



Fraunhofer

ILT

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR LASERTECHNIK ILT

JAHRESBERICHT 2011



**JAHRESBERICHT DES
FRAUNHOFER-INSTITUTS
FÜR LASERTECHNIK ILT
2011**



Mechanik und Elektronik prägten neue Zeitalter der Menschheit, hatten Konsequenzen für die gesamte Gesellschaft und führten zu veränderten Lebensformen und -qualitäten. Die Installation der ersten Maschinen revolutionierte im 19. Jahrhundert die Industrie und die Arbeitswelt. Produkte wurden kosteneffizient in Serie hergestellt und weit gestreut. Das 20. Jahrhundert war durch die Elektronik geprägt. Hieraus resultierten Entwicklungen wie Informationstechnik, Computer, automatisierte Steuerungen und Regelungen und damit automatisierte Produktion. Auch dies wirkte sich direkt auf die Gesellschaft aus. Intensive online Kommunikation und globale Mobilität wurden zu einer Selbstverständlichkeit.

Im 21. Jahrhundert erleben wir den Aufstieg einer weiteren prägenden Technologie – der Photonik. Unmittelbar spüren wir die Veränderung im Datentransfer. Optische Netze ermöglichen nicht vorstellbare Informationsmengen. In der Medizintechnik wurden erstmals Operationen möglich, die vorher nicht realisierbar waren. Die LED-Technologie führt nicht nur zur Energieeinsparung im Beleuchtungssektor sondern ermöglicht auch neue Designoptionen im Automobilbau. Erst durch Einsatz der Photonik können moderne Displays betrieben und hergestellt werden.

Spannend wird nun die Kombination von Mechanik, Elektronik und Photonik. So steht die Produktionstechnik durch diese Symbiose vor einem Paradigmenwechsel: von der effizienzorientierten Serienfertigung standardisierter Produkte hin zur individualisierten Massenproduktion. Individualität und Vielfältigkeit bei reduzierten Kosten schließen sich in Zukunft nicht mehr aus. So werden bereits heute individuelle Zahnersatzteile nicht mehr in Serienfertigung, sondern in einer Parallelfertigung hergestellt. Bald wird auch das physische Ersatzteillager für Hersteller von Werkzeugen und Maschinen

durch zunehmend virtuelle Lagerhaltung im Computer und »print on demand« reduziert. Der schnelle Austausch defekter älterer Metallbauteile erfolgt einfach durch das dreidimensionale Generieren der Teile auf der Grundlage von gespeicherten CAD Daten – also mittels Verfahren des Laser Additive Manufacturing LAM.

Das Fraunhofer ILT leistet mit der Entwicklung der entsprechenden Verfahren einen entscheidenden Beitrag zu dem Paradigmenwechsel in der Produktion. Dazu vernetzten sich unsere Laserexperten mit Designern, Medizinern, Steuerungsexperten und Materialwissenschaftlern. Interdisziplinär erarbeiten sie neue Fertigungsprozesse und eröffnen neue Horizonte in unterschiedlichen Branchen. Eine spannende Herausforderung, aus der auch Sie Ihren Nutzen ziehen können! Damit Sie sich mit vielen anderen Innovationen vertraut machen können, die unser Team tagtäglich vorantreibt, empfehle ich Ihnen die Lektüre dieses Jahresberichts. Wenn Sie daraus neue Ideen schöpfen, die Sie mit uns gemeinsam realisieren wollen, sprechen Sie uns an. Fraunhofer ist dazu da und bereit, mit Ihnen die Zukunft zu erfinden.

Wir wünschen und kreieren mit Ihnen ein erfolgreiches Jahr 2012!

Ihr

Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.

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	Fraunhofer USA Center for Laser Technology CLT
24	Coopération Laser Franco-Allemande CLFA
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

Ausgewählte Forschungsergebnisse

37	Laser und Optik
57	Lasermaterialbearbeitung
113	Medizintechnik und Biophotonik
121	Lasermesstechnik und EUV-Technologie
132	Patente
133	Dissertationen
134	Diplomarbeiten
135	Bachelorarbeiten
136	Masterarbeiten
136	Wissenschaftliche Veröffentlichungen
144	Vorträge
152	Kongresse und Seminare
156	Messebeteiligungen
158	Auszeichnungen und Preise
160	European Laser Institute ELI
161	PhotonAix e.V. - Kompetenznetz Optische Technologien
162	Arbeitskreis Lasertechnik AKL e.V.
163	Fachbücher
164	Informations-Service
165	Impressum

DAS INSTITUT IM PROFIL

KURZPORTRAIT

ILT - dieses Kürzel steht seit über 25 Jahren für gebündeltes Know-how im Bereich Lasertechnik. Innovative Lösungen von Fertigungs- und Produktionsaufgaben, Entwicklung neuer technischer Komponenten, kompetente Beratung und Ausbildung, hochspezialisiertes Personal, neuester Stand der Technik sowie internationale Referenzen: dies sind die Garantien für langfristige Partnerschaften. Die zahlreichen Kunden des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT stammen aus Branchen wie dem Automobil- und Maschinenbau, der Chemie und der Elektrotechnik, dem Flugzeugbau, der Feinmechanik, der Medizintechnik und der Optik. Mit rund 370 Mitarbeitern und 11.000 m² Nutzfläche 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 μW bis GW . Das Spektrum der Laserstrahlquellen reicht von Diodenlasern bis zu Festkörperlaser, von Hochleistungsw-Lasern bis zu Ultrakurzpulslasern und von single-frequency Systemen bis hin zu breitbandig abstimmbaren Lasern.

Bei den Festkörperlaser 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.

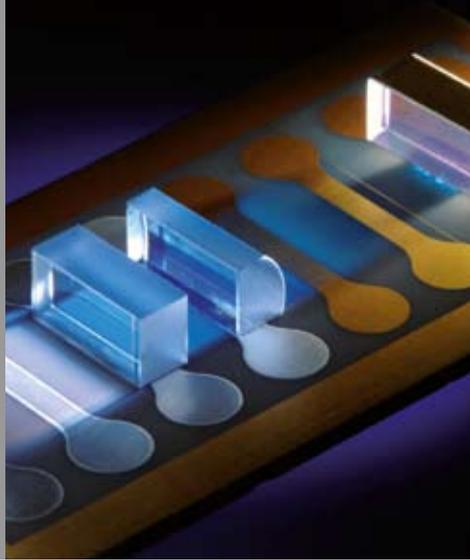
Die Anwendungsgebiete der entwickelten Laser und Optiken reichen von der Lasermaterialbearbeitung und der Messtechnik über Beleuchtungsapplikationen und Medizintechnik bis hin zum Einsatz in der Grundlagenforschung.

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>
LASER UND OPTIK			
Optikdesign	Dipl.-Ing. M. Traub	martin.traub@ilt.fraunhofer.de	Tel. -342
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
Diodenlaser	Dipl.-Ing. M. Traub	martin.traub@ilt.fraunhofer.de	Tel. -342
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
Festkörperlaser	Dipl.-Phys. M. Höfer	marco.hoefer@ilt.fraunhofer.de	Tel. -128
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
Ultrakurzpulslaser	Dr. P. Rußbüldt	peter.russbueldt@ilt.fraunhofer.de	Tel. -303
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
Faserlaser	Dipl.-Phys. O. Fitzau	oliver.fitzau@ilt.fraunhofer.de	Tel. -442
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
UV-, VIS- und abstimmbare Laser	Dr. B. Jungbluth	bernd.jungbluth@ilt.fraunhofer.de	Tel. -414
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
Packaging	Dipl.-Ing. M. Leers	michael.leers@ilt.fraunhofer.de	Tel. -434
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
Freiformoptiken	A. Bäuerle M.Sc.	axel.baeuerle@ilt.fraunhofer.de	Tel. -597
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
Modellierung und Simulationstools	Dr. R. Wester	rolf.wester@ilt.fraunhofer.de	Tel. -401
	Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -206
LASERMATERIALBEARBEITUNG			
Laserschneiden	Dr. F. Schneider	frank.schneider@ilt.fraunhofer.de	Tel. -426
	Dr. D. Petring	dirk.petring@ilt.fraunhofer.de	Tel. -210
Laserschweißen	Dipl.-Ing. M. Dahmen	martin.dahmen@ilt.fraunhofer.de	Tel. -307
	Dr. D. Petring	dirk.petring@ilt.fraunhofer.de	Tel. -210

Löten	Dipl.-Ing. F. Schmitt Dr. A. Gillner	felix.schmitt@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -322 Tel. -148
Wärmebehandlung	Dr. A. Weisheit Dr. K. Wissenbach	andreas.weisheit@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -403 Tel. -147
Beschichten	Dr. A. Weisheit Dr. K. Wissenbach	andreas.weisheit@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -403 Tel. -147
Laserauftragschweißen	Dr. A. Gasser Dr. K. Wissenbach	andres.gasser@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -209 Tel. -147
Rapid Manufacturing	Dr. W. Meiners Dr. K. Wissenbach	wilhelm.meiners@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -301 Tel. -147
Prozesssensorik und Systemtechnik	Dipl.-Ing. P. Abels Dr. A. Gillner	peter.abels@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -428 Tel. -148
Kunststoffschneiden und -schweißen	Dipl.-Ing. A. Roesner Dr. A. Gillner	andreas.roesner@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -158 Tel. -148
Reinigen	Dr. J. Stollenwerk Dr. K. Wissenbach	jochen.stollenwerk@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -411 Tel. -147
Beschriften	Dr. J. Stollenwerk Dr. K. Wissenbach	jochen.stollenwerk@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -411 Tel. -147
Bohren	Dipl.-Ing. H. Uchtmann Dipl.-Ing. (FH) C. Hartmann	hermann.uchtman@ilt.fraunhofer.de claudia.hartmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -8022 Tel. -207
Mikrofügen	Dr. A. Olowinsky Dr. A. Gillner	alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -491 Tel. -148

3D-Volumenstrukturierung	Dipl.-Phys. D. Schäfer Dr. A. Gillner	dagmar.schaefer@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -628 Tel. -148
Polieren	Dr. E. Willenborg Dr. K. Wissenbach	edgar.willenborg@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -213 Tel. -147
Dünnschichtverfahren	Dr. J. Stollenwerk Dr. K. Wissenbach	jochen.stollenwerk@ilt.fraunhofer.de konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de	Tel. -411 Tel. -147
Ultrakurzpulsbearbeitung	Dipl.-Phys. D. Wortmann Dipl.-Phys. S. Eifel	dirk.wortmann@ilt.fraunhofer.de stephan.eifel@ilt.fraunhofer.de	Tel. -276 Tel. -311
Mikrostrukturierung	Dr. J. Holtkamp Dr. A. Gillner	jens.holtkamp@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -273 Tel. -148
Nanostrukturierung	Dipl.-Phys. S. Eifel Dr. A. Gillner	stephan.eifel@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -311 Tel. -148
Simulation	Dr. J. Schüttler Prof. Dr. W. Schulz	jens.schuettler@ilt.fraunhofer.de wolfgang.schulz@ilt.fraunhofer.de	Tel. -680 Tel. -204

MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK

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

Biofunktionalisierung	Dr. E. Bremus-Köbberling Dr. A. Gillner	elke.bremus@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -396 Tel. -148
Biofabrication	Dipl.-Biologe D. Riester Dr. A. Gillner	dominik.riester@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -529 Tel. -148
Lasertherapie	Dr. M. Wehner Dr. A. Gillner	martin.wehner@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -202 Tel. -148
Implantate	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

Fertigungsmesstechnik	Dr. V. Sturm Dr. R. Noll	volker.sturm@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -154 Tel. -138
Materialanalytik	Dr. C. Fricke-Begemann Dr. R. Noll	cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -196 Tel. -138
Recycling und Rohstoffe	Dipl.-Phys. P. Werheit Dr. R. Noll	patrick.werheit@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -489 Tel. -138
Umwelt und Sicherheit	Dr. C. Fricke-Begemann Dr. R. Noll	cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -196 Tel. -138
EUV-Technologie	Dr. K. Bergmann Dr. R. Noll	klaus.bergmann@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -302 Tel. -138

INSTITUTSSTRUKTUR

INSTITUTSLEITUNG



Prof. Dr. Reinhart Poprawe M.A.
Institutsleiter



Prof. Dr. Peter Loosen
stellvertretender Institutsleiter

VERWALTUNG UND STABSSTELLEN



Dipl.-Betw. Vasvija Alagic 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*



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. Norbert Arndt, Rolls-Royce plc
- C. Baasel (Vorsitzender), Carl Baasel Lasertechnik GmbH
- Dr. Thomas Fehn, Jenoptik AG
- Dr. Ulrich Hefter, Rofin-Sinar Laser GmbH
- Dr. U. Jaroni, ThyssenKrupp Stahl AG
- RD Andreas Kletschke, Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
- Dipl.-Ing. Volker Krause, Laserline GmbH
- Prof. Dr. G. Marowsky, Laserlaboratorium Göttingen e. V.
- MinRat Dipl.-Phys. T. Monsau, Ministerium für Wirtschaft, Energie, Bauen, Wohnen und Verkehr des Landes NRW
- 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 26. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 14. September 2011 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: Dipl.-Betw. (FH) Vasvija Alagic MBA, Dipl.-Phys. A. Bauer, Dr. A. Gillner, Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann, Dr. S. Kaierle, Dr. I. Kelbassa, Prof. Dr. P. Loosen, Dr. R. Noll, Dr. D. Petring, Prof. Dr. R. Poprawe, Prof. Dr. 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: Dipl.-Betw. (FH) Vasvija Alagic MBA, K. Bongard, M. Brankers, A. Hilgers, A. Lennertz, Dr. W. Neff, E. Neuroth, Dipl.-Ing. H.-D. Plum, Prof. Dr. 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. Dr. R. Poprawe, Dr. A. Olowinsky, Dipl.-Ing. H.-D. Plum.

Betriebsrat

Der Betriebsrat wurde im März 2003 von den Mitarbeitern des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT gegründet. Mitglieder sind:

Dipl.-Ing. P. Abels, M. Brankers, Dipl.-Ing. A. Dohrn, C. Hannemann, M. Janssen, Dipl.-Phys. A. Temmler, B. Theisen (Vorsitz), Dr. A. Weisheit, Dipl.-Ing. N. Wolf.

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

MITARBEITER

Mitarbeiter am Fraunhofer ILT 2011	Anzahl
Stamppersonal	204
- Wissenschaftler und Ingenieure	138
- Mitarbeiter der technischen Infrastruktur	42
- Verwaltungsangestellte	24
Weitere Mitarbeiter	165
- wissenschaftliche Hilfskräfte	153
- externe Mitarbeiter	6
- Auszubildende	6
Mitarbeiter am Fraunhofer ILT, gesamt	369

- 12 Mitarbeiter haben ihre Promotion abgeschlossen.
- 25 Studenten haben ihre Diplomarbeit am Fraunhofer ILT durchgeführt.

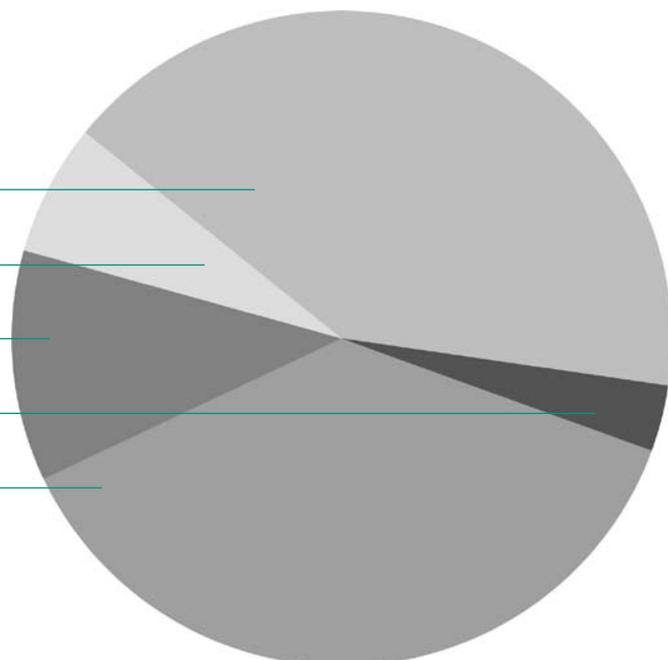
41 % wissenschaftliche Hilfskräfte

7 % Verwaltungsangestellte

11 % technische Infrastruktur

3 % Auszubildende / externe Mitarbeiter

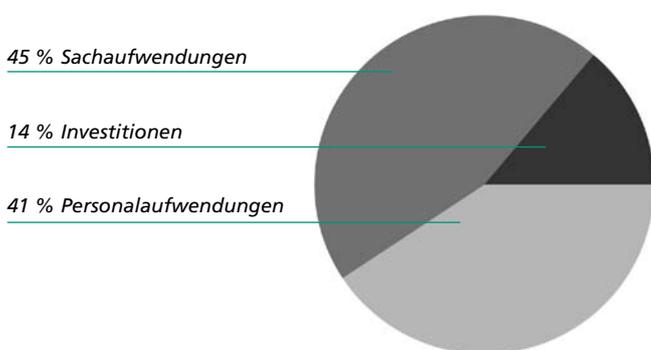
38 % Wissenschaftler und Ingenieure



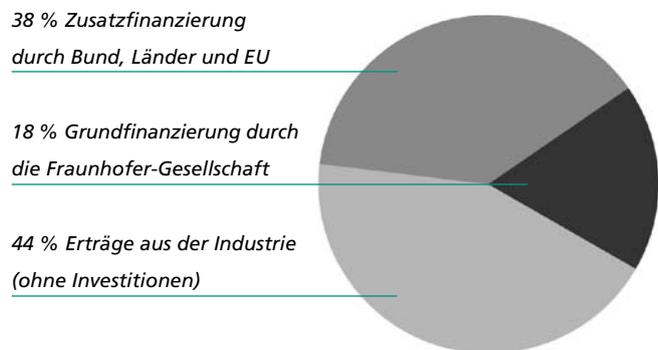
AUFWENDUNGEN UND ERTRÄGE

Aufwendungen 2011	Mio €
- Personalaufwendungen	12,9
- Sachaufwendungen	14,4
Aufwendungen Betriebshaushalt	27,3
Investitionen	4,4

Erträge 2011	Mio €
- Erträge aus der Industrie	11,9
- Zusatzfinanzierung durch Bund, Länder und EU	10,5
- Grundfinanzierung durch die Fraunhofer-Gesellschaft	4,9
Erträge Betriebshaushalt	27,3
- davon entfallen auf Auslandsprojekte	3,2
Investitionserträge aus der Industrie	0,4
Fraunhofer Industrie ρ_{Ind}	45,0 %



(100% Betriebshaushalt und Investitionen)

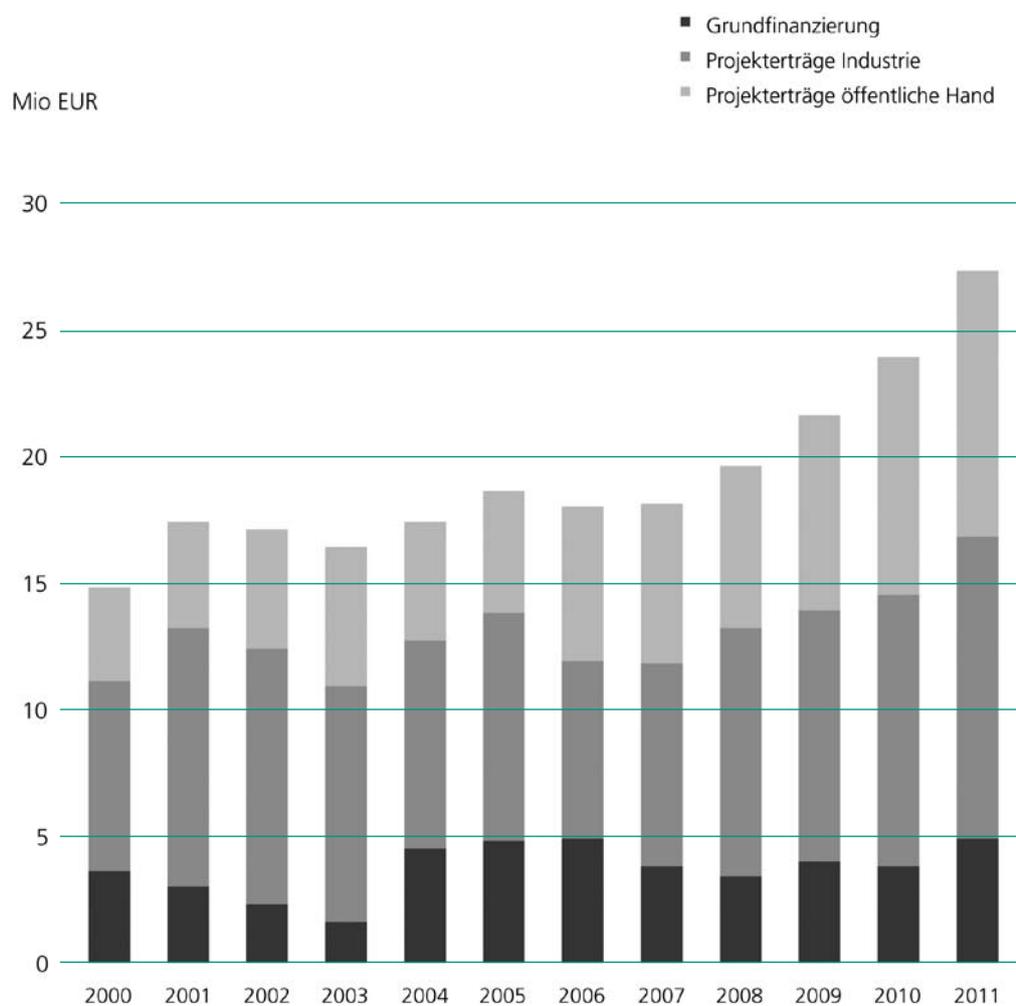


(100% Betriebshaushalt)

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

BETRIEBSHAUSHALT

Die Graphik verdeutlicht die Entwicklung des Betriebsshaushalts in den letzten 12 Jahren.



KUNDENREFERENZENZEN



ZWIESEL KRISTALLGLAS

Stand Februar 2012. 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 »Photonics in Production«

Durch Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen und spezialisierten Unternehmen bietet das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT auch bei fachübergreifenden Aufgabenstellungen 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 Nutzflächen des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT betragen über 11.000 m².

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:

- CO₂-Laser bis 12 kW
- Lampengepumpte Festkörperlaser bis 3 kW
- Scheibenlaser von 1 bis 10 kW
- Faserlaser von 100 W bis 4 kW
- Diodenlaser von 1 bis 12 kW
- SLAB-Laser
- Excimerlaser
- Ultrakurzpulslaser bis 1 kW
- Breitbandig abstimmbare Laser

- Fünfachsig Portalanlagen
- Dreiachsig Bearbeitungsstationen
- Strahlführungssysteme
- Robotersysteme
- Sensoren zur Prozessüberwachung für die Lasermaterialbearbeitung
- Direct-writing- und Laser-PVD-Stationen
- Reinräume zur Montage von Dioden- und Festkörperlasern sowie Laseroptiken
- Reinräume zur Montage von Diodenlasern, diodengepumpten Festkörperlasern und Faserlasern
- Life Science Labor mit S1 Klassifizierung
- 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 Ultrakurzpulslasern: Autokorrelatoren, Multi GHz Oszilloskope und Spektralanalysatoren

FRAUNHOFER USA CENTER FOR LASER TECHNOLOGY CLT

Kurzportrait

Das Fraunhofer Center for Laser Technology CLT hat seinen Sitz in Plymouth, Michigan. Diese Region hat sich zu einem Zentrum für Laserhersteller, Systemintegratoren und industrielle Anwender in den USA etabliert. Das Gebäude des CLT umfasst Räumlichkeiten mit einer Grundfläche von 1250 m².

