

**12.10. - 16.10.2015, Jerusalem, Israel**

Das Fraunhofer ILT präsentierte gemeinsam mit der Fraunhofer-Allianz Exponate zu den Themen Laseroptik, Laserstrahlquellen und Selective Laser Melting. Die ausgestellten Laserkomponenten und -module sind für den Einsatz im Weltraum optimiert und qualifiziert, z. B. für Telekommunikations- und LIDAR-Anwendungen.

## **FAKUMA**

**13.10. - 17.10.2015, Friedrichshafen**

Internationale Fachmesse für Kunststoffverarbeitung  
Highlight des diesjährigen Gemeinschaftsstands des IKV, Fraunhofer IPT und ILT war eine Babyplast-Spritzgussmaschine, die kleine Freiformoptiken produzierte, die das Logo der Konferenz »Aachener Kunststoffoptiktage 2016« projizierten. Außerdem präsentierte das Fraunhofer ILT multifunktionale Freiformoptiken aus Kunststoff für hocheffiziente Beleuchtungsanwendungen und die hauseigene Freiform-Optikdesign-Software »freeformOPT«. Während der Live-Demonstration der Software wurde ein Freiformspiegel ausgelegt, der ein Bild des Aachener Doms formt.

## **ICALEO**

**18.10. - 22.10.2015, Atlanta, USA**

34th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics

Das Fraunhofer ILT nahm mit vier Vorträgen zum Thema Lasermaterialbearbeitung an der ICALEO 2015 teil. Zudem war das Fraunhofer ILT als Aussteller auf der Vendor Session vertreten. Vor den rund 350 Teilnehmern des ICALEO Kongresses verliehen LIA-Präsident Yongfeng Lu und LIA-Geschäftsführer Peter Baker dem ehemaligen Fraunhofer ILT Mitarbeiter und Gründer des Spin-offs »EdgeWave GmbH« Dr. Keming Du den Arthur L. Schawlow Award 2015.





Auf der formnext 2015 v.l.n.r.: O. Edelmann (Concept Laser), T. Al-Wazir (Hess. Minister für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung) und Prof. Poprawe (Fraunhofer ILT).



Dr. F. Farassak (KZF Delvotec) und Dr. A. Olowinsky (Fraunhofer ILT, links) gewinnen den »productronica Innovation Award 2015« für den gemeinsam entwickelten »Laserbonding«.

## Productronica

### 10.11. - 13.11.2015, München

21. Weltleitmesse für Entwicklung und Fertigung von Elektronik  
Das besondere Highlight der diesjährigen Productronica war die Verleihung des »Productronica Innovation Award«. Der Laserbonding, den das Fraunhofer ILT zusammen mit der F&K Delvotec Bondtechnik GmbH im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojekts »Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen« entwickelte, überzeugte die Jury und wurde mit dem ersten Platz geehrt. Außerdem präsentierte das Fraunhofer ILT die völlig neue laserbasierte Fügetechnik »LIMBO: Laser Impulse Metal Bonding« für temperaturempfindliche Bauteile, die für Schwingung in der Elektronikproduktion sorgen soll. Sie ermöglicht es, nun auch Verbinderleiter mit einer Dicke von 200 µm und mehr auf dünne Metallisierungen thermisch zu fügen.

## COMPAMED

### 16.11. - 19.11.2015, Düsseldorf

Weltforum der Medizin und Internationale Fachmesse  
Auf dem IVAM-Gemeinschaftsstand erläuterten die Experten des Fraunhofer ILT Chancen und Herausforderungen des Projekts »Biophotonic Technologies for Tissue Repair BI-TRE«. Ziel ist dabei die Bereitstellung eines lasergestützten Verfahrens für die Mund-, Kiefer-, Gesichts- und Oralchirurgie zum zuverlässigen Wundverschluss nach einem operativen Eingriff.

## formnext

### 17.11. - 20.11.2015, Frankfurt

Internationale Messe für additive Technologien sowie Werkzeug- und Formenbau  
Das Fraunhofer ILT präsentierte sein koaxiales SLM-Prozessbeobachtungssystem, mit dem nun die Möglichkeit der koaxialen Einkopplung von Pyrometern und Highspeed-Kameras geboten wird. Außerdem stellte das Fraunhofer ILT weitere Ergebnisse aus den Themengebieten Laserpolieren, Laserauftragschweißen und SLM in der Medizintechnik vor. Zudem leistete das Fraunhofer ILT seinen Beitrag zu der Konferenz durch den Vortrag »Update zum Thema Metallverarbeitung mit additiven Technologien«. Die diesjährige Festrede auf der Eröffnungsveranstaltung wurde von Prof. Poprawe gehalten.