Das Fraunhofer CLT verfolgt folgende Ziele:

1. Einbindung in wissenschaftliche und industrielle Entwicklungen in den USA
2. Know-how Zuwachs am Mutterinstitut durch schnelleres Erkennen von Trends, in denen die USA führend sind
3. Know-how Zuwachs am Fraunhofer CLT durch enge Kooperation mit der University of Michigan und der Wayne State University sowie anderen führenden US Universitäten
4. Bedienung internationaler Unternehmen auf beiden Kontinenten vor Ort
5. Austausch von Studenten

Die zentrale Philosophie von Fraunhofer USA ist der Aufbau einer deutsch-amerikanischen Zusammenarbeit, bei dem Nehmen und Geben im Einklang stehen. Das Interesse der amerikanischen Partner-Universitäten konzentriert sich auf:

1. Nutzung von Kompetenzen der Fraunhofer-Institute
2. Erfahrung bei der Einführung neuer Technologien in den Markt
3. Verbindung zwischen Industrie und Hochschule
4. Praxisnahe Ausbildung von Studenten, Diplomanden und Doktoranden

In Zusammenarbeit mit der University of Michigan werden am Fraunhofer CLT Faserlaser hoher Brillanz und Leistung entwickelt. Die Grundlagen und Konzepte neuer Fasergeometrien zur Erzielung hoher (Puls-)Leistungen mit beugungsbegrenzter Strahlqualität werden an der Universität erarbeitet, während Fraunhofer die Entwicklung brillanter Pumpquellen, die

Systemintegration, den Prototypenbau und die Applikationsuntersuchungen übernimmt. Das Fraunhofer CLT hat in diesem Rahmen neue Technologien und Fertigungsmethoden für Multi-Single-Emitter Diodenlaser entwickelt, welche die Leistungsfähigkeit von Diodenlasern mit der von Festkörperlaser verglichbar machen. Gemeinsam werden entsprechende Forschungsprojekte bearbeitet. In Zusammenarbeit mit der University of Michigan wurde in 2007 Arbor Photonics gegründet, um die Entwicklungen im Bereich flexibler Faserlaser hoher Strahlqualität und Pulsleistung zu kommerzialisieren.

Kostengünstige Fertigungsverfahren für alternative Energieerzeugung und -speicherung werden in Kooperation mit der University of Michigan entwickelt. Der Schwerpunkt liegt auf Solarzellen und auf Li-Ionen Batterien. Laserinduzierte Trenn- und Fügeverfahren, auch ungleicher Werkstoffe, bilden die technologische Grundlage. Die Forschungsergebnisse werden derzeit in bilateralen Projekten in die Industrie überführt.

In der Solarzellenfertigung werden Laser zur Effizienzsteigerung erfolgreich eingesetzt. Am Fraunhofer CLT wurden Hochratebohrprozesse für EWT Zellen entwickelt und die Produktivität des Laserbohrens um einen Faktor 6 verbessert. Weiterhin werden Laser zur wirtschaftlichen Oberflächenstrukturierung des Siliziums und zur Strukturierung des Deckglases verwendet. Sie erhöhen die Absorption in der Zelle um einige Prozent.

Eine Allianz zur Erforschung erneuerbarer Energien im Transport wurde gemeinsam von der University of Michigan und der Fraunhofer-Gesellschaft ins Leben gerufen. Für die zweijährige Pilotphase wurden 5 Projekte ausgewählt, welche sich durch wissenschaftliche Neuartigkeit und hohes Marktpotenzial auszeichnen. Die Bereiche neuartige Energie- und



Leistungsspeicher, deren kostengünstige Herstellung, Redox-Batterien sowie dynamische 3-D-Diagnostik von Verbrennungsprozessen werden abgedeckt. Die erste Phase wurde im Herbst abgeschlossen. Im Laufe des Projekts wurden von den Partnern mehr als \$ 500.000 Drittmittel eingeworben und Projektanträge von mehr als \$ 20 Millionen gestellt. Zwei Patentanmeldungen, mehrere Veröffentlichungen und gemeinsame Messeauftritte erfolgten während der Projektlaufzeit. Darüber hinaus wurde das Spin-off »Inmatech« unter Fraunhofer-Beteiligung gegründet.

Dienstleistungen

Das Fraunhofer CLT bietet Dienstleistungen im Bereich der Lasermaterialbearbeitung sowie der Entwicklung von optischen Komponenten und speziellen Lasersystemen an. Diese umfassen das gesamte Spektrum von Machbarkeitsstudien über Prozessentwicklung, Vorserienproduktion und Prototypenfertigung von Laserstrahlquellen bis hin zu schlüsselfertigen Laseranlagen. Die Kunden kommen überwiegend aus der Automobilindustrie, der Bauindustrie, dem Schiffbau und der Medizintechnik.

Ausstattung

Die derzeitige Ausstattung des CLT umfasst eine Vielzahl von Lasern für die Mikromaterialbearbeitung und einige Hochleistungslaser. Faserlaser beugungsbegrenzter Strahlqualität mit bis zu 500 W cw und 25 kW Pulsleistung mit flexiblen Pulsparametern, frequenzverdreifachte Nd:YAG-, CO₂- und Excimer-Laser sowie Diodenlaser stehen für Prozessentwicklungen in der Mikrotechnik zur Verfügung.

Aufwendungen 2011

	Mio US \$
Betriebshaushalt	2,1
- Personalaufwendungen	1,2
- Sachaufwendungen	0,9

Kundenreferenzen

Öffentliche Förderung

- DARPA
- Department of Energy
- U.S. Air Force Research Laboratories
- U.S. Army Research Laboratory
- Michigan Life Science Corridor

Industrie

- Dow
- Ford
- General Motors
- Magna
- Medtronic
- Praxair
- Procter & Gamble
- Roche

Ansprechpartner



Dr. Stefan Heinemann
Direktor

Telefon +1 734-738-0500
Fax +1 734 354-3335
sheinemann@clt.fraunhofer.com
www.clt.fraunhofer.com

46025 Port Street
Plymouth, Michigan 48170, USA

COOPÉRATION LASER FRANCO-ALLEMANDE CLFA

Kurzportrait

In der Coopération Laser Franco-Allemande (CLFA) in Paris kooperiert das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT seit 1997 erfolgreich mit führenden französischen Forschungseinrichtungen. Die wichtigsten Kooperationspartner sind dabei die Hochschule MINES ParisTech, ARMINES und das Institut CAROT Mines in Paris, die Hochschule für Mechanik und Mikrotechnik ENSMM in Besançon, die Ingenieurhochschule ECAM Rennes Louis de Broglie sowie weitere namhafte Laseranwendungszentren in Frankreich. 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 & Procédés, und beteiligt sich aktiv an der Organisation regionaler und nationaler Konferenzen und Ausstellungen. So organisierte die CLFA im September 2011 die nationale Konferenz »Journées Nationales des Procédés Laser pour l'Industrie« und die internationale Tagung »EUCOSS'2011«.

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 F&E-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 und ist eine Konsequenz der insbesondere im Bereich der Lasertechnik zunehmenden Vernetzung der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung in Europa.

Die Kooperation des Fraunhofer ILT mit den französischen Partnern ist auch ein Beitrag zum Ausbau der europaweiten Präsenz der Fraunhofer-Gesellschaft, bei dem die Vorteile für die französische und die deutsche Seite gleichermaßen Berücksichtigung finden. International wird dadurch die führende Position der europäischen Industrie in den lasergestützten Fertigungsverfahren weiter gefestigt.

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 Studien-, Diplom- und Doktorarbeiten

Die CLFA unterhält enge Kooperationen insbesondere auch mit mittelständischen Unternehmen. Mit Unterstützung der französischen Partner erfolgte 2007 die Ausgründung der Firma PolyShape durch Mitarbeiter der CLFA. Das Unternehmen bietet Dienstleistungen im Bereich generativer Fertigungsverfahren für französische Kunden an. Es kooperiert mit der CLFA und dem Fraunhofer ILT im Rahmen regionaler und europäischer Projekte.

Forschungsschwerpunkte

Im Rahmen des von BMBF und der französischen ANR geförderten Gemeinschaftsprojekts »PROBADUR« wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer LBF und den französischen Carnot-Instituten, Cetim und M.I.N.E.S., das lasergestützte Fügen faserverstärkter Thermoplaste hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse erlauben eine bessere Vorhersage der Verarbeitung derartiger Werkstoffe. Vor allem in Bereichen wie Automobilbau und Luftfahrt werden diese aus Gründen der Gewichtsersparnis konventionelle Werkstoffe mehr und mehr ersetzen.



In einem weiteren Forschungsvorhaben werden gemeinsam mit den Wissenschaftlern des Centre des Matériaux in Evry die Vorteile des laserbasierten Oberflächenstrukturierens zur Verbesserung der Haftungseigenschaften bei unterschiedlichen Beschichtungen untersucht.

In allen Projekten werden verschiedene Studien-, Diplom- und Doktorarbeiten aus Deutschland und Frankreich durchgeführt, wobei auch Erasmus-Stipendiaten ihre ersten Erfahrungen im internationalen Forschungsumfeld machen konnten.

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. Hierbei haben vor allem auch kleine und mittelständische Unternehmen die Möglichkeit, die Vorteile der Lasertechnik in einer unabhängigen Einrichtung kennenzulernen und zu erproben. Die offenen Entwicklungsplattformen erlauben den französischen Auftraggebern den Test und die Qualifizierung neuer lasergestützter Fertigungsverfahren.

Mitarbeiter

In der CLFA sind Mitarbeiter aus Frankreich und Deutschland gemeinsam tätig. Im Rahmen von Verbundprojekten wird der wechselseitige Personalaustausch zwischen den Standorten Aachen und Paris gefördert. Hierdurch wird den Mitarbeitern die Möglichkeit geboten, ihre Kompetenz insbesondere im Hinblick auf Mobilität und internationales Projektmanagement zu vertiefen.

Ausstattung

Neben der am Fraunhofer ILT zur Verfügung stehenden Einrichtung verfügt die CLFA über eine eigene Infrastruktur im Centre des Matériaux Pierre-Marie Fourt der École des Mines de Paris in Evry im Süden von Paris. Hierbei besteht auch Zugriff auf die Kompetenz und Infrastruktur im Bereich der Materialwissenschaften des Instituts. Kunden- und projektorientiert kann auch die Infrastruktur der anderen französischen Partner mit genutzt werden.

Standorte

Paris - im Zentrum von Paris in der École Nationale Supérieure des Mines de Paris, MINES ParisTech.

Evry - ca. 40 km südlich von Paris in den Räumen des Centre des Matériaux Pierre-Marie Fourt.

Ansprechpartner



Dr. Wolfgang Knapp
Direktor

Telefon +33 1 4051-9476
Fax +33 1 4634-2305
wolfgang.knapp@ilt.fraunhofer.de
www.ilt.fraunhofer.de/ger/100097.htm

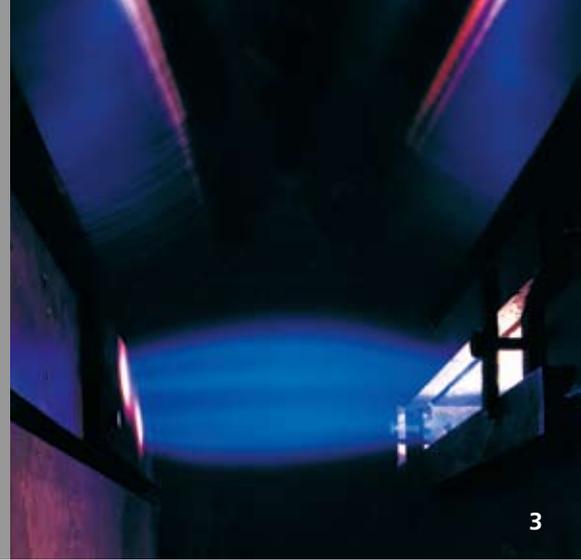
CLFA c/o Armines MINES ParisTech
60 Boulevard Saint-Michel
75272 PARIS Cedex 6, Frankreich



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

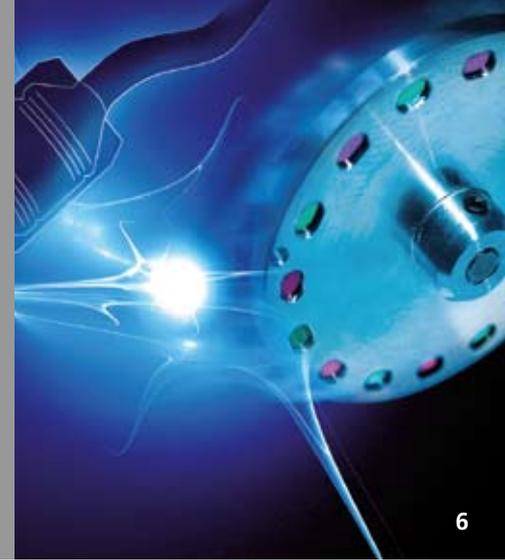
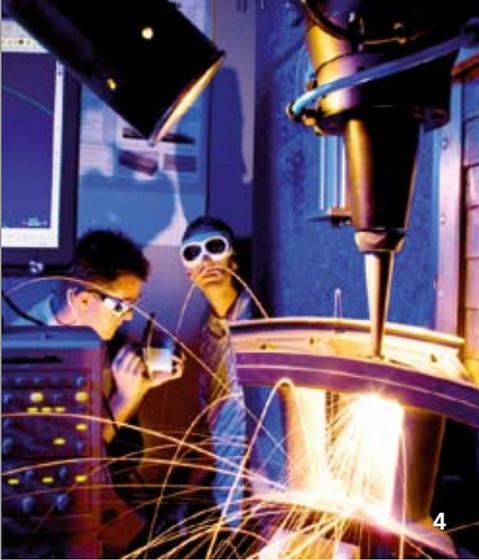
Prof. Dr. Andreas Tünnermann (Verbundvorsitzender)
Telefon +49 3641 807-201

Susan Oxfart (Verbundassistentin)
Telefon +49 3641 807-207
susan.oxfart@iof.fraunhofer.de

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Das Fraunhofer IOF entwickelt zur Bewältigung drängender Zukunftsfragen in den Bereichen Energie und Umwelt, Information und Sicherheit sowie Gesundheit und Medizintechnik Lösungen mit Licht. Die Kompetenzen umfassen die gesamte Prozesskette vom Optik- und Mechanik-Design über die Entwicklung von Fertigungsprozessen für optische und mechanische Komponenten sowie Verfahren zur Systemintegration bis hin zur Fertigung von Prototypen. Schwerpunkte liegen auf den Gebieten multifunktionale optische Schichtsysteme, Mikro- und Nanooptik, Festkörperlichtquellen, optische Messsysteme und opto-mechanische Präzisionssysteme.
www.iof.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für

Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP

Die Kernkompetenzen des Fraunhofer FEP sind die Elektronenstrahltechnologie, die plasmaaktivierte Hochratebedampfung und die Hochrate-PECVD. Die Arbeitsgebiete umfassen die Vakuumbeschichtung sowie die Oberflächenbearbeitung und -behandlung mit Elektronen und Plasmen. Neben der Entwicklung von Schichtsystemen, Produkten und Technologien ist ein wichtiger Schwerpunkt die Aufskalierung der Technologien für die Beschichtung und Behandlung großer Flächen mit hoher Produktivität. www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Mit über 350 Patenten seit 1985 ist das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik 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

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Das Fraunhofer IST bündelt als industrienahes FuE-Dienstleistungszentrum Kompetenzen auf den Gebieten Schichtherstellung, Schichtanwendung, Schichtcharakterisierung und Oberflächenanalyse. Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure arbeiten daran, Oberflächen der verschiedensten Grundmaterialien neue oder verbesserte Funktionen zu verleihen, um auf diesem Wege innovative, marktgerechte Produkte zu schaffen. Das Institut ist in folgenden Geschäftsfeldern tätig: Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrt, Werkzeuge, Energie, Glas und Fassade, Optik, Information und Kommunikation, Mensch und Umwelt. www.ist.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Fraunhofer IPM entwickelt und realisiert optische Sensor- und Belichtungssysteme. Bei den vorwiegend Laser-basierten Systemen sind Optik, Mechanik, Elektronik und Software ideal aufeinander abgestimmt. Die Lösungen sind besonders robust ausgelegt und jeweils individuell auf die Bedingungen am Einsatzort zugeschnitten. Auf dem Gebiet der Thermoelektrik verfügt das Institut über Know-how in Materialforschung, Simulation und Systemen. In der Dünnschichttechnik arbeitet Fraunhofer IPM an Materialien, Herstellungsprozessen und Systemen. www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS steht für Innovationen in den Geschäftsfeldern Fügen, Trennen sowie Oberflächentechnik und Beschichtung. 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

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 mehr als 80 Forschungseinrichtungen, davon 60 Institute. Mehr als 20 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,8 Milliarden Euro. Davon fallen 1,5 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 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 erarbeiten können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Niederlassungen sorgen für Kontakt 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 an Fraunhofer-Instituten wegen der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung 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 dem Lehr- und Forschungsgebiet für Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD und dem Lehr- und Forschungsgebiet Experimentalphysik »Nano-Optik und Metamaterialien« 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 drei Lehrstühlen und im Fraunhofer ILT ihre theoretischen Kenntnisse in die Praxis umsetzen. Auch die universitäre Weiterbildung wird gemeinsam gestaltet. In einem interdisziplinären Zusammenspiel von Ärzten und Ingenieuren wird beispielsweise ein Seminar zur zahnmedizinischen Weiterbildung angeboten. Lehre, Forschung und Innovation - das sind die Bausteine, mit denen die vier Lehrstühle und das Fraunhofer ILT Zukunft gestalten.

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT

Der Lehrstuhl für Lasertechnik LLT 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.

Untersuchungen zur Integration von Hochleistungsdiodenlasern mit Wellenleiterlasern und strahlformenden optischen Komponenten sowie die Entwicklung neuartiger integrierter Leistungslaser stehen im Fokus der Aktivitäten in der 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 Mikro-Bauteile 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 Aufbauraten, das Mikrobeschichten, die Prozesskontrolle und -regelung sowie die Neu- und Weiterentwicklung der eigenen Anlagen- und Systemtechnik.

Kontakt

Prof. Dr. Reinhart Poprawe M. A. (Leiter des Lehrstuhls)
 Telefon +49 241 8906-109
 Fax +49 241 8906-121
reinhart.poprawe@llt.rwth-aachen.de

Akad. Oberrat Dr. Ingomar Kelbassa (stellv.)
 Telefon +49 241 8906-143
ingomar.kelbassa@llt.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. Dr. Peter Loosen (Leiter des Lehrstuhls)
Telefon +49 241 8906-162
Fax +49 241 8906-121
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. Dr. Wolfgang Schulz
(Leiter des Lehr- und Forschungsgebiets)
Telefon +49 241 8906-204
Fax +49 241 8906-121
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. Dr. Thomas Taubner
Nano-Optik und Metamaterialien
Telefon +49 241 80-20260
Fax +49 241 80-620260
taubner@physik.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 vorerst bis Ende 2012 angelegten Projekt beteiligt.

Der mit ca. 40 Mio. Euro 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 km² 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 Mitarbeitern angesiedelter 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, intensivere Form der Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Unternehmen entstehen, denn schon heute hat keine andere Universität in Europa mehr anwendungsorientierte Großinstitute als die RWTH Aachen.

Hinter allem steht das ganzheitliche Konzept: Forschen, Lernen, Entwickeln, Leben; denn der RWTH Aachen Campus schafft nicht nur die ideale, repräsentative 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. Es folgt der Bebauungsplan und die Erschließung von Campus Westbahnhof für weitere 9 Cluster. 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

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

Am 18. Februar 2010 wurde feierlich der erste Spatenstich zum RWTH Aachen Campus durch RWTH-Rektor Prof. Ernst M. Schmachtenberg und NRW-Ministerpräsident Dr. Jürgen Rüttgers gesetzt. 92 Unternehmen, davon 18 internationale Key-Player, haben sich zusammen mit 31 Lehrstühlen der RWTH und einem Lehrgebiet der FH Aachen zur langfristigen Kooperation und zur Ansiedlung auf dem RWTH Campus in Melaten verpflichtet. Davon sollen in der ersten Phase von 2010 bis 2014 acht bis zehn Gebäudekomplexe mit insgesamt 60.000 m² Bruttogrundfläche in folgenden sechs Clustern entstehen:

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

Leiter des Clusters Photonik ist Prof. Dr. Reinhart Poprawe M.A. vom Fraunhofer ILT bzw. vom Lehrstuhl für Lasertechnik LLT.

Quelle: Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen, Projektplanung RWTH Aachen Campus.

Ansprechpartner

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



- 1 RWTH Aachen Campus I - Westbahnhof,
 Skizze: RKW Rhode Kellermann Wawrowsky,
 Düsseldorf.
- 2 RWTH Aachen Campus II - Melaten,
 Skizze: rha reicher haase + assoziierte, Aachen.

FORSCHUNGSERGEBNISSE 2011

Ausgewählte Forschungsergebnisse aus den Technologiefeldern des Fraunhofer ILT

- Laser und Optik 37 - 56
- Lasermaterialbearbeitung 57 - 112
- Medizintechnik und Biophotonik 113 - 120
- Lasermesstechnik und EUV-Technologie 121 - 131

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.

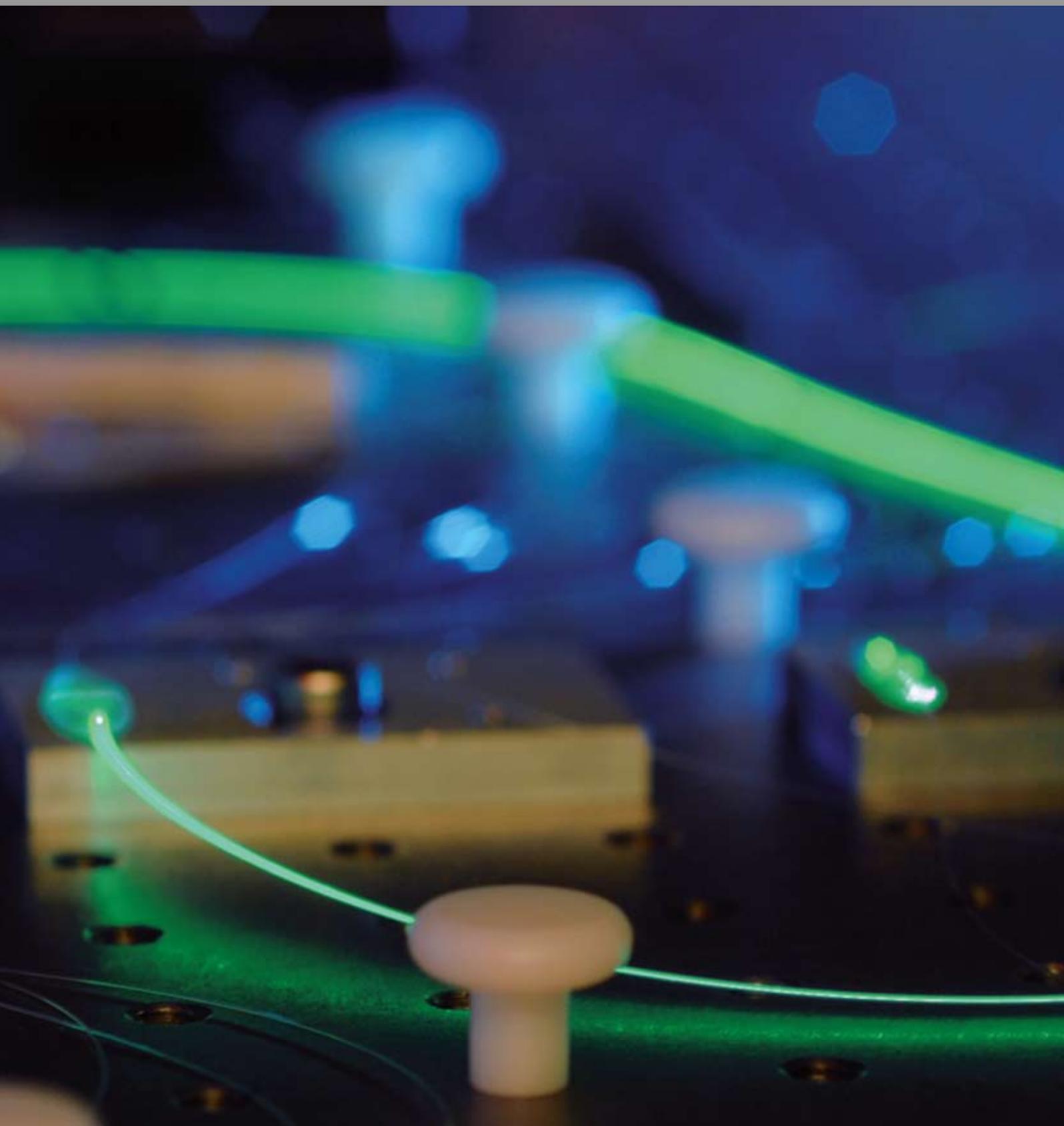
TECHNOLOGIEFELD LASER UND OPTIK

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 μW bis 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.

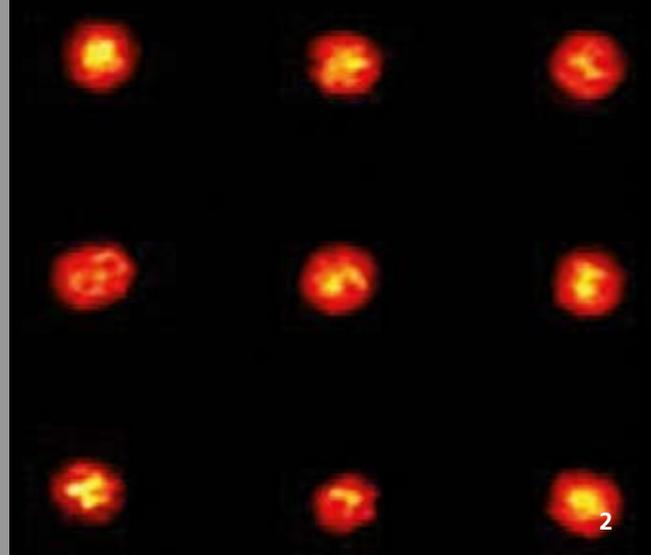
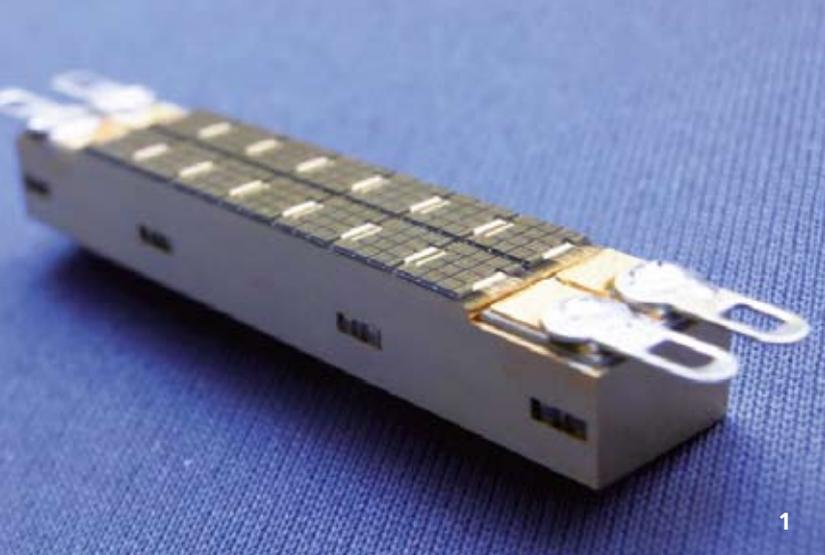
Darüber hinaus bietet das Technologiefeld hohe Kompetenz bei Strahlformung und Strahlführung, dem Packaging optischer Hochleistungskomponenten und dem Design optischer Komponenten. Auch die Auslegung hocheffizienter Freiformoptiken zählt zu den Spezialitäten der Experten. Die Anwendungsgebiete der entwickelten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

Modellierung vertikal emittierender Diodenlaser (VECSEL)	40
Simulation und Analyse anwendungsangepasster Volumenbeugungsgitter	41
Pick & Align – Fügen von optischen Komponenten bei aktiver Justage	42
Pockelszelle für den Einsatz in robusten LIDAR-Strahlquellen für die Luft- und Raumfahrt	43
Modellprädikative Regelung aktiver optischer Systeme	44
Erbium-Festkörperlaser bei 1,6 μm Emissionswellenlänge	45
Konzeptstudie zum GALA-Laser-Transmitter der EJSM-Satelliten-Mission	46
Single-Frequency-Pumpquelle für ein Methan-IPDA-LIDAR	47
Durchstimmbare Laserstrahlquelle im mittleren Infrarot	48
Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Strahlquelle bei 515 nm Maßgeschneiderte transversale Moden	49
Hochgeschwindigkeits-Polygonscanner zur Ultrakurzpulsbearbeitung	51
Herstellung von Faser-Preformen und anderen 3D-Volumenstrukturen mittels inversem Laserbohren	52
Faserintegrierter Ramanverstärker für Pikosekunden-Pulse	53
Zweistufiger Linearfaserverstärker im variablen Piko- und Nanosekundenbereich	54
Monolithischer, gewinngeschalteter Faserlaser mit Spitzenleistung im kW-Bereich	55
Zeitlich und spektral aufgelöste Simulation gepulster Faserlaser	56



MODELLIERUNG VERTIKAL EMITTIERENDER DIODENLASER (VECSEL)

Aufgabenstellung

Oberflächenemittierende Halbleiterlaser mit Vertikalresonator (VCSEL) sind aufgrund ihrer Vorteile hinsichtlich der Herstellungskosten, des Stromverbrauchs, der Modulierbarkeit und des Abstrahlprofils sowie der einfachen Realisierbarkeit von Arrays ein vielversprechendes Konkurrenzkonzept zu konventionellen, kantenemittierenden Diodenlasern. Die geringen Ausgangsleistungen von einzelnen mW beschränkten den Einsatz von VCSEL bislang vorwiegend auf die optische Datenübertragung und Sensorik. Im letzten Jahrzehnt konnten mehrfach Hochleistungs-VCSEL (Large-Area-VCSEL) mit Ausgangsleistungen in der Größenordnung von 1 W demonstriert werden. Die Bauform der VCSEL erlaubt dies nur bei hoch multimodiger Emission, d. h. geringer Brillanz. Hochleistungsemitter hoher Brillanz lassen sich durch die Kombination des VCSEL mit externer Resonatoroptik (VECSEL) realisieren, womit Oberflächenemitter auch für bisher kantenemitterdominierte Anwendungsfelder interessant werden. Am Fraunhofer ILT wird in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl TOS der RWTH Aachen University im Rahmen eines Auftrags von Philips Simulationssoftware zur Optimierung des Resonatordesigns und zur Auslegung von Strahlformungsoptiken für V(E)CSEL entwickelt.

1 VCSEL-Modul mit Mikrolinsenarray.

2 Abstrahlcharakteristik eines VECSEL-Arrays aus 9 Emittern.

Vorgehensweise

Derzeit wird ein Modell zur Vorhersage der betriebsstromabhängigen Leistungs- und Abstrahlcharakteristik des VECSEL mit dem Ziel der Optimierung des Einzelemitters entwickelt. Das Modell basiert auf einer Zerlegung des Strahlungsfelds in die Resonator-Eigenmoden und der Simulation der Modenauswahl durch Beschreibung der Licht-Medium-Wechselwirkung in der Ratengleichungsnäherung. Die Herausforderung besteht hier vor allem in der Berechnung der Eigenmoden des zusammengesetzten Systems aus dem Halbleiterchip mit komplexer dreidimensionaler Brechzahlverteilung und dem externen Resonator. Im Anschluss an die Optimierung des Einzelemitters ist die Auslegung von waferintegrierbarer Mikrooptik für Emitterarrays geplant.

Ergebnis

Ein VECSEL-Modell ist in großen Teilen entwickelt und implementiert. Experimentelle Ergebnisse können teilweise reproduziert und erste brillanzlimitierende Effekte konnten identifiziert und quantifiziert werden.

Anwendungsfelder

Hochleistungs-V(E)CSEL-Arrays eignen sich für Anwendungen, die Leistungen bis zu einigen kW bei niedriger oder mittlerer Brillanz erfordern. Beispiele sind das Pumpen von Festkörperlaser oder die Trocknungsprozesse in der Druckindustrie.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Thomas Schwarz
Telefon +49 241 8906-657
thomas.schwarz@ilt.fraunhofer.de

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



SIMULATION UND ANALYSE ANWENDUNGSANGEPASSTER VOLUMENBEUGUNGSGITTER

Aufgabenstellung

Volumenbeugungsgitter (VBG) werden zur Stabilisierung der Zentralwellenlänge und zur Reduktion der Bandbreite von Hochleistungsdiodenlasern sowie zur inkohärenten spektralen Überlagerung mit kleinem Zentralwellenlängenabstand $\Delta\lambda < 3$ nm eingesetzt. Entwicklungsbedarf besteht bei der Simulation applikationsspezifischer VBG, der Herstellung verbesserter VBG durch Zweistrahlinterferenz sowie der Entwicklung von Messverfahren zur Charakterisierung der VBG-Eigenschaften.

Vorgehensweise

Die Berechnung der Charakteristika anwendungsangepasster VBG wird basierend auf einem Matrizenansatz für Schichtsysteme für unterschiedliche Herstellungsparameter durchgeführt. Zur Erprobung der Eigenschaften von VBG wurde ein Teststand entwickelt. Als Strahlquellen werden wahlweise ein durchstimmbarer Laser, eine spektral stabilisierte Laserdiode oder eine breitbandig emittierende Superlumineszenzdiode eingesetzt.

Ergebnis

Durch Anpassung der Intensitätsverteilung bei der Herstellung der VBG können Winkel- und Wellenlängenselektivität der Gitter gezielt verändert werden. Mittels Simulationsrechnungen werden genaue Vorgaben für den Fertigungsprozess ermittelt.

Beispielsweise ist eine Reduktion der Nebenmaxima durch eine gaußförmige Apodisationsfunktion von 8 dB auf bis zu 60 dB möglich. Störgrößen im Herstellungsprozess der VBG verursachen Variationen der Beugungseffizienz. Diese konnten mit dem entwickelten Teststand detektiert werden.

Anwendungsfelder

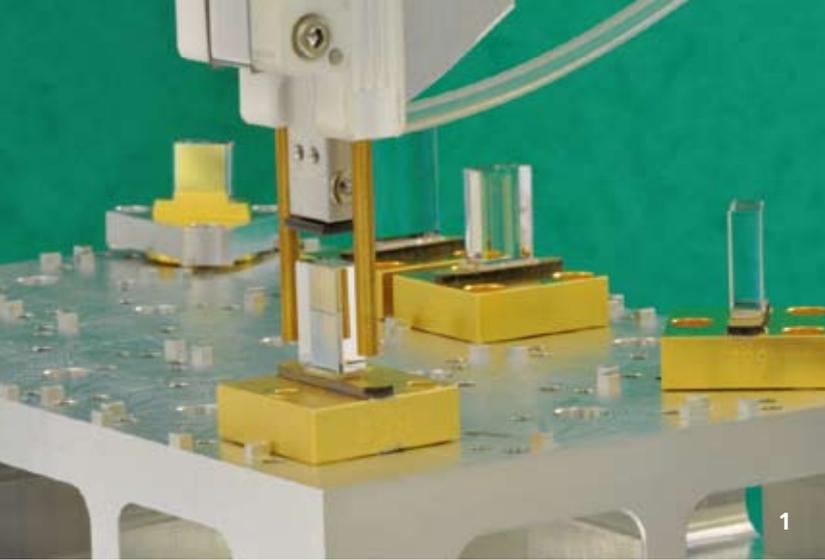
Die Optimierung der Fertigungs- und Prüfverfahren für VBG ermöglicht eine dichtere spektrale Überlagerung bei der inkohärenten Leistungskalierung von Diodenlasern und damit brillantere Diodenlaserstrahlquellen. Mit spektral stabilisierten Diodenlasern können außerdem durch Nutzung vorteilhafter Pumpbänder die Eigenschaften von Festkörper- und Faserlasern verbessert werden.

Der Messplatz ermöglicht auch die orts aufgelöste Vermessung der spektralen und winkelabhängigen Beugungsverteilungen kommerzieller Gitter.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Stefan Hengesbach
Telefon +49 241 8906-565
stefan.hengesbach@ilt.fraunhofer.de

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



PICK & ALIGN – FÜGEN VON OPTISCHEN KOMPONENTEN BEI AKTIVER JUSTAGE

Aufgabenstellung

Die Idee, Löttechniken zum Fügen optischer Systeme einzusetzen, gewinnt nicht nur bei Weltraumapplikationen wachsende Beliebtheit. Auch Lasersysteme für den Einsatz in der Industrie profitieren von einem Fügeverfahren, das den Anforderungen hinsichtlich der Güte und Reproduzierbarkeit der Verbindung bei gleichzeitiger Justierbarkeit optischer Komponenten gerecht wird.

Vorgehensweise

Das am Fraunhofer ILT bestehende Widerstandslötverfahren Pick & Align wird für Lötverbindungen zwischen Materialien wie Quarz, BK7 oder SF6 und keramischen Werkstoffen eingesetzt. Entscheidend dabei ist die aktive Justage optischer Komponenten im aufgeschmolzenen Lot. Ein Sechs-Achs-Manipulator ermöglicht das hochpräzise Positionieren während des Lötprozesses. Um die Robustheit und Reproduzierbarkeit der entstehenden Fügestelle weiter zu steigern, wird das Lötverfahren bezüglich Langzeitstabilität und Positionstreu untersucht. Insbesondere Oberflächenbeschaffenheit und Metallisierung der Fügepartner beeinflussen die Fügestelle entscheidend und müssen auf thermische und mechanische

Beanspruchung abgestimmt werden. Darüber hinaus werden verschiedene Lotgeometrien untersucht, um die Positionstreu optischer Komponenten sowohl während des Lötprozesses als auch bei Umweltbelastungen zu optimieren.

Ergebnis

Mittels Pick & Align können Baugruppen aus optischen, keramischen und metallischen Komponenten hergestellt werden. Die durch Mehrfachaufschmelzen realisierte Justierbarkeit zwischen Optik und metallischem Grundsubstrat während des Lötprozesses erreicht eine Genauigkeit $< 50 \mu\text{rad}$. Gleichzeitig konnte eine hohe Robustheit der Lötverbindung im Temperaturbereich von -40 °C bis $+50 \text{ °C}$ durch Scheruntersuchungen nachgewiesen werden.

Anwendungsfelder

Das Widerstandslötverfahren Pick & Align ermöglicht bei automatisierter Montagetechnik das sukzessive Aufbauen von Strahlformungsoptiken und Umlen- bzw. Resonatorspiegeln für thermisch und mechanisch belastete Laser- und Optiksyste

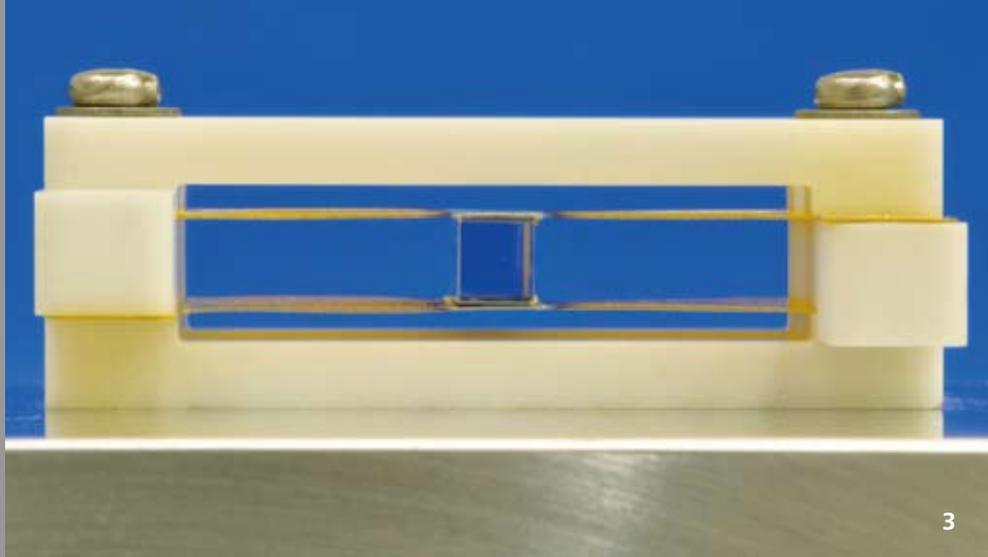
Ansprechpartner

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

Dipl.-Ing. Michael Leers
 Telefon +49 241 8906-343
 michael.leers@ilt.fraunhofer.de

1 Pick & Align: Aktive Justage im Lötprozess.

2 Gelötete Baugruppe aus Quarz, Keramik und metallischem Grundkörper.



POCKELSZELLE FÜR DEN EINSATZ IN ROBUSTEN LIDAR-STRAHLQUELLEN FÜR DIE LUFT- UND RAUMFAHRT

Aufgabenstellung

Für den Einsatz in LIDAR-Strahlquellen für die Atmosphärenforschung werden mechanisch und thermisch stabile Laserkomponenten benötigt. Aufgrund der unterschiedlichen optischen, elektrischen und thermomechanischen Randbedingungen stellt die Montage der in der Pockelszelle eingesetzten Kristalle eine besondere Herausforderung dar. Kommerziell verfügbare Pockelszellenmodule sind aufgrund der verwendeten Materialien, Befestigungs- und Kontaktierungsmethoden nicht geeignet. Aus diesem Grund soll das Fügen und Kontaktieren des Kristalls mittels eines Lötverfahrens untersucht werden. Hierbei muss dem Wärmeausdehnungskoeffizienten, der entlang der Kristallebenen unterschiedlich ist ($\alpha_{11}/\alpha_{33} = 1/9$), eine besondere Beachtung zukommen. Insbesondere bei der Start- und Wartungsphase können thermische Wechsellasten von -40 °C bis $+70\text{ °C}$ auftreten. Dabei kann die mechanische Festigkeit des Kristalls überschritten werden.

Vorgehensweise

Die mechanische Belastung im BBO-Kristall kann reduziert werden, indem die tragenden Strukturen elastisch ausgeführt werden. Dazu wird der BBO-Kristall zwischen zwei strukturierte Bleche eingelötet, auf die Lot aufgedampft wurde. Das Design reduziert die mit dem Lot in Kontakt befindliche Fläche des Kristalls. Des Weiteren lässt die Struktur eine Verformung des Blechs zu. Zur elektrischen Isolierung wird das Gehäuse aus einer Keramik hergestellt.

Ergebnis

Die am Fraunhofer ILT entwickelte Montagemethode für Pockelszellen gewährleistet eine mechanisch stabile Verbindung und gleichzeitig ein günstiges Verhalten des Moduls bei thermomechanischer Belastung. Mit einem Kristall der Abmessung $3 \times 3 \times 15\text{ mm}^3$ wird die Viertelwellenspannung mit 4 kV deutlich übertroffen. Die Pockelszelle wurde erfolgreich in einem gütegeschalteten Festkörperlaser getestet.

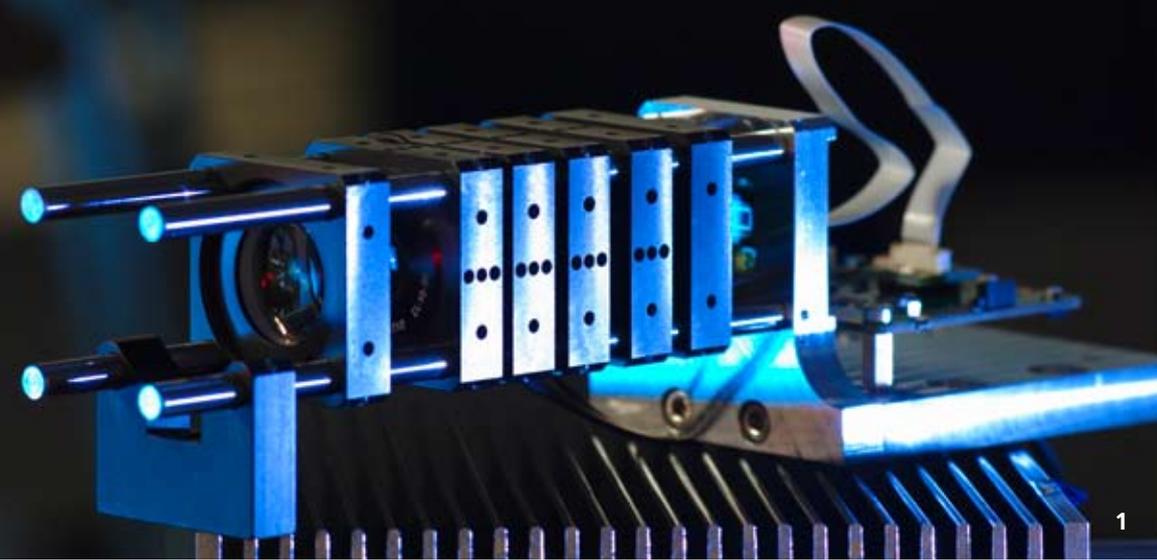
Anwendungsfelder

Das beschriebene Verfahren zur Montage von Pockelszellen eignet sich neben dem Einsatz in Strahlquellen für die Luft- und Raumfahrt grundsätzlich auch für die Fertigung von kompakten Pockelszellen für industrielle Festkörperlaser, die zum Beispiel in der Medizintechnik und der Lasermaterialbearbeitung eingesetzt werden.

Ansprechpartner

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

Dipl.-Ing. Michael Leers
Telefon +49 241 8906-343
michael.leers@ilt.fraunhofer.de



MODELLPRÄDIKATIVE REGELUNG AKTIVER OPTISCHER SYSTEME

Aufgabenstellung

Geregelte Systeme erlauben eine aktive Anpassung des Systemverhaltens auf sich ändernde Prozessbedingungen. Bei der Übertragung von klassischen, auf Rückkopplung einer Regelgröße basierenden Regelungsansätzen auf optische Systeme werden derzeit insbesondere folgende Defizite identifiziert: Die Erfassung optischer Gütekriterien erfordert oftmals teure und zeitintensive Messmittel; in Zusammenhang mit optischen Regelstrecken werden oftmals Mehrgrößencharakter sowie Nichtlinearitäten beobachtet. Die Anwendung einer modellprädikativen Regelung kann diese Hindernisse bei der Regelung komplexer optischer Systeme beheben, indem durch die Verwendung von Simulationsmodellen Steuergrößen auf Basis des simulierten Systemverhaltens vorhergesagt werden.

Vorgehensweise

Auf Basis bestehender statischer Simulationsmodelle zur Optimierung und Bewertung des optischen Systemverhaltens wird durch die dynamische Einbindung dieser statischen Simulationsmodelle in eine Ausführungsplattform die Umwandlung simulierter Parameter in physikalische Stellgrößen zur weiteren Ansteuerung der aktiven Komponenten realisiert.

Ergebnis

Am Beispiel des nichtlinearen Mehrgrößenverhaltens eines elektrooptischen Zoom-Teleskops kann das Prinzip der modellprädikativen Regelung demonstriert werden. Die Abbildung des optischen Systemverhaltens erfolgt mittels der Ray-Tracing-Software ZEMAX. Die Erzeugung von Stellgrößen auf Basis der simulierten Regelstrecke erfolgt durch die Verknüpfung von ZEMAX mit der Prozessumgebung von LabVIEW. Basierend auf den Vorgabewerten bezüglich des Abbildungsmaßstabs sowie des Objektabstands kann das Systemverhalten ohne Rückkopplung erforderlicher Regelgrößen eingestellt werden.

Anwendungsfelder

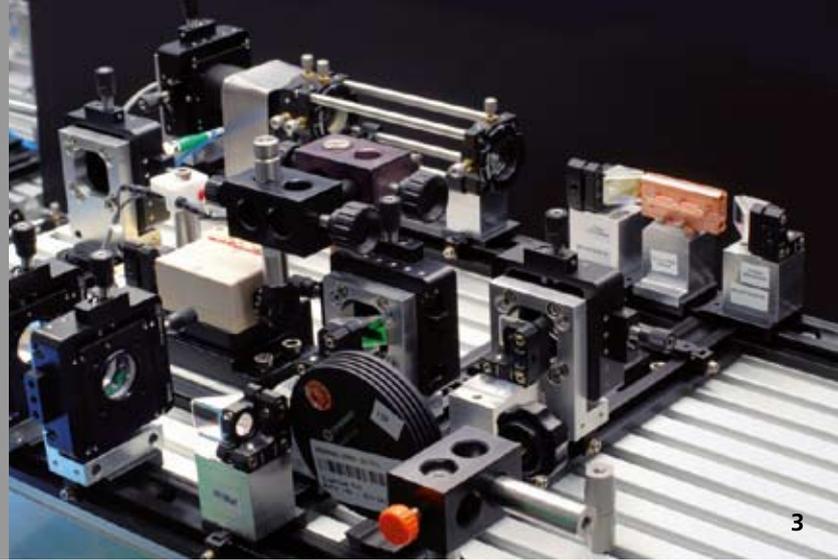
Die Ablösung der konventionellen Rückkopplung von Regelgrößen durch die modellprädikative Regelung bietet sich für aktive optische Systeme, insbesondere für größere Stückzahlen, an. Zudem ist die Regelung von Systemen möglich, bei denen für die Erfassung der Regelgröße bislang kein Messmittel existiert.

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 *Elektrooptisches Zoom-Teleskop.*



ERBIUM-FESTKÖRPERLASER BEI 1,6 μm EMISSIONS- WELLENLÄNGE

Aufgabenstellung

Die Verteilung und Menge der Treibhausgase CO_2 und CH_4 in der Atmosphäre haben Einfluss auf das Klima und sind deswegen Gegenstand der Forschung. Zu ihrer Messung mittels Lidar-Verfahren können Absorptionslinien der Moleküle im Bereich um $1,6 \mu\text{m}$ herangezogen werden. Dafür ist schmalbandige (longitudinal einmodige) Laserstrahlung mit einer Linienbreite unter 20 MHz erforderlich. Dies wird bislang mit nichtlinearen Konverterstufen (OPO/OPA) realisiert. Die Erzeugung solcher Laserstrahlung mittels Festkörperlasern basierend auf erbiumdotierten Kristallen verzichtet auf nicht-lineare Prozesse und verspricht Vorteile hinsichtlich Effizienz, Robustheit und Baugröße.