*Dr. Stefan Hengesbach gewinnt den Hugo-Geiger-Preis für seine Doktorarbeit.*

---

## AUSZEICHNUNGEN UND PREISE

---

### **WLT-Preis**

Dr. Stefan Hengesbach wurde am 22.06.2015 von der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Lasertechnik e.V. (WLT) mit dem WLT-Preis 2015 ausgezeichnet. Die Preisverleihung fand auf der Konferenz »Lasers in Manufacturing – LiM 2015« im Rahmen der LASER 2015 in München statt.

### **Springorium-Denkmünze**

Die Springorium-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 waren 2015 Carlo Holly, Daniel Brück, Patrick Eiselt und Lutz Lübbert unter den Ausgezeichneten. Die Denkmünze geht zurück auf den Kommerzienrat Dr.-Ing. E. h. Friedrich Springorium, der 1918 die Gesellschaft von Freunden der Aachener Hochschule gründete und sie bis zum Jahre 1925 als Vorsitzender leitete.

### **Borchers-Plakette**

Mit der Borchers-Plakette werden herausragende Promotionen gewürdigt. Für seine mit Auszeichnung bestandene Doktorprüfung erhielt Dr. Stefan Hengesbach, Mitarbeiter des Fraunhofer ILT, diese Plakette. Des Weiteren wurde auch ein Alumni des Fraunhofer ILT, Dr. Alexander Gatej, mit dieser Plakette geehrt. Namensgeber der Ehrenplakette ist der Geheimrat Professor Wilhelm Borchers, der von 1897 bis 1925 Ordinarius für Metallhüttenkunde an der Hochschule war.

### **Hugo-Geiger-Preis**

Auf den Münchner Wissenschaftstagen im November 2015 würdigte die Fraunhofer-Gesellschaft Dr. Stefan Hengesbach für seine Doktorarbeit zum Thema »Spektrale Stabilisierung und inkohärente Überlagerung von Diodenlaserstrahlung mit Volumenbeugungsgittern« mit dem Hugo-Geiger-Preis.

### **Productronica Innovation Award**

Das besondere Highlight der diesjährigen Productronica war die »Productronica Innovation Award« Verleihung. Der Laserbender, den das Fraunhofer ILT zusammen mit der F&K Delvotec Bondtechnik GmbH im Rahmen des vom BMBF-geförderten Verbundprojekts »Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen« entwickelte, überzeugte die Jury und wurde mit dem ersten Platz geehrt.

# ARBEITSKREIS LASERTECHNIK AKL E.V.



## **Arbeitskreis Lasertechnik AKL e.V.**

### **Das Forum für industrielle Laseranwendungen**

Der AKL e.V. wurde 1990 gegründet, um die faszinierenden Möglichkeiten, die das Werkzeug Laser in 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 und die Prozesse erprobt. Der Einsatz von Lasern ist vielerorts zum Tagesgeschäft geworden. Dennoch werden ständig neue Laserstrahlquellen und Laserverfahren entwickelt, die zu innovativen und neuen Perspektiven in der industriellen Fertigung führen. In dieser sich schnell wandelnden Disziplin unterstützt ein Netzwerk wie der AKL e.V. effektiv Innovationsprozesse.

Im Fokus der AKL e.V. Tätigkeit steht die wissenschaftliche Arbeit auf dem Gebiet der Lasertechnik sowie die Verbreitung der Lasertechnik zur qualitativen und wirtschaftlichen Verbesserung von Produktionsprozessen. Der AKL e.V. versteht sich hier als Moderator zwischen Anbietern und Anwendern sowie zwischen den wirtschaftlichen, wissenschaftlichen und politischen Institutionen im Umfeld.

Ein kontinuierlicher Informationsaustausch und Aufbau einer gemeinsamen Wissensbasis sowie die nachhaltige Verbesserung der Ausbildungssituation bilden die Grundlage zur Zielerreichung des Vereins. Dem AKL e.V. gehören derzeit 154 Mitglieder an.