Vorgehensweise

Es wird ein Festkörperlaser mit einem Erbium-dotierten Laserkristall aufgebaut, der mit Erbium-dotierten Faserlasern bei 1532 nm Wellenlänge gepumpt wird. Der Festkörperlaser wird mit einer Repetitionsrate von 100 Hz gütegeschaltet und mit aktiver Resonatorlängenregelung »single-frequency« betrieben.

Ein Computermodell, das auf die Spezifikation der zu untersuchenden Laserquellen (kontinuierliche Pumpquelle, gepulster Laser, Sättigung der Pumplichtabsorption und thermische Besetzung des unteren Laserniveaus) angepasst ist, wird entwickelt. Die Skalierungsgrenzen bezüglich der Effizienz, Energie und Repetitionsrate werden erarbeitet.

Ergebnis

Ein Laseroszillator mit einem ErLu:YAG als Laserkristall wurde aufgebaut und im kontinuierlichen Betrieb vermessen. Mit dem Aufbau, der für den Pulsbetrieb optimiert ist, wurde eine Steigungseffizienz im kontinuierlichen Betrieb von 50 Prozent erzielt. Aus 7,5 W Pumpleistung wurden 1,3 W Ausgangsleistung bei einer Wellenlänge von 1645 nm gewonnen. Rechnungen sagen Pulsenergien bis 10 mJ bei 10 Prozent optisch-optischer Effizienz aus dem Oszillator voraus. Die Effizienz wird durch die Zerstörschwellen der Optiken begrenzt. Höhere Repetitionsraten führen zu einer Effizienzsteigerung.

Anwendungsfelder

Die bisherigen Ergebnisse sind ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu einer direkt emittierenden Laserquelle für die zur Methandetektion relevanten Wellenlängen. Laserstrahlung mit Wellenlängen um $1,6 \mu\text{m}$ findet auch in der Medizintechnik Anwendung. Zusätzlich kommt eine Nutzung zur Laser-materialbearbeitung von im sichtbaren Wellenlängenbereich transparenten Materialien infrage.

Diese Arbeiten wurden durch das BMBF unter dem Förderkennzeichen 01 LK 0905 B gefördert.

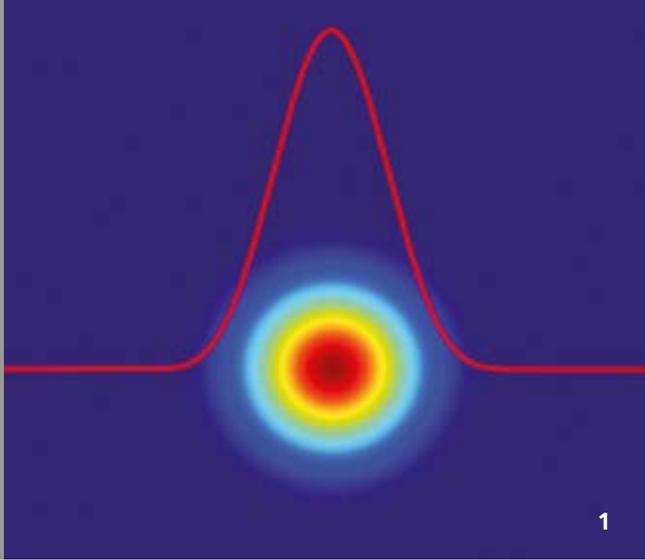
Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Ansgar Meissner
Telefon +49 241 8906-132
ansgar.meissner@ilt.fraunhofer.de

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

2 Gepumpter Laserstab aus
Erbium-dotiertem Kristall.

3 Laboraufbau des Laseroszillators.



KONZEPTSTUDIE ZUM GALA-LASER-TRANSMITTER DER EJSM-SATELLITEN- MISSION

Aufgabenstellung

EJSM-Laplace (neuer Name: JUICE) ist eine von drei vorgeschlagenen Missionen im Rahmen des Cosmic-Vision-Programms der ESA. Unter anderem sollen von einem Orbiter aus die Morphologie und die Tidendeformation des Jupitermonds Ganymed mit einem Laser-Altimeter (GALA) vermessen werden. Die Laserquelle dafür muss kompakt, effizient und robust sein und soll für verschiedene Überflughöhen des Orbiters über Ganymed jeweils angepasste Pulsparameter zur Verfügung stellen. Dies sind eine Pulsenergie von 25 mJ bei einer Repetitionsrate von 30 Hz bzw. 4 mJ bei 87,5 Hz, jeweils mit einer Pulsdauer von 5 ns, einer Emissionswellenlänge von 1064 nm und einer beugungsbegrenzten Strahlpropagation.

Vorgehensweise

Mithilfe analytischer und numerischer Berechnungen werden unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen an Effizienz, Volumen, Masse, Robustheit verschiedene Konzeptvergleiche durchgeführt. Eine Vorauswahl möglicher Laserkonzepte erfolgt unter Berücksichtigung der Belastbarkeit mit intensiver ionisierender Strahlung. Verglichen werden:

- Seiten- und Endpumpen des Laserstabs
- Ein einzelner Oszillator mit zwei Betriebsmodi, zwei getrennte Oszillatoren sowie ein Oszillator-Verstärker-Setup
- Stabile und instabile Resonatoren

Ergebnis

Vorteilhaft für die Realisierung der gewünschten Laserparameter unter den genannten Randbedingungen sind zwei getrennte Oszillatoren, ein Oszillator mit stabilem Resonator und einer mit instabilem Resonator, jeweils basierend auf einem seitengepumpten Stab. Der Effizienzgewinn überwiegt die Nachteile des größeren Bauraums und Gewichts.

Anwendungsfelder

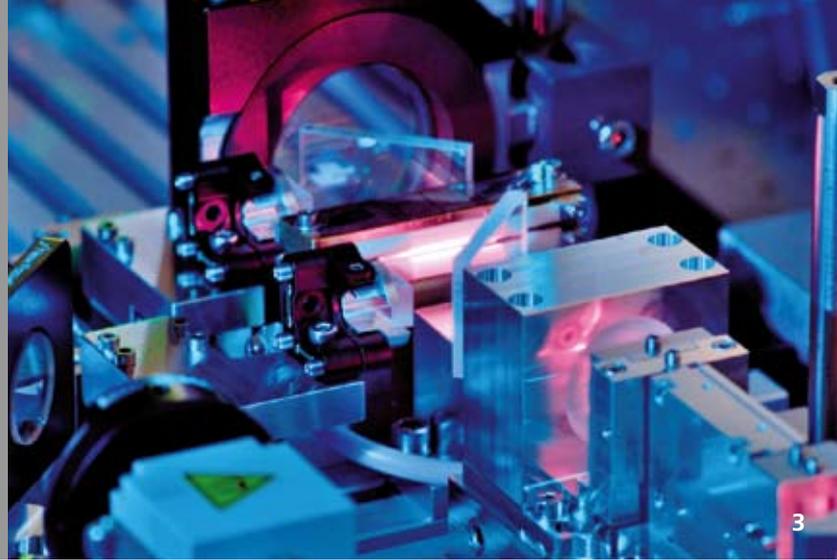
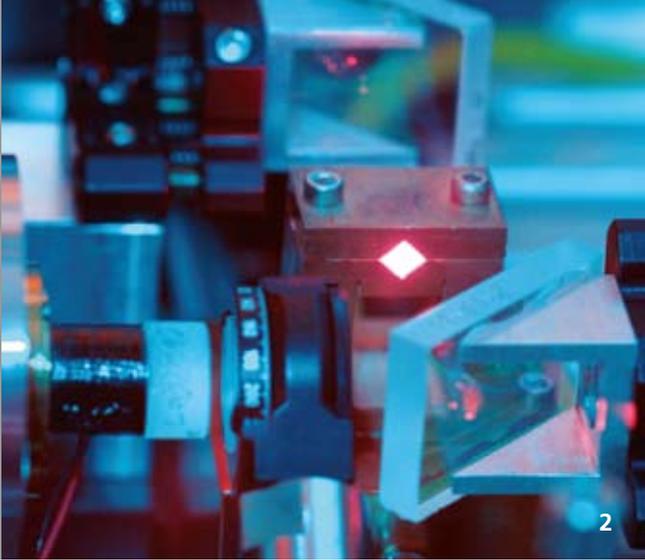
Die hier verwendeten Methoden zur umfassenden Analyse von räumlichen und energetischen Laserstrahleigenschaften in Laserresonatoren und -verstärkern können auf jedes optische System übertragen werden. Insbesondere ist die Berechnung zweidimensionaler Feldverteilungen (auch polarisationsaufgelöst) möglich. Neben der Auslegung von Resonatoren und Verstärkern wird beispielsweise eine virtuelle Fehlersuche in bestehenden optischen Systemen ermöglicht.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Ansgar Meissner
Telefon +49 241 8906-132
ansgar.meissner@ilt.fraunhofer.de

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

1 *Simulierte Intensitätsverteilung im Fernfeld eines Laserstrahls aus einem instabilen Resonator.*



SINGLE-FREQUENCY-PUMPQUELLE FÜR EIN METHAN-IPDA-LIDAR

Aufgabenstellung

Für die Fernerkundung geringer Methankonzentrationen in der Atmosphäre hat sich das IPDA-Verfahren (Integrated Path Absorption) LIDAR etabliert. Hierfür kann gepulste Laserstrahlung bei einer Wellenlänge um $3\ \mu\text{m}$ verwendet werden, die üblicherweise durch Frequenzkonvertierung von $1\text{-}\mu\text{m}$ -Strahlung in Optischen Parametrischen Oszillatoren (OPOs) generiert wird. Für eine helikoptergetragene Anwendung zur Überwachung von Gas-Pipelines muss diese $1\text{-}\mu\text{m}$ -Pumpquelle auf den Arbeitspunkt maßgeschneidert werden. Dabei werden neben dem longitudinal einmodigen Betrieb ebenfalls eine exzellente Strahlqualität ($M^2 < 1,5$) sowie eine hohe Energiestabilität unter rauen Umgebungsbedingungen hinsichtlich Temperatur und Vibration gefordert. Um ein effizientes Scannen und wirtschaftliche Flächenraten zu ermöglichen, werden Wiederholraten bis zu $1\ \text{kHz}$ bei einer Pulsenergie von etwa $16\ \text{mJ}$ verlangt.

Vorgehensweise

Um die hohen spektralen und geometrischen Anforderungen unter Vibrationslast und gleichzeitig die Forderungen bezüglich Pulsenergie und mittlerer Leistung zu erfüllen, wurde ein MOPA (Master Oscillator Power Amplifier)-System konzipiert, das aus einem stabilen Oszillator und einer INNOSLAB-Verstärkerstufe besteht. Dabei wird der Oszillator mit dem Ramp&Fire-Verfahren longitudinal stabilisiert, um den einmodigen Betrieb zu gewährleisten.

Ergebnis

Es wurde ein Laboraufbau entwickelt, an dem die geforderten Strahleigenschaften nachgewiesen wurden. Dabei wird bei einer Wiederholrate von $1\ \text{kHz}$ eine Pulsenergie von $3,1\ \text{mJ}$ im Oszillator und $18,1\ \text{mJ}$ im Verstärker (Summe: $21,2\ \text{mJ}$) erzeugt bei einer Beugungsmaßzahl $< 1,3$ und einer Pulsdauer von etwa $13\ \text{ns}$. Der longitudinale Einmodenbetrieb ist dabei inhärent durch das leistungsfähige Stabilisierungsverfahren auch unter Störungen gewährleistet. Die geforderte Energiestabilität wurde ebenfalls nachgewiesen.

Anwendungsfelder

Neben der oben genannten Anwendung können diese Arten der Laserquellen in unterschiedliche Wellenlängenbereiche konvertiert und besonders für die Fernerkundung unterschiedlicher klimatischer Parameter wie Stoffkonzentrationen von Spurengasen oder Windgeschwindigkeiten eingesetzt werden.

Ansprechpartner

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

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

2 Stab-Oszillator des Labordemonstrators.

3 INNOSLAB-Verstärkerstufe des Labordemonstrators.



DURCHSTIMMBARE LASERSTRAHLQUELLE IM MITTLEREN INFRAROT

Aufgabenstellung

In der sogenannten Fingerprint-Region im mittleren infraroten Wellenlängenbereich liegen Absorptionslinien einer Vielzahl von Elementen und Molekülen. Für die spektroskopische Analyse der chemischen Zusammensetzung werden Laserstrahlquellen in diesem Wellenlängenbereich benötigt. In Verbindung mit der Nahfeldmikroskopie sind außerdem räumliche Auflösungen im Bereich einiger 10 nm möglich. Strahlquellen nach dem Stand der Technik sind derzeit nicht mit den geforderten Eigenschaften erhältlich.

Vorgehensweise

Zur Erzeugung der Wellenlängen im mittleren Infrarot wird ein System entwickelt, das auf Basis eines kommerziellen Pikosekunden-Lasers in zwei nichtlinear optischen Konversionsstufen den geforderten Wellenlängenbereich liefert.

Ergebnis

Die erste Konversionsstufe ist ein optisch parametrischer Generator unter Verwendung periodisch gepolter Lithiumniobatkristalle. Die erzeugten Wellen sind über die Temperatur durchstimmbare von 1,7 μm bis 2,05 μm (Signal) bzw. 2,28 μm bis 2,8 μm (Idler).

In der zweiten Konversionsstufe wird die Differenzfrequenz zwischen diesen beiden Wellen erzeugt. Derzeit wird mit einem AgGaSe_2 -Kristall über Winkelabstimmung ein Wellenlängenbereich von 9 μm bis 14 μm erreicht. Dies entspricht Wellenzahlen von 1125 cm^{-1} bis 720 cm^{-1} mit einer spektralen Halbwertsbreite zwischen 30 cm^{-1} und 70 cm^{-1} . Die mittlere Leistung beträgt dabei bis zu 10 mW. Die Standardabweichung der Leistung beträgt dabei über eine Stunde nur 0,38 Prozent.

Unter Verwendung von Kristallen in anderen Schnittwinkeln bzw. anderer Kristallmaterialien können sowohl der Abstimmbereich als auch die Linienbreite weiter ausgedehnt werden.

Anwendungsfelder

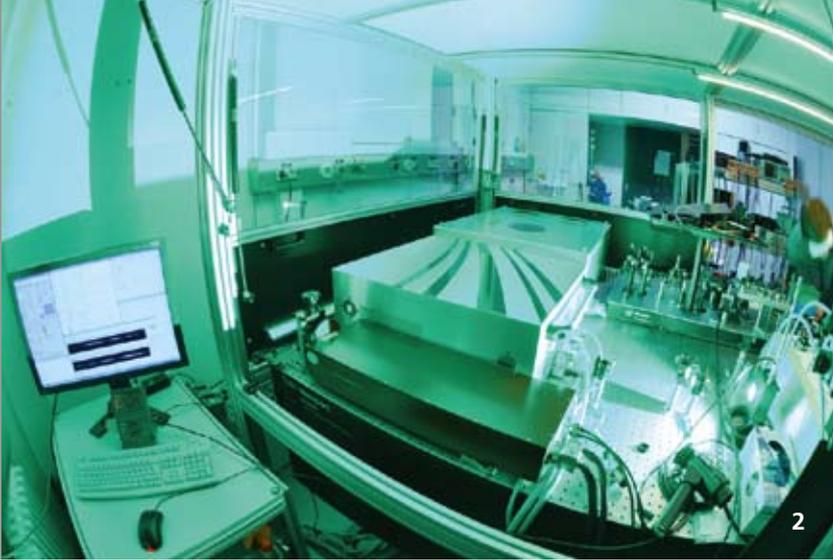
Die Anwendung des entwickelten Lasersystems als Lichtquelle für die Nahfeldmikroskopie ermöglicht Probenanalysen aus einem breiten Forschungs- und Entwicklungsgebiet, das von der Bioanalytik über Halbleitertechnik und Plasmonik bis hin zu nanopartikeldotierten Kunstfasern reicht.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Jochen Wüppen
Telefon +49 241 8906-303
jochen.wueppen@ilt.fraunhofer.de

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

1 Kristallofen mit PPLN-Kristall.



HOCHLEISTUNGS-ULTRA-KURZPULS-STRAHLQUELLE BEI 515 NM

Aufgabenstellung

Im Bereich der Mikromaterialbearbeitung ermöglichen Ultrakurzpuls Laser einen präzisen und effizienten Materialabtrag bei gleichzeitig minimiertem Wärmeeintrag. Die Frequenzverdopplung von infraroten sub-ps-Pulsen erschließt neue Einsatzmöglichkeiten bei der Bearbeitung von Materialien, die im Infraroten nur wenig oder gar nicht absorbieren. Darüber hinaus resultiert die Wellenlängenverkürzung in einer besseren Fokussierbarkeit der Laserstrahlung. Die Verbesserung von Brillanz und Pulsenergie bei hohen Repetitionsraten ermöglicht eine Skalierung des Durchsatzes in der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpuls-Strahlquellen.

Vorgehensweise

Ein Yb:YAG-MOPA (Master Oscillator Power Amplifier), dessen auf INNOSLAB-Technologie basierender Verstärker am Fraunhofer ILT entwickelt und gebaut wurde, dient als infrarote Strahlquelle zur Erzeugung von sub-ps-Pulsen bei 515 nm. Im Infraroten liefert der für Untersuchungen zur Frequenzkonversion bereitgestellte Laser eine mittlere Leistung von bis zu 570 W bei einer Repetitionsrate von 50 MHz, einer Pulsdauer von 660 fs und nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität ($M^2 < 1,5$). Die infrarote Strahlung wird in einem Einfachdurchgang durch einen kritisch phasenangepassten LBO-Kristall frequenzverdoppelt. Zur Auslegung des Konversionsprozesses werden numerische Simulationen durchgeführt, in denen sowohl die thermische Belastung des Kristalls als auch Gruppenlaufzeiteffekte berücksichtigt werden. Damit ist

es möglich, einen vorteilhaften Arbeitspunkt für die Frequenzverdopplung zu identifizieren, an dem die kurze Pulsdauer erhalten bleibt und gleichzeitig eine hohe Konversionseffizienz, Pulsenergie und mittlere Leistung bei einer moderaten Belastung der Konversionskristalle erzielt werden.

Ergebnis

Bei 515 nm erzielt der Laser eine mittlere Leistung von 377 W, was einer Konversionseffizienz von 66 Prozent und einer Pulsenergie von 7,5 μJ entspricht. Die Pulsdauer bleibt mit 700 fs nahezu erhalten. Dies resultiert in einer mittleren Pulsleistung von 11 MW bei einer Pulsrepetitionsrate von 50 MHz. Die Strahlqualität im Grünen ist besser als $M^2 = 1,7$.

Anwendungsfelder

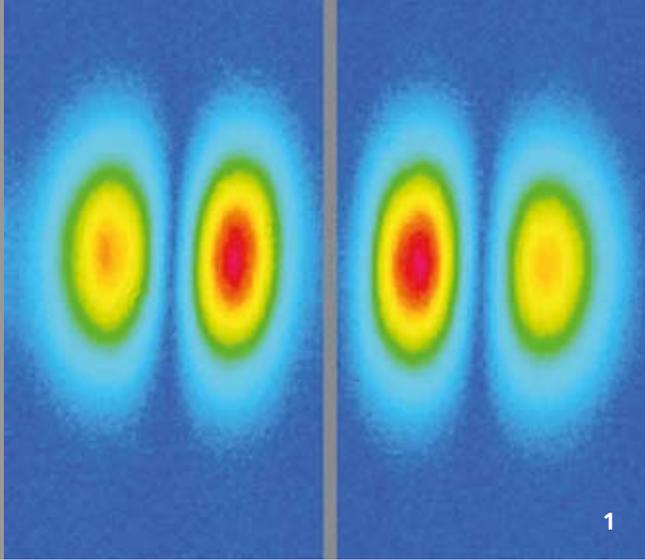
Seit April 2011 wird der Laser im Rahmen einer Kooperation am Max-Planck-Institut für Quantenoptik zur Erzeugung höherer Harmonischer eingesetzt. Weitere potenzielle Anwendungsfelder umfassen neben der Mikromaterialbearbeitung z. B. die Dotierung von Silizium oder das Schneiden von Kupfer und Kompositwerkstoffen.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Bastian Gronloh
Telefon +49 241 8906-629
bastian.gronloh@ilt.fraunhofer.de

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

2 Einsatz des Lasers beim Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching.



1 Gemessene Intensitätsverteilung einer Schlitzmode.

MASSGESCHNEIDERTE TRANSVERSALE MODEN

Aufgabenstellung

Kohärente Strahlung mit Wellenlängen unter 100 nm lässt sich in einem Gasjet erzeugen als hohe Harmonische von Femtosekunden-Laserstrahlung. Um bei Repetitionsraten über 10 MHz die erforderliche Intensität zu erreichen und gleichzeitig die Konversionseffizienz zu verbessern, wird die Leistung der treibenden Strahlung in einem Resonator überhöht. Die Auskopplung der frequenzkonvertierten Strahlung erfolgt geometrisch durch ein Loch oder einen Schlitz in einem der Resonatorspiegel, um bei den erzeugten kurzen Wellenlängen die Wechselwirkung mit einem optischen Element zu vermeiden. Diese Methode ist leistungskalierbar und erlaubt deshalb, das Potenzial von kW-Ultrakurzpulslasern auszuschöpfen. Ziel ist die Auslegung eines Resonators mit einer maßgeschneiderten Feldverteilung, die einen Ort hoher Intensität auf der optischen Achse aufweist und an einem anderen Ort im Resonator eine geringe Intensität auf der optischen Achse besitzt.

Vorgehensweise

Verschiedene Resonatoren mit einem Loch oder Schlitz in einem Spiegel und einem resonatorinternen Fokus mit für den Konversionsprozess geeigneter Feldverteilung wurden bezüglich der Verluste analytisch und numerisch untersucht. Durch die Ausnutzung der Entartung transversaler Moden im Überhöhungsresonator können Feldverteilungen angeregt werden, die dem Loch oder Schlitz ausweichen und dadurch geringe Verluste erleiden und eine große Überhöhung erlauben.

Ergebnis

Ein solcher quasiabbildender Resonator mit einer zirkulierenden Schlitzmode wurde experimentell in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik MPQ in Garching demonstriert. Mit einem schlitzförmigen Hindernis auf der optischen Achse mit einer Breite von 5 Prozent des Gaußschen Strahldurchmessers wurde eine Finesse von über 3000 erreicht. Das bedeutet einen Verlust von nur 0,02 Prozent, während die fundamentale Mode durch dieses Hindernis 15 Prozent Verlust erfährt. Die Entartung der Moden wird durch den Abstand der gekrümmten Resonatorspiegel eingestellt, wobei eine Genauigkeit von einigen μm ausreichend ist.

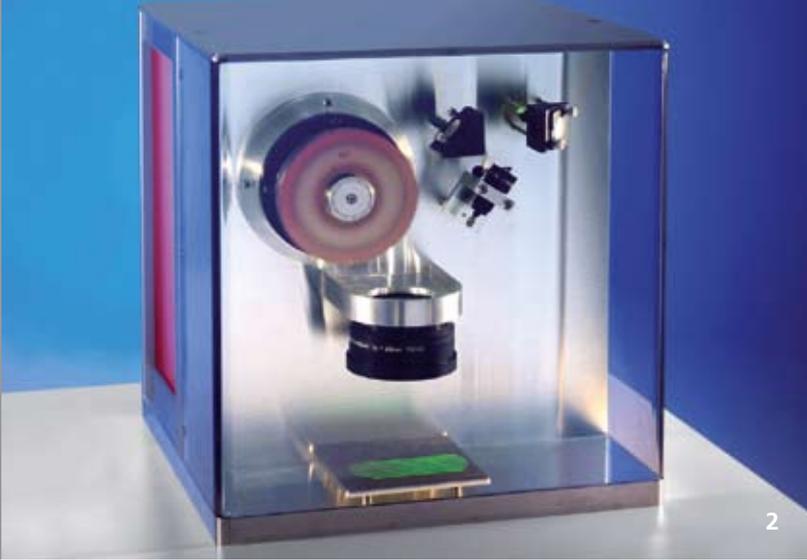
Anwendungsfelder

Ein Resonator mit einem Loch in einem Resonatorspiegel und gleichzeitig geringen Verlusten eröffnet vielfältige Anwendungen im wissenschaftlichen Bereich. Neben der Auskopplung von resonatorintern erzeugten Harmonischen kann er z. B. der Auskopplung bei der Thomson-Rückstreuung an Elektronen zur Erzeugung von Röntgenstrahlung dienen. Die definiert einstellbar dreidimensional lokalisierte, überhöhte Feldverteilung kann z. B. für Dipolfallen Anwendung finden.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Johannes Weitenberg
 Telefon +49 241 8906-371
johannes.weitenberg@ilt.fraunhofer.de

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



HOCHGESCHWINDIGKEITS- POLYGONSCANNER ZUR ULTRA- KURZPULSBEARBEITUNG

Aufgabenstellung

Die aktuellen Entwicklungen zu Ultrakurzpulslasern erreichen immer neue Rekorde bezüglich durchschnittlicher Laserleistung und Pulsrate. Zur Erzeugung hochqualitativer Bearbeitungsergebnisse müssen bei kleiner Pulsenergie die einzelnen Laserpulse verteilt werden, um eine Überhitzung des Materials zu vermeiden. Bei Pulsfrequenzen im Multi-MHz-Bereich reicht die Scangeschwindigkeit von Galvanometerscannern nicht mehr aus, wodurch diese Laser nur mit reduzierter Leistung verwendet werden können. Mit Polygonscannern kann die Bearbeitungsgeschwindigkeit um ein Vielfaches erhöht werden, wodurch ein geringer Pulsüberlapp für ein optimales Ergebnis bei Ausnutzung der vollen Laserleistung erzielt werden kann.

Vorgehensweise

Bei Polygonscannern rotiert ein Polygonspiegel mit hoher, konstanter Drehzahl. Ein auf den Polygonspiegel auftreffender Laserstrahl wird entlang einer Linie abgelenkt. Am Fraunhofer ILT wurde dieses System mit einem weiteren Scanner (z. B. Galvanometerscanner) vor dem Polygon ergänzt, um auch zweidimensionale Abtragsbereiche zu ermöglichen. Zur Realisierung einer puls- und positionsgenauen Modulation des Laserstrahls wird das System mit einem schnellen Pulpicker kombiniert, welcher mit der Rotation des Polygons und den Laserpulsen synchronisiert ist.

Ergebnis

Auf der Basis eines ersten Prototypen entsteht am Fraunhofer ILT aktuell ein Polygonscannersystem für ein Bearbeitungsfeld von bis zu 100 mm bei einer 160-mm-Optik und einer Scangeschwindigkeit von bis zu 320 m/s. Größte Herausforderungen sind hierbei die Modulation des Laserstrahls mit mehreren MHz synchron zum Lasertakt und die entsprechend angepasste Positionierung des Laserstrahls auf dem Werkstück.

Anwendungsfelder

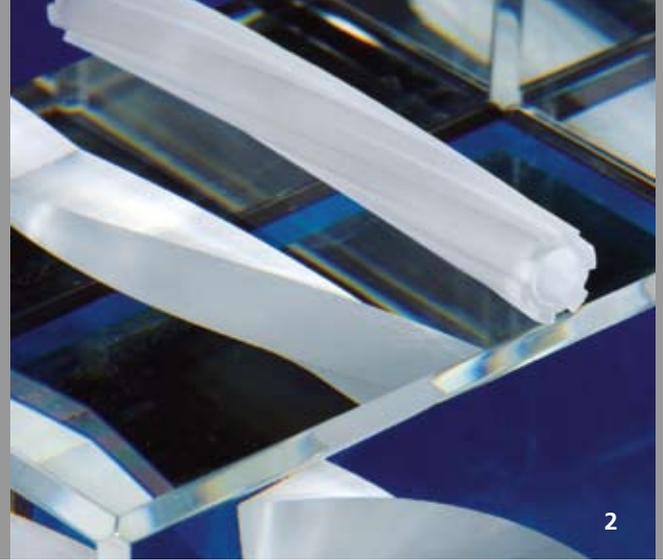
Anwendungsfelder sind beispielsweise die großflächige Strukturierung oder Laserbehandlung unterschiedlicher Materialien mit Hochleistungs-UKP-Lasern. Neben den aktuellen Anwendungen des Systems für UKP-Laser werden jedoch auch Hochgeschwindigkeitsprozesse mit cw-Lasern wie das Linienlöten von z. B. Solarzellen oder das Dicing von Halbleiterwafern adressiert, bei denen mit mehreren parallelen Strahlen gearbeitet werden kann.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Oliver Nottrodt
Telefon +49 241 8906-625
oliver.nottrodt@ilt.fraunhofer.de

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

2 *Demonstrator-Kombination
Polygon-IGalvanometerscanner.*



HERSTELLUNG VON FASER-PREFORMEN UND ANDEREN 3D-VOLUMENSTRUKTUREN MITTELS INVERSEM LASER-BOHREN

Aufgabenstellung

Komplexe Glasbauteile werden für viele technische Anwendungen benötigt. Speziell Glasbauteile zur Weiterverarbeitung zu optischen Komponenten stellen neue Anforderungen an das Herstellungsverfahren und dessen Kosteneffizienz. Bei der Herstellung von optischen Fasern werden Strukturen meist mittels mechanischer Bohrverfahren vor dem Ausziehen der Faser in den Faserrohling (= Preform) eingebracht. Ziel ist es, einen möglichst vollständig automatisierbaren Fertigungsprozess mithilfe des inversen Laserbearbeitungsverfahrens zu etablieren, der darüber hinaus auch bislang nicht herstellbare komplexe 3-D-Volumenstrukturen ermöglicht.

Vorgehensweise

Zur Bearbeitung der Glasbauteile wird der Laserstrahl auf die Unterseite des Werkstückes fokussiert und ein definierter Bereich mittels Einzellaserpulsen abgerastert und abgetragen. Nach Abschluss dieses Schrittes wird die Abtragsebene um einen festen Wert weiter ins Material verschoben und erneut abgetragen. Auf diese Weise wird Ebene für Ebene die gewünschte Geometrie ins Glas eingebracht. Zur weiteren

Verbesserung des Verfahrens wird ein Bearbeitungsplatz mit einem gütegeschalteten INNOSLAB-Laser (Wellenlänge: 532 nm) aufgebaut. Untersuchungen zur Verbesserung von Bohrtiefe, Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit des Prozesses sowie des Einflusses unterschiedlicher Gläser werden durchgeführt.

Ergebnis

Derzeit können Bohrungen mit Durchmessern von 350 µm bis 8 mm und einer Bohrtiefe von 120 mm in BK7 realisiert werden. In Quarzglas werden Bohrtiefen von bis zu 60 mm bei einem Durchmesser von 600 µm bis 8 mm erreicht. Weiterhin konnten frei definierbare Strukturen wie z. B. tordierte Vielecke und sehr filigrane Strukturen hergestellt werden, die mit mechanischen Verfahren nicht realisiert werden können.

Anwendungsfelder

Aufgrund der berührungslosen und automatisierten Herstellung kann das Verfahren der inversen Glasbearbeitung in verschiedenen technischen Feldern eingesetzt werden, in denen 3-D-Strukturen in Glaswerkstoffen benötigt werden. Unter anderem wurden erste Faserpreformen für weitergehende Untersuchungen zur Herstellung von Glasfasern hergestellt.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Marcel Werner
 Telefon +49 241 8906-423
 marcel.werner@ilt.fraunhofer.de

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

1 *Photonische Struktur in BK7-Glas (Strukturgröße: 12,8 mm, Strukturtiefe: 60 mm, Stegbreite: 450 µm).*

2 *Rotierte Struktur in BK7-Glas (Kantenlänge 1 mm).*



FASERINTEGRIERTER RAMANVERSTÄRKER FÜR PIKOSEKUNDEN-PULSE

Aufgabenstellung

Die hohe Verstärkung pro Umlauf führt in ytterbiumdotierten Faserverstärkern auch zu einer hohen Verstärkung von spontaner Emission (ASE). Für kurze Pulsdauern bei niedrigen Repetitionsraten, bzw. allgemein bei niedrigen mittleren Seedleistungen, limitiert die hohe ASE-Entwicklung die Ausgangsleistung. Als alternatives Konzept soll ein Ramanverstärker für kurze Pulsdauern mit einer gepulsten Pumpquelle aufgebaut und untersucht werden. Hier macht man sich den nichtlinearen Effekt der stimulierten Ramanstreuung in Fasern zunutze. Anders als bei der direkten Verstärkung im Ytterbium-Faserverstärker wird so die ASE-Entwicklung vermieden.

Vorgehensweise

Zur Realisierung des Ramanverstärkers wird als Pumpquelle ein gepulster Ytterbium-Faserverstärker mit einer Wellenlänge von 1020 nm aufgebaut, mit dem das Signal einer Single-Mode-Diode über die Ramanwechselwirkung in einer 25 m langen Faser verstärkt wird.

Ergebnis

Das Signal mit einer Pulsdauer von ca. 100 ps und einer Wellenlänge von 1064 nm wird durch den simultan durch die Faser propagierenden Pumpimpuls mit einer Pulsdauer von 1,7 ns um bis zu 32 dB auf eine Pulsspitzenleistung von etwa

200 W verstärkt. Die Konversion der Leistung des Pumpimpulses auf den Signalimpuls ist mit bis zu 99 Prozent sehr effizient. Aufgrund des hohen Leistungsübertrags und der instantanen Wechselwirkung der Ramanstreuung treten keine Probleme mit ASE-Entwicklung auf.

Anwendungsfelder

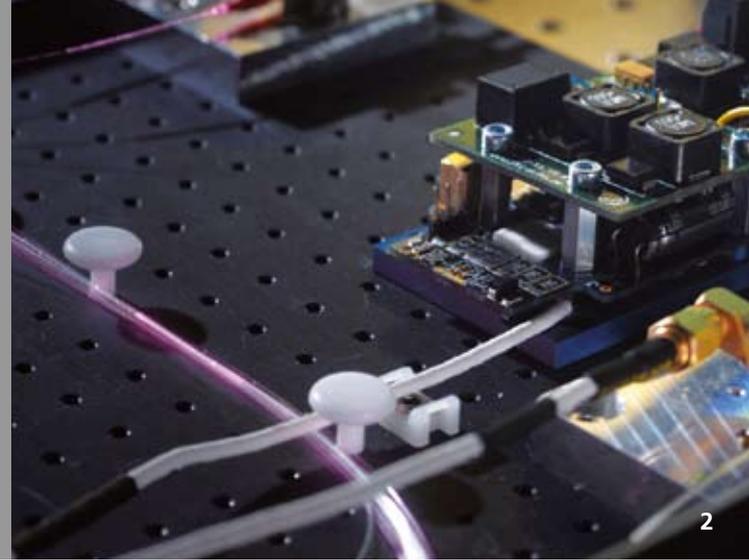
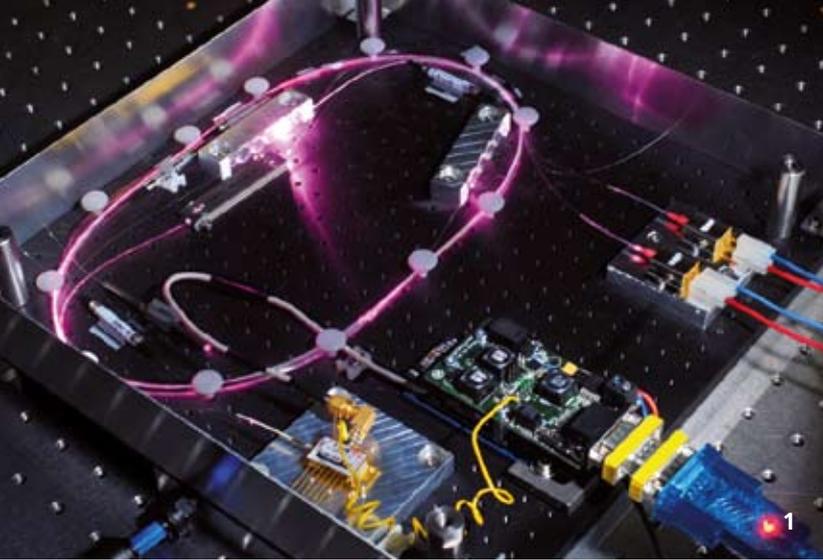
Mit seiner hohen Verstärkung auch bei sehr niedrigen Eingangsleistungen und kurzen Pulsdauern kann der Ramanverstärker als rauscharme Seedquelle hoher Leistung in kaskadierten Verstärkerketten verwendet werden. Somit liegen die Anwendungsfelder des Ramanverstärkers mit anschließender Nachverstärkung bei typischen Faserlaseraufgaben in der Materialbearbeitung wie Markieren, Schneiden und Schweißen, der Medizin- und der Messtechnik.

Diese Arbeiten wurden durch das BMBF unter dem Förderkennzeichen 13N9671 gefördert.

Ansprechpartner

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

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



ZWEISTUFIGER LINEAR-FASERVERSTÄRKER IM VARIABLEN PIKO- UND NANOSEKUNDENBEREICH

Aufgabenstellung

Ein Teilvorhaben des vom BMBF geförderten Projekts »FAZIT« befasst sich mit der Untersuchung grundlegender Konzepte robuster und vollständig faserverintegrierter Verstärkersysteme in verschiedenen Pulsdauerbereichen von einigen Pikosekunden bis hin zu Mikrosekunden und Repetitionsraten von wenigen Kilohertz bis zu einigen Megahertz. Dazu wird ein Konzept für ein Linearverstärkersystem mit Pulsbreiten von einzelnen Nanosekunden bis Subnanosekunden entwickelt und realisiert. Ein kleiner Formfaktor, Grundmode-Strahlqualität sowie linear-polarisierte Strahlung ergänzen das Anforderungsprofil.

Vorgehensweise

Durch die Kombination eines Prototypen einer Treiberschaltung zur Erzeugung kurzer Strompulse und einer Grundmode-Laserdiode mit einer Wellenlänge von 1064 nm wird das Seedsignal erzeugt. Die Verstärkung erfolgt über zwei kaskadierte, durch Isolatoren voneinander entkoppelte Stufen. Zur Erzeugung der Inversion innerhalb der ytterbiumdotierten aktiven Fasern werden eine Wellenlänge von 915 nm und ein kontradirektionales Pumpschema via Faserschmelzkoppler gewählt.

Ergebnis

Das Resultat ist ein kompakter, vollständig faserverintegrierter zweistufiger Verstärker. Über eine digitale Ansteuerung lassen sich Tastgrade von 1:333 bis 1:2000 bei Pulsbreiten von 0,5 ns bis 2 ns und Repetitionsraten von 0,5 MHz bis 2 MHz frei einstellen. Es werden Pulsspitzenleistungen bis etwa 5,5 kW, ein Polarisationsgrad von ca. 30 dB sowie ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von etwa 25 dB erreicht.

Anwendungsfelder

Der Faserverstärker kann als eigenständige Laserquelle für Aufgaben in der Materialbearbeitung wie beispielsweise Beschriften, Markieren oder Mikrostrukturieren sowie in der Messtechnik oder Medizintechnik eingesetzt werden, er ist in erster Linie jedoch als Seedquelle für weitere Hochleistungsverstärkerstufen gedacht.

Diese Arbeiten wurden durch das BMBF unter dem Förderkennzeichen 13N9671 gefördert.

Ansprechpartner

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

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

1 Demonstrator des Faserverstärkers.

2 Diodentreiber.



MONOLITHISCHER, GEWINN- GESCHALTETER FASERLASER MIT SPITZENLEISTUNG IM KW-BEREICH

Aufgabenstellung

Als alternatives Konzept zu herkömmlichen gepulsten Faserlasersystemen, wie gütegeschalteten Faserlasern oder gepulsten Diodenlasern mit linearem Faserverstärker, soll im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts »FAZIT« ein gewinn-geschalteter Faserlaser aufgebaut und untersucht werden. Der gewinn-geschaltete Faserlaser ermöglicht die Abdeckung auch niedriger Repetitionsratenbereiche, die mit herkömmlichen Faserlaserkonzepten wegen verstärkter Spontanemission (ASE) nicht ohne Weiteres zu erreichen sind. Zudem ist der Aufbau des Faserlasers als Resonator sehr einfach und kostengünstig und bietet eine große Variabilität, da der Laser auch kontinuierlich (cw) oder im quasi-cw-Modus betrieben werden kann.

Vorgehensweise

Ein vollständig faserintegrierter Resonator, bestehend aus aktiver, ytterbiumdotierter Faser und Faser-Bragg-Gittern, wird mit kurzen Pulsen im Sub- μ s-Bereich gepumpt, sodass das Signal aus dem Rauschen heraus anschwingt. Dadurch weist der gewinn-geschaltete Faserlaser auch bei niedrigen Repetitionsraten von < 5 kHz eine minimale verstärkte Spontanemission auf. Um eine möglichst hohe verfügbare Pumpenergie pro Pumpimpuls zu erzielen, werden die Pumpmodule mit einer Leistung betrieben, die ca. einen Faktor 4 über der nominellen cw-Leistung liegt. Um ein hierfür geeignetes Pumpmodul zu finden, wurden im Vorfeld mehrere kommerziell verfügbare Pumpdioden bzw. -module auf ihre Pulsbarkeit getestet.

Ergebnis

Zum Aufbau des gewinn-geschalteten Faserlasers werden sechs fasergekoppelte Pumpmodule mit jeweils einer elektronischen Ansteuerung gepulst betrieben und mittels eines Schmelz-kopplers in die aktive Faser gekoppelt. Zwei Faser-Bragg-Gitter bei einer Wellenlänge von 1080 nm komplettieren den faserintegrierten Aufbau.

Die mit diesem Aufbau erreichte Pulsdauer liegt im Bereich von 100 ns bei Repetitionsraten vom Einzelschussbetrieb bis hin zu ca. 20 kHz. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis beträgt aufgrund der guten ASE-Unterdrückung ca. 35 dB und es werden Spitzenleistungen von einigen kW erreicht.

Anwendungsfelder

Gewinn-geschaltete Faserlaser können aufgrund ihrer sehr guten Strahlqualität und des robusten Aufbaus in der Medizin- und Messtechnik oder in der Mikromaterialbearbeitung eingesetzt werden. Mit einer anschließenden Nachverstärkung des Lasers können auch Anwendungen adressiert werden, die höhere Leistungen bei variablen Repetitionsraten erfordern.

Diese Arbeiten wurden durch das BMBF unter dem Förderkennzeichen 13N9671 gefördert.

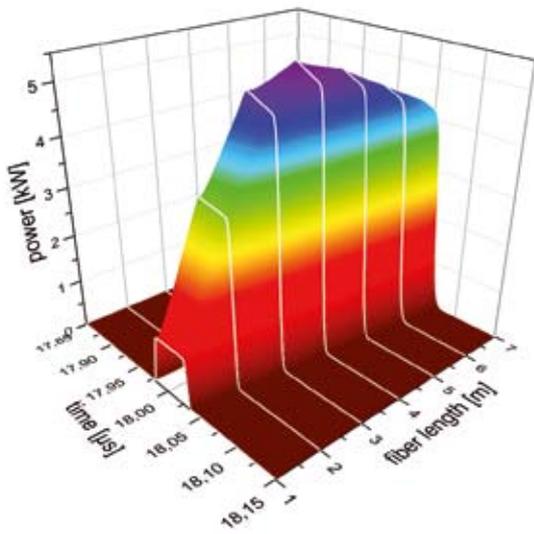
Ansprechpartner

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

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

3 Prototyp des gewinn-geschalteten
Faserlasers.

4 Innenansicht des Prototyps.



1

ZEITLICH UND SPEKTRAL AUFGEÖSSTE SIMULATION GEPULSTER FASERLASER

Aufgabenstellung

Aufgrund ihrer sehr guten Strahlqualität bei hoher mittlerer Leistung, ihrer hohen Effizienz und des robusten Aufbaus eignen sich Faserlaser für viele Anwendungen wie Materialbearbeitung, Messtechnik und Medizintechnik. Speziell bei gepulsten ytterbiumdotierten Faserlasern oder -verstärkern spielt aufgrund der hohen Verstärkung in der Faser die verstärkte Spontanemission (ASE) als limitierender Effekt eine große Rolle. Da die notwendigen Anforderungen an ein zeit- und wellenlängenabhängiges Simulationstool von keiner kommerziell erhältlichen Software erfüllt werden, war das Ziel die Entwicklung einer zeitlich und spektral aufgelösten Simulation von gepulsten Faserverstärkern und -lasern für die Erzeugung von transversal mono- und multimodiger Strahlung.

Vorgehensweise

Zur Modellierung des Faserlasers wurde eine numerische Simulation entwickelt, in der die aktive Faser longitudinal unterteilt wird und mit einem Runge-Kutta-Verfahren für jedes Faserelement die zeitlichen Ratengleichungen gelöst werden, die neben Absorption und stimulierter Emission von Signal- und Pumpwellenlänge auch das Auftreten von ASE berücksichtigen.

Ergebnis

Die numerische Simulation berechnet für einstellbare faserspezifische Eingangsparameter – wie numerische Apertur, Kern und Manteldurchmesser, Länge und Dotierkonzentration – aus der zeit- und wellenlängenabhängigen Pump- und Signaleingangsleistung die zeitabhängige Inversionsverteilung über die Faserlänge und die zeit- und wellenlängenaufgelöste Leistungsverteilung von Pump- und Signallicht.

Anwendungsfelder

Die Funktionsweise der Simulation konnte bereits erfolgreich an mehreren experimentell realisierten linearen Faserverstärkern sowie gewinngeschalteten Faserlasern unterschiedlicher Leistungsklassen verifiziert werden. Die spektrale und zeitaufgelöste Simulation kann nun zur Berechnung und Auslegung Fraunhofer ILT interner sowie kundenspezifischer Prototypen genutzt werden.

Ansprechpartner

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

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

1 Entwicklung der zeitabhängigen Pulsform entlang der Faserachse.

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.