### **Aufgabenspektrum**

- Information zu innovativen lasertechnischen Produkten und Verfahren
- Pflege persönlicher Netzwerke von Laser-Experten
- Organisation von Tagungen und Seminaren
- Erstellung von Lehrmitteln zur Lasertechnik
- Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses
- Beratung von Industrie und Wissenschaft in lasertechnischen Fragestellungen
- Verleihung des Innovation Award Laser Technology

### **Vorstand**

Dipl.-Ing. Ulrich Berners (Vorsitzender)  
Prof. Reinhart Poprawe (stellv. Vorsitzender)  
Dr. Bernd Schmidt  
Dipl.-Phys. Axel Bauer (Geschäftsführer)

### **Kontakt**

Dipl.-Phys. Axel Bauer  
Telefon +49 241 8906-194  
Fax +49 241 8906-121  
info@akl-ev.de  
www.akl-ev.de

# EUROPEAN LASER INSTITUTE ELI



## Kurzportrait

Das European Laser Institute wurde 2003 auf Initiative und mit Förderung der Europäischen Union gegründet. Ziel von ELI ist es, die Position Europas in der Lasertechnik zu stärken und weiter auszubauen. Darüber hinaus will ELI den Stellenwert und die Perspektiven der europäischen Lasertechnik für eine breitere Öffentlichkeit sichtbar machen. Gemeinsam mit knapp 30 führenden Forschungseinrichtungen sowie kleinen und mittelständischen Unternehmen hat sich das Fraunhofer ILT zu einem europäischen Netzwerk zusammengeschlossen. Neben der Integration in regionale und nationale Netzwerke ist das Fraunhofer ILT damit auch auf europäischer Ebene in ein schlagkräftiges Netzwerk im Bereich der Lasertechnik eingebunden. Des Weiteren wird die internationale Kooperation von Industrie und Forschung, insbesondere im Bereich der EU-Forschungsförderung, durch ELI forciert. Durch die Organisation von Konferenzen, Workshops, Summerschools etc. schafft ELI unter anderem entsprechende Plattformen. Nicht zuletzt wird dies auch durch die Zusammenarbeit mit den jeweiligen Interessensvertretungen (z. B. EPIC, AILU, WLT) gefördert. Eine enge Kooperation mit dem Laser Institute of America (LIA) besteht unter anderem bei der Ausrichtung von internationalen Konferenzen (ICALEO, PICALO, ALAW) sowie dem Journal of Laser Applications (JLA).

## Executive Committee

Das European Laser Institute wird durch das Executive Committee vertreten. Mitglieder im Executive Committee sind:

- Dr. Paul Hilton – The Welding Institute TWI Ltd, Großbritannien (Vorsitzender)
- Prof. Dr. Wolfgang Knapp – CLFA / Université de Nantes, Frankreich
- Dr. Markus Kogel-Hollacher, Precitec GmbH + Co. KG, Deutschland
- Prof. Dr. Veli Kujanpää – VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., Finnland
- Prof. Dr. José Luis Ocaña – Centro Láser, Universidad Politécnica de Madrid, Spanien
- Dr. Alexander Olowinsky – Fraunhofer ILT, Deutschland
- Prof. Dr. Andreas Ostendorf – Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Laseranwendungstechnik, Deutschland
- Dr. Pablo Romero, AIMEN, Spanien

## Kontakt im Fraunhofer ILT

Dr. Alexander Olowinsky  
Telefon +49 241 8906-491  
Fax +49 241 8906-121  
contact@europeanlaserinstitute.org  
www.europeanlaserinstitute.org

# ZUWENDUNGSGEBER

Einige Verbundprojekte wurden mit Mitteln von öffentlichen Zuwendungsgebern, denen wir an dieser Stelle danken, unterstützt.

GEFÖRDERT VOM



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



**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft



# AKL'18 – INTERNATIONAL LASER TECHNOLOGY CONGRESS

**SAVE THE DATE!**

[www.lasercongress.org](http://www.lasercongress.org)

**LASER APPLICATIONS  
OF TOMORROW**

**MAY 2 - 4, 2018  
IN AACHEN**



**AKL'18**  
INTERNATIONAL LASER  
TECHNOLOGY CONGRESS

# IMPRESSUM

## **Redaktion**

Dipl.-Phys. Axel Bauer (verantw.)  
Stefanie Flock  
M.A. Petra Nolis

## **Gestaltung und Produktion**

Dipl.-Des. Andrea Croll  
[www.andrea-croll.de](http://www.andrea-croll.de)

## **Druck**

Druckspektrum  
Hirche-Kurth GbR, Aachen  
[www.druck-spektrum.de](http://www.druck-spektrum.de)

## **Papier**

Dieser Jahresbericht wurde auf umweltfreundlichem,  
chlor- und säurefrei gebleichtem Papier gedruckt.

## **Ansprechpartner**

Dipl.-Phys. Axel Bauer  
Telefon +49 241 8906-194  
Fax +49 241 8906-121  
[axel.bauer@ilt.fraunhofer.de](mailto:axel.bauer@ilt.fraunhofer.de)

Änderungen bei Spezifikationen und anderen technischen  
Angaben bleiben vorbehalten.

2. überarbeitete Auflage. Alle Rechte vorbehalten.  
Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung der Redaktion.

© Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen 2016.

## **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)