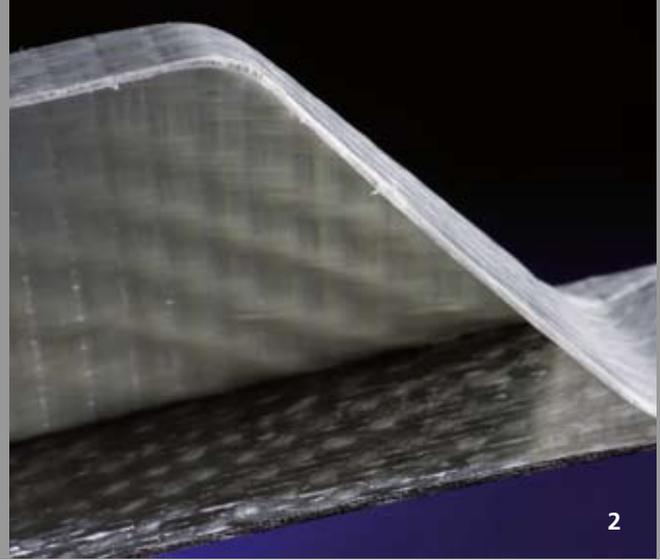
LASERMATERIALBEARBEITUNG



*Schneiden von
faserverstärkten Kunststoffen.*

INHALT

Schneiden von faserverstärkten Kunststoffen	60	Verwendung einer Zoom-Optik zur Reparatur von Schaufelspitzen	85
Highspeed-Prozessbeobachtung beim Laserschneiden	61	Mikro-Laserauftragschweißen von Goldkontaktpunkten	86
Schneiden mit radialer Polarisation	62	Selective Laser Melting von Nickelbasis-Superlegierungen	87
Riefenbildung beim Schneiden	63	Kontrolle des Selective-Laser-Melting-Prozesses	88
Schneiden mit wasserstrahlgeführter Strahlung	64	Werkzeuge aus Werkstoffkombinationen	89
Discontinuous-Galerkin-Methode für Gasströmungen	65	Oberflächencharakterisierung von SLM-Bauteilen mittels Ra-Spektrum	90
Wellenoptische Strahlungspropagation bei den Laserfertigungsverfahren	66	Generative Herstellung mikrotechnischer Bauteile mit dem (μ -)SLM-Verfahren	91
Strahlpropagation an Korngrenzen	67	Werkzeugmaschine zum Laserpolieren	92
Laserstrahlschweißen höchstfester martensitischer Chromstähle	68	Selektives Laserpolieren	93
Integrierte Qualitätsbewertung beim Laser-Hybrid-Schweißen von 3D-Schiffstrukturen	69	Laserpolieren von Prägewerkzeugen	94
Modellierung des Laserschweißens	70	Polieren von Titan- und Nickelbasislegierungen mit cw-Laserstrahlung	95
Laser-Leistungsregelung nach Geschwindigkeits-Echtwerten	71	Lasermikropolieren von Aluminiumwerkstoffen	96
Laserstrahlschweißen von Batteriezellen Typ 18650	72	Abtragen und Polieren von Glas mit Laserstrahlung zur Herstellung von optischen Komponenten	97
Online-Qualitätssicherung beim Laserstrahlhartlöten	73	Laserablation von Passivierungsschichten auf kristallinen Solarzellen	98
Laserstrahlbonden von metallbeschichtetem Silizium für das Wafer-Level-Packaging	74	Ultrahydrophobe und ultrahydrophile Metalloberflächen	99
Simulation der nicht-linearen Absorption in Dielektrika	75	Strukturierung durch Laserumschmelzen	100
Laserschweißen von thermoplastischen Faserverbundbauteilen	76	Vierstrahl-Interferenz-Strukturierung von Metallen	101
Laserstrahlschweißen transparenter Pflanzbehälter	77	Hochaufgelöste Laserstrukturierung transparenter Leiter für die organische Elektronik	102
Einfluss der TWIST®-Parameter auf die Kunststoff-Schweißnaht	78	Desktop-System für die Herstellung hochaufgelöster Mikrostrukturen	103
Verbesserte Umformung hochfester Stähle durch Laserwärmebehandlung	79	Mikrostrukturierung von metallischem Glas	104
Laserbasierte, effiziente Herstellung von Carbonfasern	80	Lichtwellenleiter mit beliebiger Mantelgeometrie	105
Generative Fertigung mittels Laserauftragschweißen	81	Präzisionsbauteile aus Rubin	106
Generative Fertigung von BLISKS durch Laserauftragschweißen	82	Kombiniertes Druck- und Laserverfahren zur Herstellung ortsselektiver Funktionsschichten	107
Innovative Bauteile für Spritzgießwerkzeuge aus Kupferwerkstoffen mit lokalem Verschleißschutz	83	Präzisionsbohren dünner Metall- und Glasfolien mit Pikosekundenlasern	108
Hochleistungs-Innenbeschichtungskopf für das Laserauftragschweißen mit großen Auftragstraten	84	Kamerabasierte 3D-Fokuspositionierung zum Mikrobohren	109
		Perforierte Ableiterfolien für Lithium-Ionen-Akkumulatoren	110
		Optische Durchbrucherkennung beim Laserperkussionsbohren	111
		Automatisiertes Laserstrahlbohren von Werkzeugformen	112
			59



SCHNEIDEN VON FASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN

Aufgabenstellung

Leichtbau mit faserverstärkten Kunststoffen ist ein Schlüsselfaktor, um die nationalen und internationalen Ziele zur Energieeinsparung und zum Klimaschutz zu erreichen. Es sind Lösungen für eine effiziente Produktion gefordert, die auch den Massenmarkt einschließen. Heute stehen lange Zykluszeiten und ein geringer Automatisierungsgrad bei der Herstellung faserverstärkter Bauteile dieser Forderung entgegen. Laserschneiden bietet ein großes Potenzial zur Reduzierung von Bearbeitungszeiten und zur Automatisierung, sowohl innerhalb der Prozesskette (Schneiden von Prepregs, Organoblechen, Tapes) als auch beim Besäumen und Schneiden von Komponenten. Werden Verbundwerkstoffe mit einem Standardlaserschneidverfahren geschnitten, führen unterschiedliche Absorption, Wärmeleitung, Schmelz- und Zersetzungstemperaturen von Faser und Matrix zu Schäden an der Schnittkante in Form von vorstehenden Fasern, Delamination und Ablagerungen. Die thermisch beeinflussten Zonen haben typischerweise eine Breite von 0,5 bis 1,0 mm.

Vorgehensweise

Zusammen mit Industriepartnern arbeitet das Fraunhofer ILT an einer integrierten Prozesskette zur Herstellung von Faserverbundbauteilen, die auch die Entwicklung von Laserschneidtechniken einschließt, mit denen die Kantenschädigung des Materials auf ein Minimum reduziert wird.

1 *Schneidprozess unmittelbar nach dem Schnittende des Lochschnittes.*

2 *Laserstrahlgeschweißte und -geschnittene GFK-Komponente.*

Durch die Verwendung von Ultrakurzpulslasern und neuen Kurzpuls-CO₂-Lasern sowie angepassten Schneidparametern soll der thermische Einfluss und damit die Materialschädigung minimiert werden.

Ergebnis

Minimale Materialschädigung wird durch kurze Wechselwirkungszeiten erreicht. Hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit, scannend abtragende Verfahren oder die Modulation der Laserstrahlung reduzieren die thermische Schädigung. Untersuchungen mit ultrakurzgepulsten Lasern zeigen das Potenzial zum Schneiden faserverstärkter Kunststoffe bei der Wellenlänge 1 µm. Aber auch mit CO₂-Lasern können aufgrund der hohen intrinsischen Absorption der Strahlung in der Kunststoffmatrix gute Bearbeitungsergebnisse erzielt werden. Es wird erwartet, dass durch den Einsatz kurz gepulster CO₂-Laserstrahlung die Qualität hier noch deutlich erhöht werden kann.

Anwendungsfelder

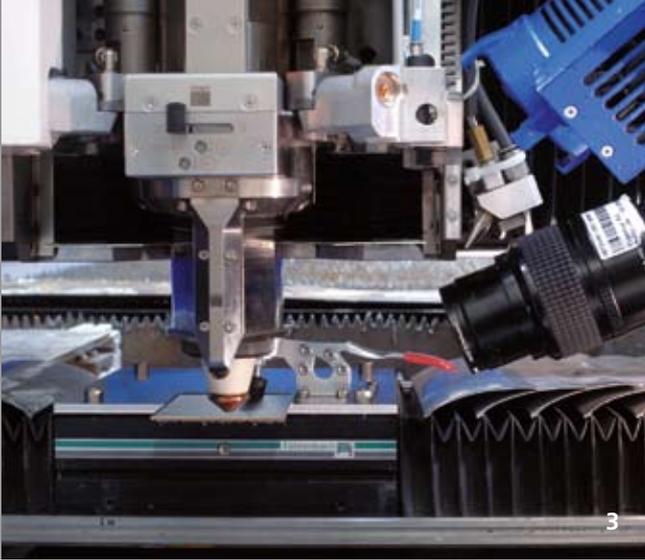
Besäumen und Schneiden sind essenzielle Prozessschritte für die Herstellung aller Faserverbundbauteile und für verschiedenste Branchen relevant wie Fahrzeugbau, Maschinenbau, Konsumgüter- und Sportartikelindustrie.

Diese Arbeiten wurden gefördert im Rahmen des EU-Projekts »FibreChain«.

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



HIGHSPEED-PROZESS- BEOBACHTUNG BEIM LASERSCHNEIDEN

Aufgabenstellung

Ein entscheidender Faktor für die Qualität beim Laserschneiden ist die Hydrodynamik der Schmelze auf der Schneidfront. Sie beeinflusst Riefenstrukturen auf den Schnittkanten und den Schmelzaustrieb an der Schnittunterkante. Durch die Kombination aus hoher Schmelzdynamik, stark abstrahlendem Prozess und geringer geometrischer Abmessung werden die Grenzen aktueller Beobachtungsmöglichkeiten erreicht. Trotz dieser Herausforderung sollte die Analyse der schmelzdynamischen Vorgänge mit einer Highspeed-Kamera ermöglicht werden, um dabei aktuelle Fragen zur zeitlichen und räumlichen Verteilung des Schmelzflusses zu beantworten.

Vorgehensweise

Durch eine Defokussierung wurden besonders breite Schnittfugen generiert, die eine gute Beobachtbarkeit ermöglichten. Das variable Beobachtungskonzept gestattet Perspektiven auf Schneidfront und Blechunterkante simultan. Durch die Bewegung des Werkstücks bei statischem Schneidkopf wird ein scharf abgebildeter Schneidprozess ohne Nachführen des Kamerasystems realisiert. Die seitlich platzierte Fremdbeleuchtung wurde in Winkel und Helligkeit so justiert, dass Eigenleuchten und Fremdbeleuchtung im gleichen Maße zur Bildhelligkeit beitragen. Typische Aufnahmefrequenzen von 2000 Bildern pro Sekunde konnten mit einer Bildauflösung von 288 x 160 px realisiert werden.

Ergebnis

Neben der grundsätzlichen Beobachtbarkeit der geometrischen Verhältnisse wie der Zunahme der Fugenbreite bei Steigerung der Laserleistung und der relativen Änderung der Schneidfrontposition zur Laserstrahlachse konnten beispielsweise die Ausbildung einzelner Riefen und die Richtungsumlenkung der Schmelze bei der Bildung von Bart an der Blechunterkante beobachtet werden.

Anwendungsfelder

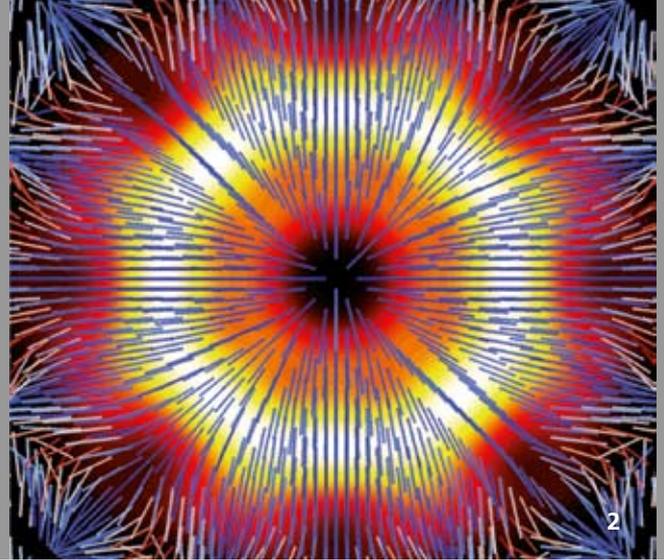
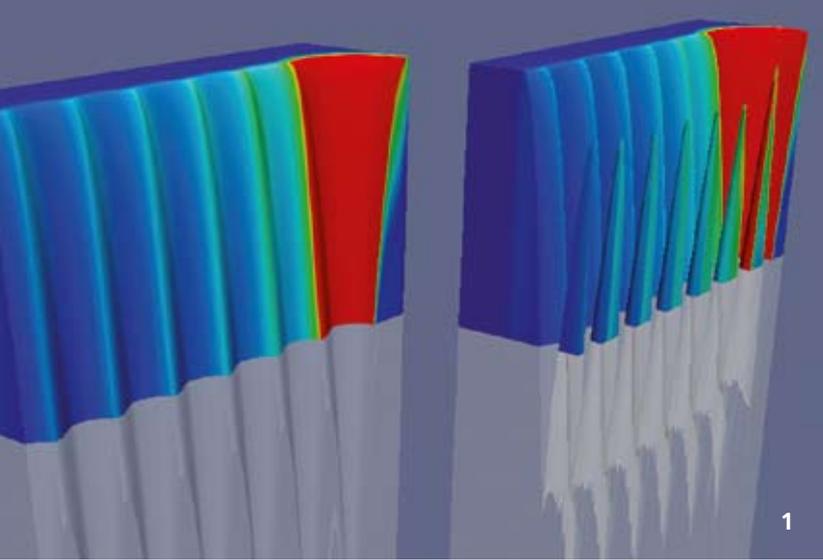
Die Evaluation detektierbarer Prozessänderungen bei einer Variation von Prozessparametern ist Basis für die Entwicklung einer selbstoptimierenden Laserschneidmaschine.

Ansprechpartner

M. Sc. Thomas Molitor
Telefon +49 241 8906-426
thomas.molitor@ilt.fraunhofer.de

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

- 3 Systemaufbau Hochgeschwindigkeits-
Prozessbeobachtung.
4 Prozessaufnahme einer Schnittfuge
in 2 mm Edelstahl.



SCHNEIDEN MIT RADIALER POLARISATION

Aufgabenstellung

Beim Schneiden mit Laserstrahlung ist der Polarisationszustand des Lichts wesentlich. Stand der Technik ist die Verwendung von zirkular polarisiertem Licht, um ein von der Schneidrichtung unabhängiges Schneidergebnis zu erzielen.

Radial polarisiertes Licht erfüllt diese Anforderung ebenfalls, verspricht jedoch im Vergleich zur zirkularen Polarisation eine bis zu 100 Prozent größere Absorption und somit eine wesentlich verbesserte Schneideffizienz.

Vorgehensweise

Im Rahmen des InnoNet-Projekts »KOMET« (Kompakter Festkörperlaser für effizienten Materialabtrag mit radial polarisiertem Licht) haben sich Forschungsinstitute, Strahlquellenentwickler und Anwender zusammengeschlossen, um bis 2012 einen Festkörperlaser zu entwickeln, der radial polarisiertes Licht erzeugt, und diesen unter Produktionsbedingungen zu erproben. Der angestrebte Prototyp soll eine Leistung von 30 W bei einer Wellenlänge von 1064 nm aufweisen.

Ergebnis

In einem ersten Schritt wurden externe Polarisatoren entwickelt, mit denen die Strahlung herkömmlicher Laser radial polarisiert werden kann. Mit diesen wird am Fraunhofer ILT das Schneiden mit radialer Polarisation unter Industriebedingungen erprobt.

Anwendungsfelder

Konkrete Anwendungen sind das Feinschneiden von Siliziumwafern, OLED-Masken sowie Stents aus Formgedächtnislegierungen. Von den Ergebnissen können mittelfristig viele weitere Laserfertigungsverfahren wie das Schneiden, Schweißen und Bohren mit Laserstrahlung profitieren.

Das Projekt »KOMET« wird vom BMWi mit rund 1 Million Euro gefördert.

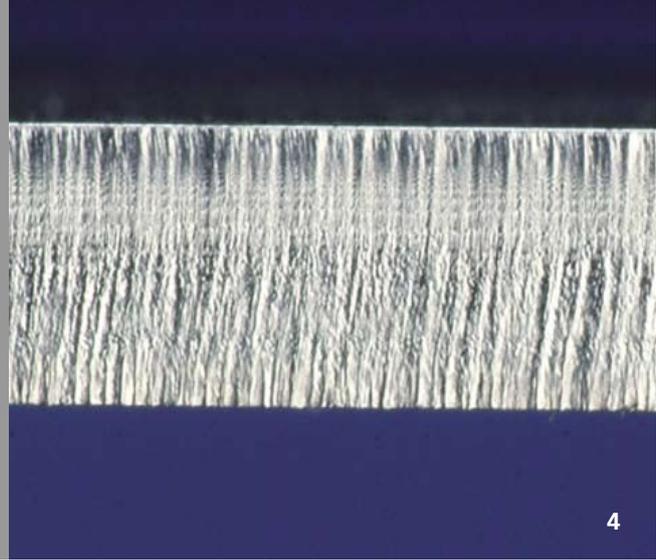
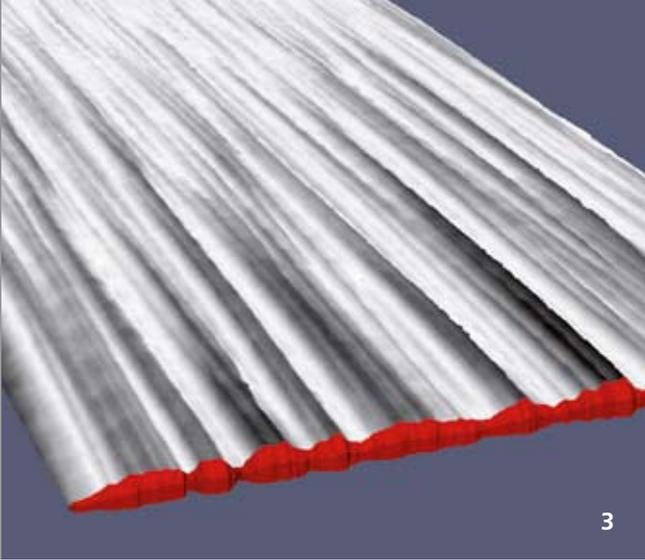
Ansprechpartner

Dr. Jens Schüttler
Telefon +49 241 8906-680
jens.schuetzler@ilt.fraunhofer.de

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

1 Simulation des Schneidens: zirkulare (links) und radiale Polarisation (rechts).

2 Simulation eines radial polarisierten Laserstrahls.



RIEFENBILDUNG BEIM SCHNEIDEN

Aufgabenstellung

Beim Laserstrahlschneiden von Blechen sind eine minimale Rauheit (Riefen) und das optische Erscheinungsbild der Schnittkante wesentliche Qualitätsmerkmale. Die optimalen Schneidparameter werden derzeit in umfangreichen Versuchsreihen experimentell ermittelt.

Als Ursache der Riefenbildung wurden bislang allein Schwankungen der Verfahrensparameter wie z. B. der Laserleistung angesehen. Eine mathematische Analyse zeigt jedoch, dass Riefen auch bei ideal konstanten Verfahrensparametern durch einen instabilen Fluss der Schmelze entstehen.

Ziele sind die modellbasierte Vorhersage der Schnittkantenqualität, die Ermittlung der relevanten Einflussgrößen und die Bestimmung optimaler Schneidparameter.

Vorgehensweise

Mithilfe eines Schneidmodells werden die wesentlichen Einflussgrößen für die räumliche Verteilung der Riefen auf der Schnittkante berechnet. Mit einer Stabilitätsanalyse werden die Anfachung bzw. Dämpfung der Störung in Abhängigkeit der Schneidparameter berechnet. Mit dem mathematischen Verfahren wird eine Analyse der Stabilitätsgrenzen durchgeführt und die Prozessdomäne für das stabile Schneiden bestimmt.

In numerischen Simulationen auf Grundlage des Schneidmodells wird die Dynamik der Schmelzströmung in Abhängigkeit von den Prozessparametern berechnet. Durch den Vergleich mit experimentellen Daten werden die Vorhersagen der Simulation validiert.

Ergebnis

Die neu entwickelte Simulationssoftware »QuCUT« erlaubt eine räumlich-zeitliche Analyse der Schmelzströmung und deren Auswirkung auf die Schnittkantenqualität sowie die Bestimmung optimaler Schneidparameter und die Ableitung von Maßnahmen zur Stabilisierung der Schmelzströmung.

Anwendungsfelder

Von den Ergebnissen profitieren Anwender, Maschinen- und Anlagenhersteller aus dem Bereich des Laserstrahlschneidens.

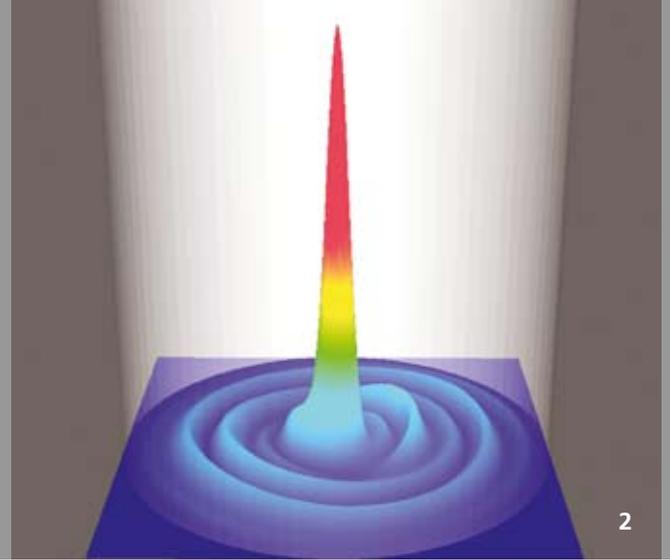
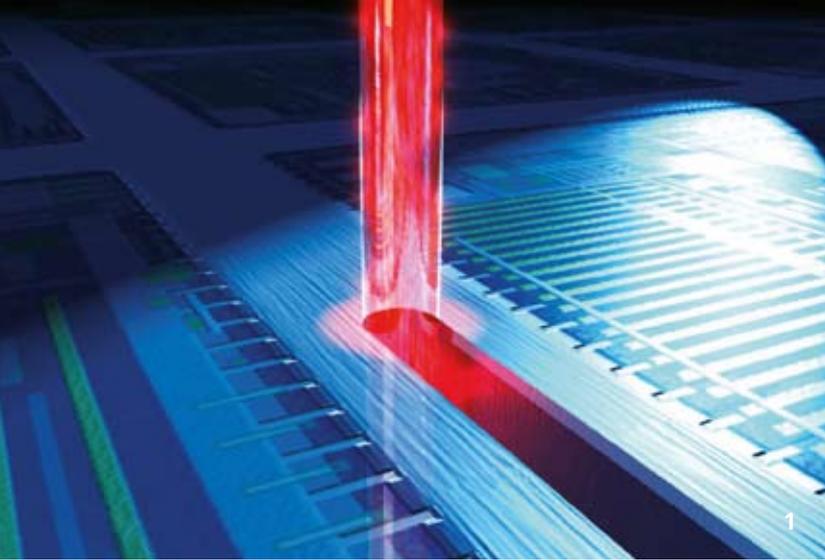
Ansprechpartner

Dr. Jens Schüttler
Telefon +49 241 8906-680
jens.schuetzler@ilt.fraunhofer.de

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

3 Mit QuCUT simuliertes Riefenprofil.

4 Riefenprofil einer realen Schnittkante.



SCHNEIDEN MIT WASSERSTRAHLGEFÜHRTER STRAHLUNG

Aufgabenstellung

Beim Feinschneiden von Metallen, besonders aber von sprödharten Werkstoffen (z. B. Halbleiter, Gläser), werden an die Präzision und Bearbeitungsqualität höchste Anforderungen gestellt. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Bruchfestigkeit der Werkstücke und der Vermeidung von Recast und Debris. Das wasserstrahlgeführte Laserschneiden ist eine innovative Prozessvariante, die im Hinblick auf diese Anforderungen ein großes Potenzial besitzt. Um dieses Potenzial voll auszuschöpfen, wird das bereits vorliegende Verständnis der nichtlinearen Strahlungspropagation im Wasserstrahl, der Kühlung des Werkstücks und der Verdampfung von Wasser während des Prozesses erweitert.

Vorgehensweise

Um neue Anwendungen und neue anwendungsspezifische Varianten des Laser MicroJet LMJ auf Basis modellbasierter Entwicklung zu erschließen, stehen dem Fraunhofer ILT eine LMJ-Anlage, Diagnosesysteme und ein lokales Hochleistungs-Rechnersystem zur Verfügung.

Ergebnis

Modelle für die Simulation wasserstrahlspezifischer Teilprozesse werden kontinuierlich erweitert und verfeinert. Eine breite Auswahl von Applikationen aus der Präzisionsbearbeitung wird mit dem Know-how des Fraunhofer ILT vor Ort erprobt und für den industriellen Einsatz vorbereitet.

Anwendungsfelder

Von den Ergebnissen profitieren Anwender des Feinschneidens verschiedenster Werkstoffe, insbesondere sprödharter Materialien, die eine Verbesserung der herkömmlichen »trockenen« Laserbearbeitung und der Ultrakurzpulsbearbeitung suchen.

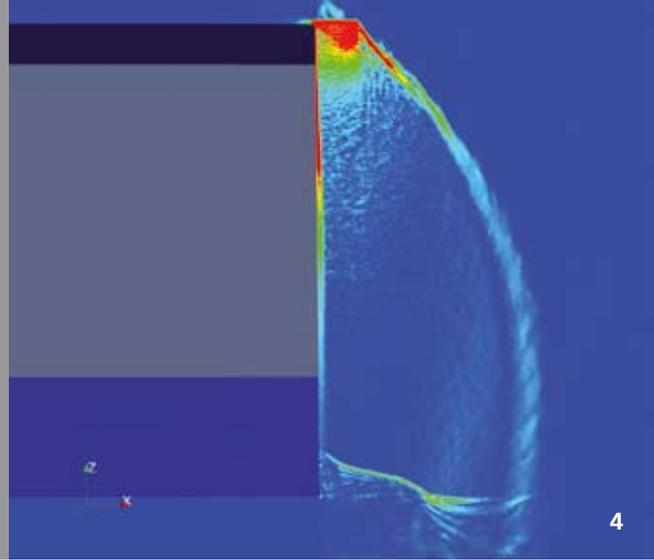
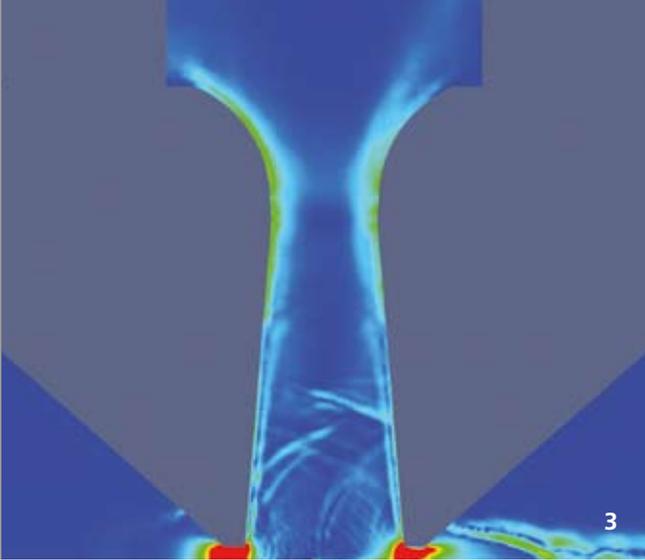
Ansprechpartner

Dr. Jens Schüttler
Telefon +49 241 8906-680
jens.schuetzler@ilt.fraunhofer.de

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

1 Illustration des Verfahrens (Quelle: Synova S.A.)

2 Simulation der Strahlpropagation im Wasserstrahl.



DISCONTINUOUS- GALERKIN-METHODE FÜR GASSTRÖMUNGEN

Aufgabenstellung

Bei vielen Laserfertigungsverfahren ist die Auslegung von Gasströmungen entscheidend für die erzielbare Qualität der Bearbeitungsprodukte. Die von der Gasströmung auf die Schmelze übertragenen Scherkräfte sind mitbestimmend für die Qualität und experimentell oft nicht messbar. Daher sind Simulationen ein wesentliches Werkzeug zur Auslegung von Gasströmungen.

Vorgehensweise

Die zugrunde liegenden physikalischen Aufgabenstellungen sind Multiskalenaufgaben, welche den Einsatz von angepassten numerischen Methoden erfordern. Ausgehend von den Anforderungen dieser Multiskalenaufgaben, hohe Genauigkeit und räumliche Auflösung in Grenzschichtbereichen bei gleichzeitig möglichst geringen Berechnungszeiten, wurde eine Discontinuous-Galerkin-Methode ausgewählt und implementiert. Discontinuous-Galerkin-Verfahren sind zwar mathematisch ausgereift, jedoch kommerziell nicht verfügbar.

Ergebnis

Die implementierte Discontinuous-Galerkin-Methode zeichnet sich durch vielfältige positive Eigenschaften aus. So erlaubt sie eine Berechnung der kompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen auf unstrukturierten Gittern mit einer nahezu beliebigen polynomialen Ordnung und ist durch eine hybride Parallelisierung bestens für einen Einsatz auf HPC-Systemen geeignet. Bei einer Berechnung mit 1024 Prozessorkernen

wurde ein Speedup von 800 gegenüber einem einzelnen Kern erzielt. Bei dieser Berechnung konnten die Scherkräfte in einer thermischen Grenzschicht entlang der Schneidfront und die Auswirkung der dynamischen Rückwirkung in die Gasdüse innerhalb von drei Tagen berechnet werden.

Anwendungsfelder

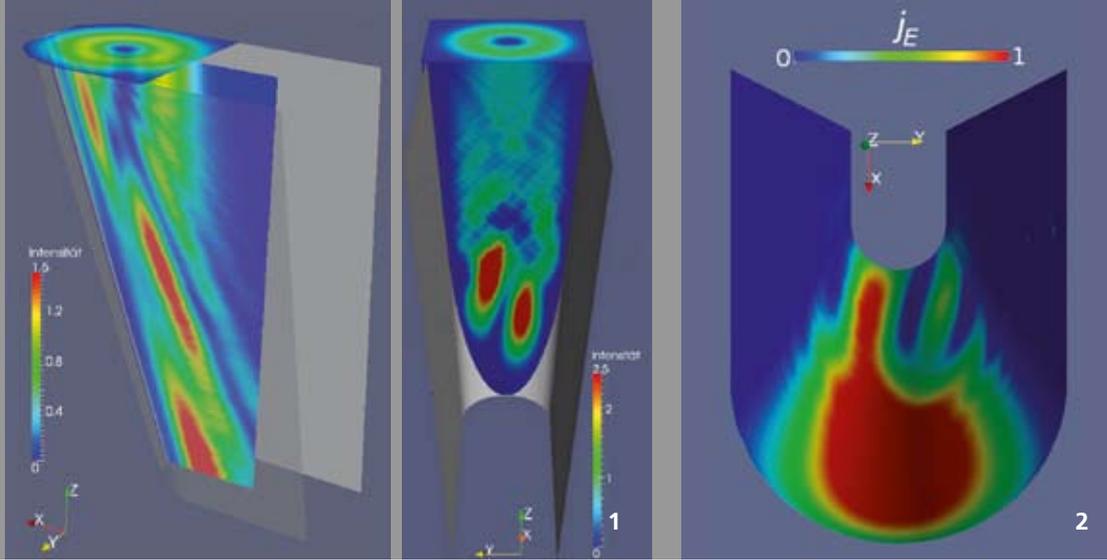
Mit dem neuen Berechnungsverfahren können komplexe Fragestellungen zur Gasströmung bei der Lasermaterialbearbeitung mit hoher Auflösung in kurzer Rechenzeit simuliert werden. Konkrete Anwendungen sind das Auslegen von Gasströmungen beim Schneiden, Schweißen und Bohren mit Laserstrahlung.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Ulrich Jansen
Telefon +49 241 8906-680
ulrich.jansen@ilt.fraunhofer.de

Dr. Markus Nießen
Telefon +49 241 8906-307
markus.niessen@ilt.fraunhofer.de

- 3 Simulation einer Schneidgasströmung:
Dichtegradient in einer Düse.
- 4 Simulation einer Schneidgasströmung:
Dichtegradient in einer Schnittfuge.



WELLENOPTISCHE STRAHLUNGSPROPAGATION BEI DEN LASERFERTIGUNGSVERFAHREN

Aufgabenstellung

Die Strahlungsfelder bei den Laserfertigerungsverfahren werden bisher meist durch einen frei propagierenden Laserstrahl approximiert oder durch ein geometrisch-optisches Verfahren modelliert. Es gibt jedoch Phänomene (wie z. B. die hier gezeigte Asymmetrie des Strahlungsfelds in einer Schneidfuge), die zu ihrer Beschreibung die Berücksichtigung der Wellennatur und gleichzeitig der Wirkung der Werkstückoberfläche auf den Strahl erfordern. Hierzu ist ein wellenoptisches Verfahren notwendig, das neben der Beugung auch eine quantitativ richtige Modellierung der Reflexion und Absorption ermöglicht. Um auch in gegenüber der Wellenlänge großen Berechnungsgebieten ein vektorielles, dreidimensionales Strahlungsfeld berechnen zu können, darf das Verfahren nicht rechenaufwendig sein. Eine Software, die dies leistet, ist bisher (auf dem Markt) nicht verfügbar.

1 Strahlungsfeld in der Schneidfuge.

2 Dichte des absorbierten Energiestroms.

Vorgehensweise

Als schnelles Verfahren bietet sich eine vektorielle Beam Propagation Method (BPM) an, die jedoch für sich betrachtet für die Berechnung der Reflexion und Absorption an den Werkstückoberflächen, die bei den Laserfertigerungsverfahren auftreten, ungeeignet ist. Sie kann aber durch sogenannte Leontovich-Randbedingungen (LRB) ergänzt werden. Diese LRB, die an die Werkstückoberfläche gestellt werden, beschreiben die Wirkung der Werkstückoberfläche auf den Strahl.

Ergebnis

Die Kombination BPM/LRB ist implementiert und mit Modellaufgaben validiert worden. Im ersten Anwendungsfall Laserschneiden konnten bereits wesentliche Erweiterungen gegenüber den bisherigen Ansätzen zur Strahlungspropagation identifiziert werden, die Erklärungsansätze für im Schneidergebnis sichtbare Phänomene liefern.

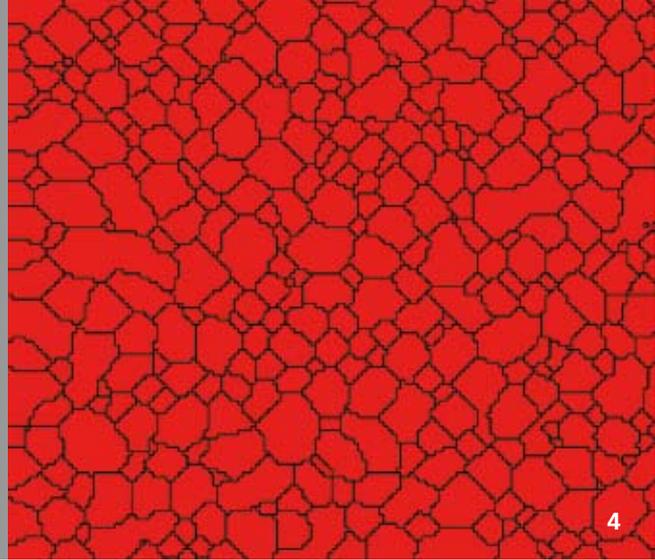
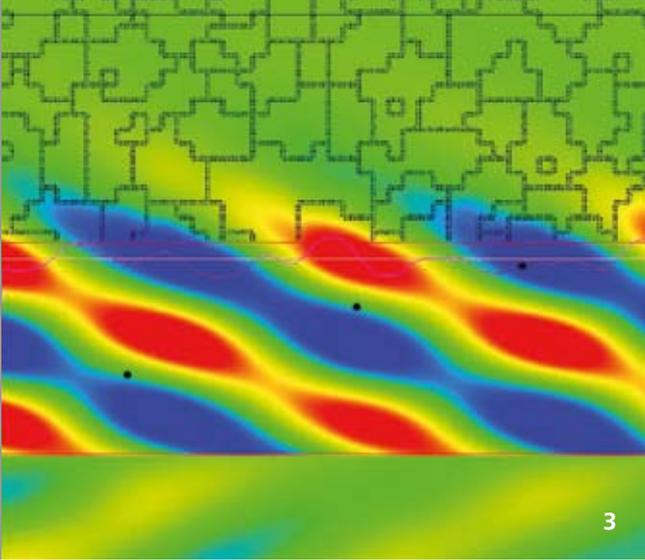
Anwendungsfelder

Das vorgestellte Verfahren eignet sich insbesondere für die Strahlungspropagation in Gebieten mit metallischen Werkstoffen und kann daher bei den Laserfertigerungsverfahren Schneiden, Schweißen und Bohren eingesetzt werden.

Ansprechpartner

Stefan Tiesmeyer
 Telefon +49 241 8906-163
 stefan.tiesmeyer@ilt.fraunhofer.de

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



STRAHLPROPAGATION AN KORNGRENZEN

Aufgabenstellung

Die Besonderheiten der Absorption von Strahlung auf der Oberfläche inhomogener, speziell gefügebildender Materialien (wie z. B. Stählen) werden bei der Simulation der Laserfertigungsverfahren bisher nicht berücksichtigt. Dass ein Einfluss, der von der Feinheit der jeweiligen Kornstruktur herrührt, vorhanden ist, wurde z. B. beim Schneiden mit Laserstrahlung bereits gezeigt. Wie groß dieser Einfluss ist und welche Gefügemodifikation sich aufgrund dieser Tatsache besser für eine Bearbeitung mit Laserstrahlung eignet, ist bisher nicht angegeben worden.

Vorgehensweise

Materialien mit inhomogener Verteilung optischer Eigenschaften (z. B. durch Kornbildung) sollen in der Simulation der Laserfertigungsverfahren dargestellt werden. Mithilfe dieser Implementation kann dann der Einfluss der veränderten Absorption von Laserstrahlung auf den jeweiligen Fertigungsprozess angegeben werden.

Ergebnis

Zur Simulation der Strahlungspropagation in der Umgebung eines inhomogenen Materials mit Kornstruktur wurde zunächst ein geeignetes Propagationsverfahren gesucht und implementiert. Die FDTD-Methode (Finite-Difference-Time-Domain) hat sich hier als die Methode der Wahl erwiesen, da es mit ihr möglich ist, Materialmodelle einzubinden, die die unterschiedlichen optischen Eigenschaften von Körnern

und Korngrenzen (insbesondere verschiedene Leitfähigkeiten) berücksichtigen. Des Weiteren war die zufällige Struktur der Körner in der Simulation zu berücksichtigen. Dazu wurde ein Software-Modul zur statistischen Simulation von Körnern implementiert, das die Gefügestruktur für die anschließende wellenoptische Simulation bereitstellt.

Anwendungsfelder

Die vorgestellte Simulation kann die Absorption von Laserstrahlung in kornbildenden Materialien bestimmen, die für eine Prozesssimulation des Schneidens, Schweißens oder Bohrens notwendig ist. Sie kann daher überall zum Einsatz kommen, wo Materialien mit Gefügestruktur zur Bearbeitung kommen sollen. Sie ist zunächst für die Anwendung beim Schneiden mit Laserstrahlung entwickelt worden.

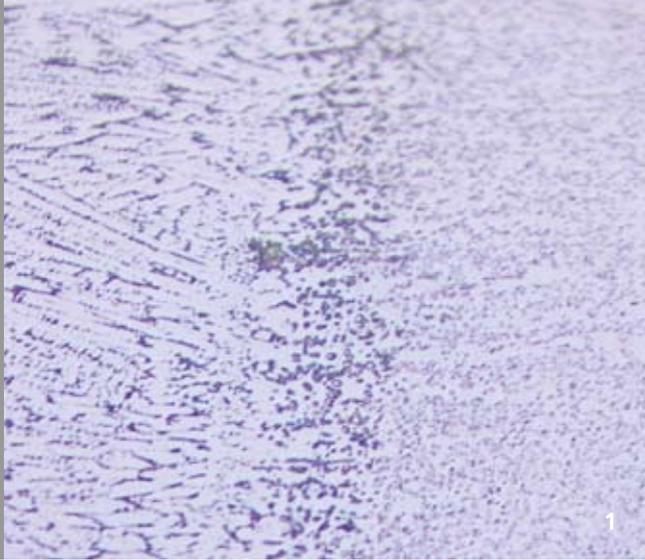
Ansprechpartner

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

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

3 *Wellenoptische Simulation mit Gefügestruktur.*

4 *Simulierte Kornstruktur.*



LASERSTRAHLSCHWEISSEN HÖCHSTFESTER MARTENSITISCHER CHROMSTÄHLE

Aufgabenstellung

Martensitische Chromstähle bieten hervorragende Eigenschaften für Anwendungen, bei denen hohe Festigkeit mit geringer Werkstoffdicke kombiniert werden muss. Die hohen Festigkeiten, die insbesondere durch Presshärten erreicht werden können, machen diese Stähle interessant für eine Reihe von Anwendungen in der Automobilindustrie und im generellen Leichtbau. Für das Schweißen von martensitischen Chromstählen existieren allerdings derzeit keine Prozessfenster, die nicht zu einem Abfall der Festigkeit führen.

Vorgehensweise

An Feinblechen aus martensitischen Chromstählen mit 13 Gewichtsprozenten Chrom und unterschiedlichen Gehalten an Kohlenstoff wurden Schweißversuche durchgeführt. Dabei wurden die Eigenschaften von Schweißverbindungen an Blechen im Walzzustand und im pressgehärteten Zustand ermittelt. Um die Wirkung industriell eingesetzter Lasersysteme zu simulieren, wurde die Streckenenergie variiert. Zur Steuerung der Härte in Schweißgut und Wärmeeinflusszone wurden unterschiedliche Verfahren zur Wärmebehandlung eingesetzt.

Ergebnis

Grundsätzlich ist eine Eignung der untersuchten Materialklasse zum Schweißen mit Laserstrahlung gegeben. Dies trifft für gewalzte und pressgehärtete Feinbleche zu. Alle Schweißnähte konnten rissfrei ausgeführt werden. Dennoch ist ein Vorwärmen auf Martensit-Starttemperatur zu empfehlen, um den Härtegradienten zu begrenzen. Eine Wärmenachbehandlung bei 750 °C führt im Walzzustand zur Wiederherstellung der Eigenschaften des Grundwerkstoffs in der Schweißzone. Bei pressgehärteten Werkstoffen tritt eine Entfestigung der Schweißnaht gegenüber dem Grundwerkstoff von etwa 15 Prozent auf.

Anwendungsfelder

Die betrachteten Werkstoffe sind ideale Kandidaten für den Leichtbau. Durch Presshärten werden Festigkeiten von bis zu 2000 MPa bei hoher Restbruchdehnung erreicht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass ein Schweißen im Walzzustand für die Herstellung von Tailored Blanks wie auch das Schweißen gehärteter Werkstoffe in der Montage möglich 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

1 Schmelzlinie in gehärtetem 1.4034 Stahl
ohne Vorwärmung.



INTEGRIERTE QUALITÄTS- BEWERTUNG BEIM LASER- HYBRID-SCHWEISSEN VON 3D-SCHIFFSTRUKTUREN

Aufgabenstellung

Die lasergestützten Fügeverfahren Laser-Remote-Heften und Laser-Hybrid-Schweißen erfordern Prozess-, System- und Bewertungsmethoden, um künftige Anforderungen an dreidimensionale Schweißkonstruktionen im Schiffbau zu erfüllen. Dies ist zunehmend erforderlich, da die lasergestützten Fügeverfahren aufgrund ihrer verfahrensbedingten geringen thermischen Verzüge vorteilhaft zur Herstellung dünnwandiger 3-D-Strukturen ($t = 4 \text{ mm bis } 10 \text{ mm}$) eingesetzt werden. Die Ermittlung der Füge- und Prozessqualität erfolgt dabei unter realitätsnahen Bedingungen mit einem Fertigungsdemonstrator für das flexible Laser-Remote- und -Hybrid-Schweißen mit integrierter Qualitätsdiagnose und -bewertung.

Vorgehensweise

Beim Laser-MSG-Hybrid-Schweißen wird intensive Strahlung über das gesamte optische Spektrum (UV, VIS, NIR) aus der Prozesszone emittiert. Die Intensität der Strahlung schwankt mit der Pulsfrequenz des MSG-Lichtbogens. Zur berührungsfreien optischen Prozessüberwachung werden ortsauflösende bildgebende Kamera- und ortsintegrierende Sensor-Systeme eingesetzt.

Der Laser-MSG-Hybrid-Schweißprozess wird mit dem CPC-System des Fraunhofer ILT mit einer High-Speed-CMOS-Kamera durch einen schmalbandigen optischen Bandpassfilter koaxial durch die Fokussieroptik hindurch beobachtet und

überwacht. Zur »Blitzlicht«-Beleuchtung der Prozesszone wird ein Superpulsdiodenlaser eingesetzt, der lateral neben der Fokussieroptik angeordnet ist und synchron mit Belichtung der Kamera angesteuert wird.

Ergebnis

Durch die synchrone Belichtung zwischen den Strompulsen mittels der gepulsten Beleuchtungsstrahlquelle werden ausreichend auswertbare Bilddaten aufgezeichnet, aus denen die Position der Kapillare (keyhole) relativ zum Fügspalt und die Geometrie des Schmelzbads ermittelt werden. Ziele sind die automatisierte Fugenfolge und die Online-Überwachung der Stabilität des Laser-MSG-Hybrid-Prozesses.

Anwendungsfelder

Mit dem realisierten System werden mittelfristig Aussagen zur Prozessqualität und -stabilität laserbasierter Fügeverfahren für Anwendungen im Schiffbau, Stahlbau, Fahrzeugbau und bei der Herstellung von Rohren erwartet.

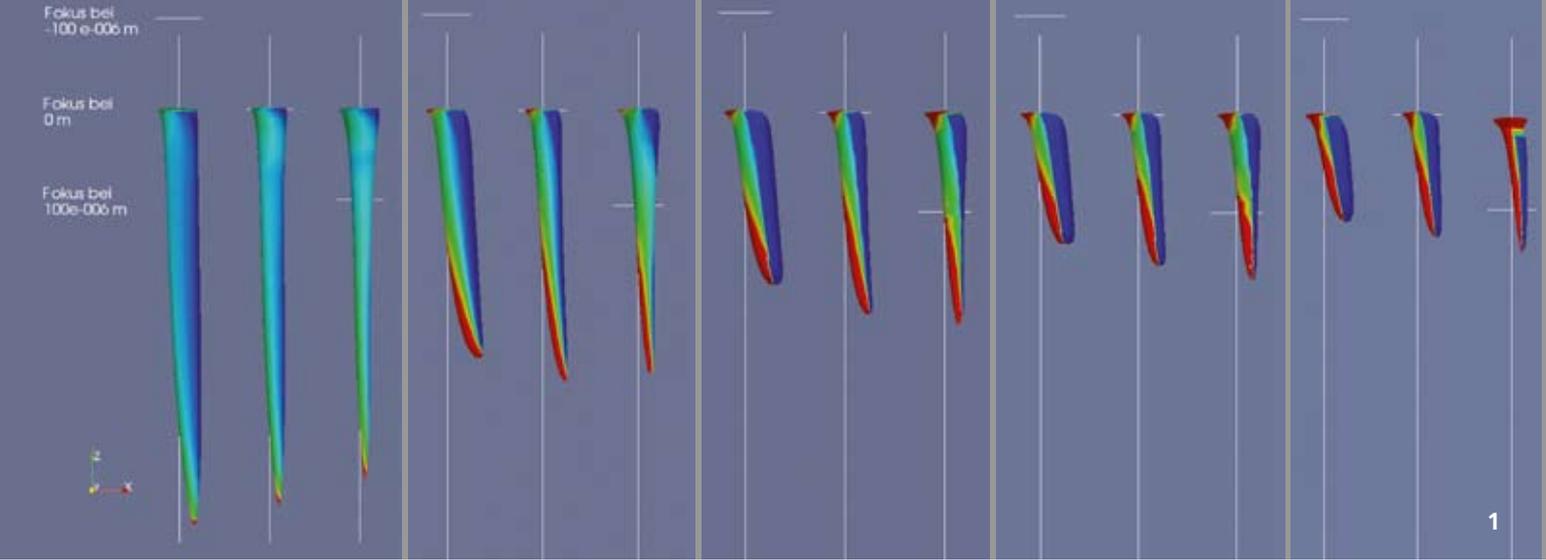
Die Arbeiten wurden durch das BMWi im Rahmen des Verbundvorhabens »QulnLas« gefördert.

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

2 Momentaufnahme des
Laser-Hybrid-Schweißprozesses.



1

MODELLIERUNG DES LASERSCHWEISSENS

Aufgabenstellung

Um die bei der Modellierung des Laserschweißens typische Problematik einer aus Experimenten angefitteten Wärmequelle zu lösen, wird ein stationäres Prozessmodell zum Schweißen aus der stationären Modellierung zum Schneiden abgeleitet.

Vorgehensweise

Die Simulation des Schweißens erfolgt mittels eines Modells lokaler Bilanzgleichungen. Dieses Modell ist in der Lage, die stationäre Form der Schweißkapillaren beim Tiefschweißen mit Laserstrahlung zusammen mit dem sich einstellenden Temperaturfeld im Werkstück zu berechnen. Es wird mit dem im Institut entwickelten Verfahren zur Strahlverfolgung (Ray-/Beam-Tracing) kombiniert.

Ergebnis

Die reduzierte Modellierung des Schweißens ermöglicht die Durchführung ganzer Parameter-Variationen in akzeptabler Zeit, um z. B. Variationen der Einschweißtiefe und Fokusslage zu untersuchen.

Anwendungsfelder

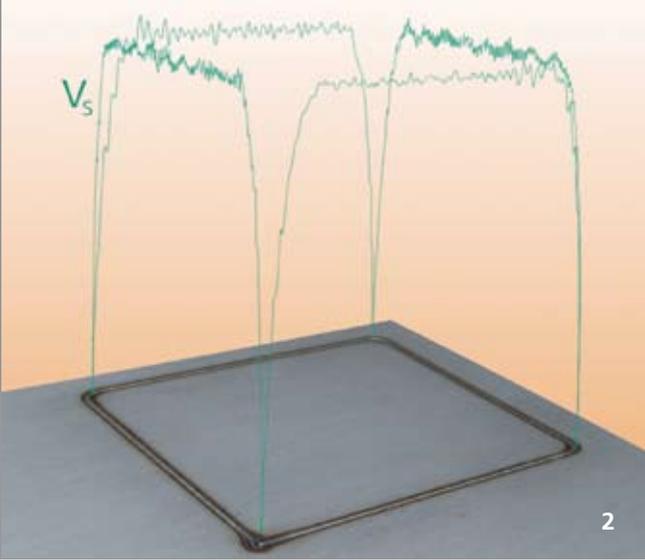
Das Schweißmodell ist anwendbar auf Lineschweißungen im unteren Leistungsbereich, in dem die Plasma-Bildung in der Schweißkapillare nicht dominant ist.

Ansprechpartner

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

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

1 Berechnete Schweißkapillaren für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten und Fokusslagen.



LASER-LEISTUNGSREGELUNG NACH GESCHWINDIGKEITS-ECHTWERTEN

Aufgabenstellung

Die Nutzung moderner Festkörperlaser hat für eine deutliche Steigerung der Bearbeitungsgeschwindigkeiten in der Lasermaterialbearbeitung geführt. Ob mit Scanner oder mit Festoptik, hohe Geschwindigkeiten möglichst in verschiedenen Achsen gleichzeitig sind heute schon fast selbstverständlich. Doch obwohl die Bewegung der Optik genau berechnet wird, kann die Position des Bearbeitungspunkts von der geplanten Kontur durch Systemschwingungen abweichen. Ein Überwachungssystem, das die Relativbewegung von Werkstück und Optik genau verfolgt, schafft hier Abhilfe. Abweichungen von der Soll-Kontur und der Soll-Geschwindigkeit werden damit exakt vermessen.

Vorgehensweise

Das Überwachungssystem basiert auf einer Kamera, mit der durch die optische Achse der Bearbeitungsoptik die charakteristischen Oberflächenstrukturen des Werkstücks verfolgt werden und daraus eine Geschwindigkeitsinformation berechnet wird. Ein FPGA-Chip (Field Programmable Gate Array) berechnet dabei die Werkstückbewegung in Echtzeit mit einer Latenz von ca. 60 μ s. Der berechnete Wert lässt sich dann über eine On-board-Schnittstelle und einen D/A-Wandler direkt an die Laserleistungssteuerung übertragen, um maschinenbedingte Abweichungen in der Geschwindigkeit über eine Leistungsregelung zu kompensieren.

Ergebnis

Durch die Echtzeit-Leistungsregelung, welche im einfachsten Fall linear-proportional ist, wird unabhängig von Geschwindigkeitsschwankungen ein gleichmäßiges Prozessergebnis durch gleichbleibenden Energieeintrag gewährleistet.

Für Endanwender ebenso interessant ist der Offline-Modus: Das System kann dem Bearbeitungspunkt beim Einrichten mit hoher Messgenauigkeit folgen und so eine Korrektur der geplanten Kontur ermöglichen, um z. B. den Einfluss der Massenträgheit oder der Antriebsdynamik auszugleichen.

Anwendungsfelder

Für die Messung spielt es keine Rolle, ob eine Festoptik oder ein Scanner benutzt wird. In beiden Fällen vermisst das System die Bewegung des Bearbeitungspunkts am Werkstück und kann so Abweichungen von der Sollkontur schon beim Einrichten oder während des Prozesses dokumentieren. Eine Vielzahl weiterer Anwendungsfelder wie roboterbasierte Schweiß- und Lötverfahren und Scanneranwendungen werden aktuell untersucht.

Ansprechpartner

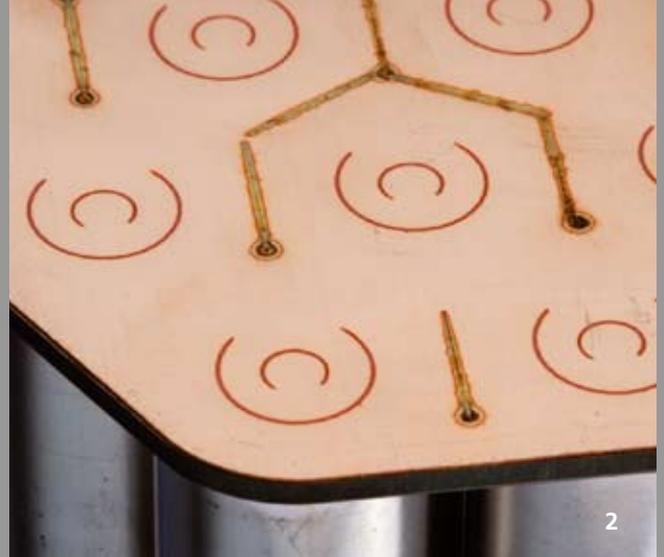
Dipl.-Ing. (FH) Christoph Franz
 Telefon +49 241 8906-621
 christoph.franz@ilt.fraunhofer.de

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

- 2 *Ergebnis der Geschwindigkeitsmessung im Bahnverlauf (Schweißen).*
 3 *Werkstückoberfläche mit berechneten Geschwindigkeitsvektoren.*



1



2

LASERSTRAHLSCHWEISSEN VON BATTERIEZELLEN TYP 18650

Aufgabenstellung

Aufgrund ihrer großen Energiedichte werden Lithium-Ionen-Batteriezellen in zunehmendem Maße als Energiespeicher für elektrisch angetriebene Fahrzeuge verwendet. Zum Aufbau geeigneter Batteriepacks müssen dabei einzelne Zellen elektrisch miteinander verbunden werden. Aufgrund des Preises und der sehr guten Verfügbarkeit werden hier auch sogenannte 18650-Zellen eingesetzt, welche primär in Notebooks und Elektrowerkzeugen zum Einsatz kommen.

Da diese Zellen im Vergleich zu großformatigen Zellen eine geringe Kapazität aufweisen, müssen diese durch eine Parallelschaltung von mehreren Zellen zu einer Großzelle verbunden werden. Hierbei erfolgt eine Überlappschweißung eines Kupferableiters und des aus vernickeltem Edelstahl bestehenden Batteriegehäuses, welches den Minuspol darstellt.

Vorgehensweise

Für eine Prototypenfertigung der Batteriepacks muss eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Kupfer und Stahl erzeugt werden, ohne eine Durchschweißung durch den ca. 0,25 mm dicken Edelstahl zu erzielen, da sonst Elektrolytflüssigkeit austreten kann und die Zelle somit beschädigt wird. Hierzu wird die am Fraunhofer ILT entwickelte Technik

der örtlichen Leistungsmodulation angewendet, welche die Einschweißtiefe reduziert bei gleichzeitiger Steigerung des Anbindungsquerschnitts. Als Systemtechnik werden ein Grundmodelfaserlaser und ein Galvanometerscanner eingesetzt.

Ergebnis

Im Rahmen der durchgeführten Versuche und der Prototypenserie wurden mehrere Hundert Makrozellen erstellt, welche im Rahmen des Forschungsprojektes »e performance« in ein Elektrofahrzeug eingebaut werden. Eine weiterführende Qualifizierung der Verbindungen hinsichtlich ihrer Langzeitstabilität ist Gegenstand aktueller Arbeiten.

Anwendungsfelder

Lithium-Ionen-Batteriezellen sind derzeit die aussichtsreichste Technologie zur Energiespeicherung im Bereich der Elektromobilität. Die kostengünstige Herstellung effizienter Energiespeicher ist dabei als Schlüsseltechnologie für diesen stark wachsenden Industriezweig anzusehen. Das Laserstrahlschweißen kann hier einen wesentlichen Beitrag leisten.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Benjamin Mehlmann
Telefon +49 241 8906-613
benjamin.mehlmann@ilt.fraunhofer.de

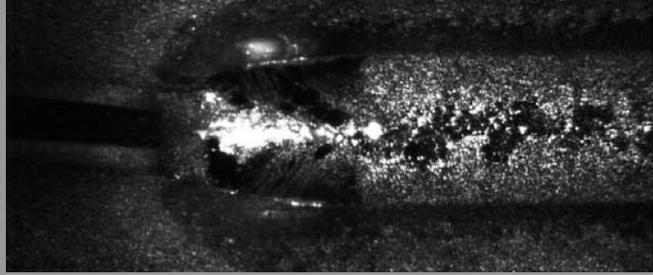
Dr. Alexander Olowinsky
Telefon +49 241 8906-491
alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de

1 Großzelle mit geschweißtem Minuspolableiter.

2 Aufsicht Schweißnähte im Überlapp.



3



4

ONLINE-QUALITÄTSSICHERUNG BEIM LASERSTRAHLHARTLÖTEN

Aufgabenstellung

Das Laserstrahlhartlöten hat sich in der Automobilindustrie für die Karosseriefertigung überall dort etabliert, wo entweder große Spalte überbrückt werden müssen oder wo aufgrund von Einschränkungen in der Tiefziehtechnik einzelne Subkomponenten mit einer Sichtnaht zusammengesetzt werden müssen. Entsprechend werden hohe Anforderungen an die Qualität der Lötnaht hinsichtlich Porenfreiheit und Anbindung des Lotes an die Fügeteile gestellt. Mit einer geeigneten Prozessüberwachung sollten hierfür alle erforderlichen Prozesskenngrößen erfasst und hieraus Aussagen über die Fügequalität getroffen werden.

Vorgehensweise

Für das Laserstrahlhartlöten wurden auf Basis des CPC-Systems (Coaxial Process Control) zwei Kamerasysteme und eine Fremdbeleuchtung koaxial in eine Optik integriert. Die synchronisierten Kamerasysteme überwachen die Qualität der Lötnaht nicht nur im sichtbaren (VIS), sondern auch im nahen infraroten Spektralbereich (NIR). Durch kombinierte Auswertung beider Kamerabilder werden sowohl Prozessparameter (z. B. Vorschubgeschwindigkeit) als auch das Auftreten verschiedener Nahtimperfectionen (z. B. Poren) schon während des Fügeprozesses erkannt und dokumentiert. Durch die Adaption an eine taktil geführte Bearbeitungsoptik wurde ein onlinefähiger Prototyp realisiert. Bereits während des Prozesses wird die Qualität der gelöteten Naht ausgewertet.

Ergebnis

Im Rahmen der Projektarbeit wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Nachrichtentechnik IfN der TU Braunschweig und dem Fraunhofer IPT folgende Ergebnisse erzielt:

- Aufbau eines taktil geführten Prototypen
- Synchronisierte Prozessaufnahmen mit 300 Hz
- Online-Detektion der Vorschubgeschwindigkeit
- Online-Erkennung von Poren ($d < 100 \mu\text{m}$)
- Online-Detektion der Wärmeverteilung
- Online-Dokumentation der Produktqualität

Anwendungsfelder

Die Hauptanwendung des Laserstrahlhartlötens ist das Fügen in der Automobilindustrie. Da sich die Nähte häufig im Sichtbereich des Fahrzeugs befinden, ist eine Qualitätsüberwachung unumgänglich. Mit der entwickelten Online-Überwachung wird eine dem Prozess nachgelagerte Kontrolle eingespart.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens »EQOS« durchgeführt.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Michael Ungers
 Telefon +49 241 8906-281
 michael.ungers@ilt.fraunhofer.de

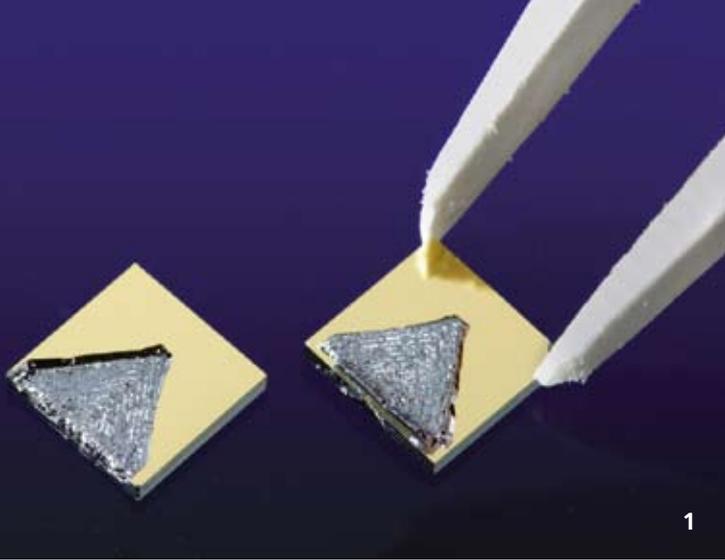
Dipl.-Ing. Peter Abels
 Telefon +49 241 8906-428
 peter.abels@ilt.fraunhofer.de

3 Systemintegration des CPC-Moduls in eine taktil geführte Lötoptik.

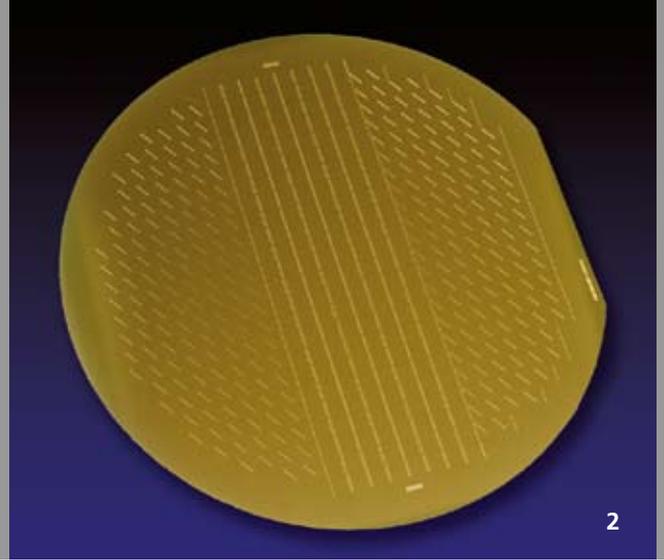
4 Oben: Fremdbeleuchtete Prozessaufnahme (VIS).

Unten: Wärmeverteilung

beim Laserstrahlhartlöten (NIR).



1



2

LASERSTRAHLBONDEN VON METALLBESCHICHTETEM SILIZIUM FÜR DAS WAFER-LEVEL-PACKAGING

Aufgabenstellung

In der Halbleitertechnik und der hybriden Mikrosystemtechnik werden im Zuge der fortlaufenden Miniaturisierung kontinuierlich höhere Anforderungen bezüglich der Temperaturbelastung empfindlicher, multifunktionaler Chips an das Packaging gestellt. Konventionelle flächige Bondverfahren wie z. B. das Anodische Bonden oder das Eutektische Bonden können die funktionalen Bereiche der Chips durch die z. T. hohe Temperaturbelastung in ihrer Funktion beeinträchtigen. Das Laserstrahlbonden ist ein innovatives laserbasiertes Fügeverfahren, das eine signifikant reduzierte Wärmeeinflusszone und eine deutlich verringerte thermische Gesamtbelastung ermöglicht.

Vorgehensweise

Das Laserstrahlbonden beruht auf dem Transmissionsfügen, wobei die Laserstrahlung durch einen Fügepartner transmittiert und durch den anderen Fügepartner absorbiert wird. Bei werkstoffgleichen Fügepartnern werden z. B. absorbierende Zwischenschichten eingesetzt. Das selektive Laserstrahlbonden von Silizium-Silizium wird derzeit am Fraunhofer ILT mit einem

Thulium-Faserlaser ($\lambda = 1940 \text{ nm}$) durchgeführt. Die eingesetzte Laserstrahlung wird vom Silizium-Grundmaterial nicht absorbiert; zur Absorption werden metallische Zwischenschichten eingesetzt. Ziel ist im Rahmen der Verfahrensentwicklung die Ermittlung geeigneter Prozessparameter wie z. B. Laserleistung, Vorschub- bzw. Scangeschwindigkeit und Anpressdruck für verschiedene metallische Zwischenschichtmaterialien.

Ergebnis

Silizium-Silizium-Bondungen konnten bislang erfolgreich mit den Zwischenschichtmaterialkombinationen Gold/Titan, Gold/Chrom, Kupfer/Titan und Kupfer/Tantal hergestellt werden. Dabei wurden sowohl Bondungen mit nur einem Fügepartner mit metallischen Zwischenschichten realisiert als auch Bondungen, bei denen beide Fügepartner mit gleichen Zwischenschichten belegt waren. Durch angepasste Prozessparameter und Verfahrenstrategien konnten flächige und selektive Bondungen mit Bondbreiten $\geq 50 \mu\text{m}$ erzeugt werden.

Anwendungsfelder

Anwendungsfelder sind die Halbleitertechnik und die hybride Mikrosystemtechnik mit dem Packaging siliziumbasierter Produkte wie Beschleunigungs-, Druck- und Drehratensensoren für die Automobilindustrie. Weitere potenzielle Anwendungen liegen in der Licht- und Displaytechnik und der Silizium-Photonik.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Anselm Wissinger
 Telefon +49 241 8906-500
 anselm.wissinger@ilt.fraunhofer.de

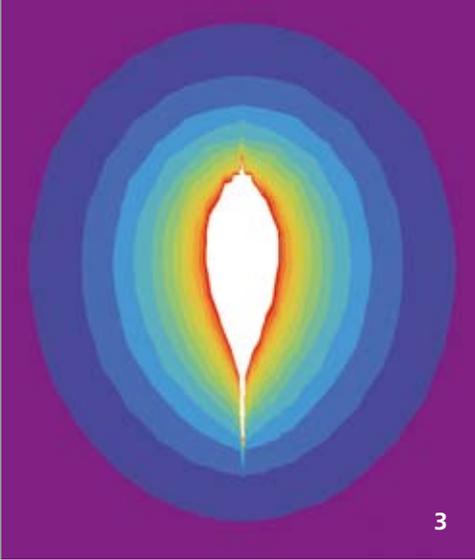
Dr. Alexander Olowinsky
 Telefon +49 241 8906-491
 alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de

1 *Lasergebondete Silizium-Probe mit*

Gold/Titan-Beschichtung nach Zugtest.

2 *Mikrostrukturierter 6-Zoll-Siliziumwafer*

mit Gold/Titan-Beschichtung.



3



4

SIMULATION DER NICHT-LINEAREN ABSORPTION IN DIELEKTRIKA

Aufgabenstellung

Die Bearbeitung dielektrischer Werkstoffe (z. B. Gläser oder wässrige biologische Gewebe) mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung ermöglicht die gezielte Deposition von Energie im Material-Volumen anstatt auf der Material-Oberfläche (wie typisch bei metallischen Werkstoffen), was z. B. für das Schweißen wie auch die volumenselektive Bearbeitung von Glas-Werkstoffen interessant ist. Für eine thermische bzw. strukturmechanische Prozessoptimierung muss die Verteilung der vom Werkstoff absorbierten Energie bekannt sein.

Vorgehensweise

Das Ziel der Modellierung ist die räumlich aufgelöste Beschreibung der Energie-Deposition für den Fall ultrakurzer, hochintensiver Laser-Pulse. Dazu wird sowohl die Dynamik des elektronischen wie phononischen Systems dargestellt als auch die Rückwirkung auf das propagierende Strahlungsfeld berechnet.

Ergebnis

Ein Modell, das die Teilprozesse nichtlineare Absorption, Strahlungspropagation, Temperatur- und Spannungsberechnung enthält, wurde implementiert und anhand erster Fallbeispiele getestet. Das Modell und dessen Simulation werden am Beispiel der Bearbeitung von Glas angewandt und erweitert.

Anwendungsfelder

Die Anwendung des implementierten Modells erstreckt sich auf alle Materialien, die erst durch nichtlineare Prozesse wie Multiphotonen- oder Impakt-Ionisation absorbierend auf die eingebrachte Strahlung wirken. Darunter fallen z. B. Gläser oder wässrige biologische Gewebe. Typischerweise lassen sich die dafür notwendigen großen Strahlungsintensitäten nur mit gepulsten Laser-Systemen erreichen.

Ansprechpartner

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

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

3 *Simulierte Isothermen der nichtlinearen Absorption.*

4 *Querschliff einer Schweißung von Glas.*



LASERSCHWEISSEN VON THERMOPLASTISCHEN FASERVERBUNDBAUTEILEN

Aufgabenstellung

Eine Voraussetzung für die großserientaugliche Anwendung von faserverstärkten Kunststoffen ist die drastische Reduktion von Herstellungskosten und Zykluszeiten im Verhältnis zur konventionellen Fertigungskette für Blechbauteile. Um die funktionellen Anforderungen an die Steifigkeit der Bauteile zu erreichen, ist zu erwarten, dass die Komplexität der Bauteile steigt und sich damit potenziell die Fertigungskosten erhöhen. Als Alternative zu aufwendig gestalteten FVK-Bauteilen bietet sich das Laserschweißen an, mit dem saubere, schnelle und dauerhaft feste Verbindungen zur Erzeugung von geschlossenen Verstärkungsstrukturen in Überlappkonfiguration hergestellt werden können.

Vorgehensweise

Das Laserstrahlschweißen in der industriell gängigen Überlappkonfiguration ist stark von den optischen Eigenschaften der Fügepartner abhängig. Der obere Fügepartner muss ausreichend transparent sein, um die Laserstrahlung möglichst ohne Intensitätsverlust in die Fügezone zu strahlen. Der untere Fügepartner muss stark absorbierend sein, damit die eintreffende Strahlung oberflächennah in Wärme umgesetzt werden kann. Der hohe Faseranteil bei FVK-Strukturbauteilen führt jedoch zu stark variierenden optischen Eigenschaften

und damit zu einer signifikanten Veränderung der Strahlungspropagation. Der Schweißprozess muss diese lokalen Änderungen tolerieren, um zur Serienschweißung geeignet zu sein. Darüber hinaus ist durch die großen Bauteilabmessungen und die dreidimensionalen Geometrien ein Zusammenpressen der Bauteile zu Erzeugung des nötigen Wärmekontakts mit konventionellen Fügevorrichtungen nicht möglich.

Ergebnis

Durch die Vergrößerung des Prozessfensters im Hinblick auf eine möglichst breite Variation der optischen Eigenschaften konnte ein zuverlässiger Arbeitspunkt für eine qualitativ hochwertige Schweißung ermittelt werden. Die Verwendung einer robotergeführten, flexiblen Anpressvorrichtung mit integrierter Bearbeitungsoptik (Firma Leister) ermöglicht das Anpressen auch bei dreidimensionalen Bauteilen.

Anwendungsfelder

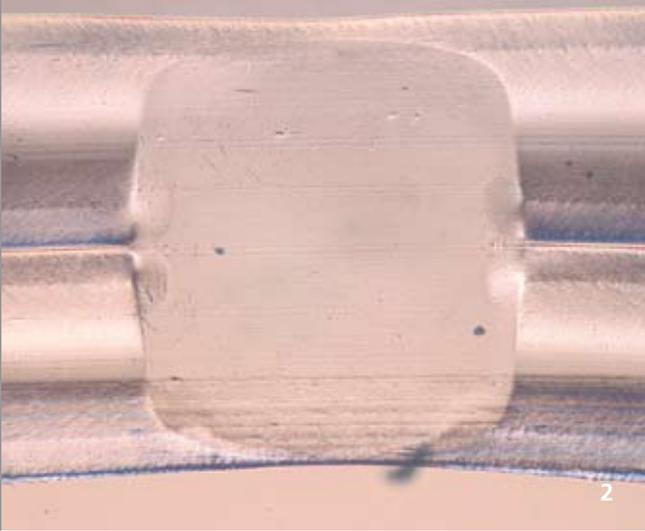
Durch Laserschweißen einer zusätzlichen Versteifungsstruktur können erhöhte Anforderungen in Bezug auf Steifigkeit und Crashtest-Anforderungen erfüllt werden. Insbesondere bei Rücksitzlehnen, die durch die Befestigung des dritten Anschnallgurts erhöhten Anforderungen genügen müssen, ist so eine deutliche Gewichtseinsparung (~ 25 Prozent) möglich.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Andreas Rösner
 Telefon +49 241 8906-158
 andreas.roesner@ilt.fraunhofer.de

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

1 Laserschweißen einer 2/3-Rücksitzlehne (Firma Weber).



LASERSTRAHLSCHWEISSEN TRANSPARENTER PFLANZBEHÄLTER

Aufgabenstellung

Zur Aufbewahrung und zum Transport von Pflanzensetzlingen werden spezielle Kunststoffbehälter verwendet, die aus transparenten Polymeren auf Polypropylen (PP)-Basis bestehen. Zur Vermeidung von Kontaminationen der Kultur müssen die Behälter gasdicht mit einem Deckel verschlossen werden. Die mit einer Aufreißhilfe versehene Verbindung zwischen Deckel und Behälter wird derzeit mittels Ultraschall erzeugt, wobei die Prozessstabilität nicht zufriedenstellend ist, da bereits kleine Abweichungen in Material, Form und Anpressung zu fehlerhaften Verbindungen und damit zur Leckage führen. Als Alternative zum Ultraschallschweißen kommt das Laserstrahlschweißen infrage, da hiermit einerseits die Anforderungen an die Kontaminationsfreiheit erfüllt werden und andererseits eine höhere Prozessstabilität gewährleistet werden kann.

Vorgehensweise

Kunststoffbehälter für Pflanzkulturen müssen transparent sein, damit die Setzlinge ausreichend beleuchtet werden können. Dies würde beim konventionellen Laserkunststoffschweißen die Verwendung eines geeigneten Absorbers erfordern, der hohe Zusatzkosten verursacht und die Transparenz meist nachteilig beeinflusst. Mit einem am Fraunhofer ILT entwickelten neuen Schweißverfahren, bei dem Diodenlaser im nahinfraroten Spektralbereich von 1,5 bis 2,0 μm eingesetzt werden, kann die Verwendung spezieller Absorber entfallen, da die meisten Kunststoffe in diesem Wellenlängenbereich eine ausreichend hohe Absorption aufweisen, um die erforderliche Schmelze zu erzeugen. Am Fraunhofer ILT wurden mit diesem Verfahren

Pflanzbehälter aus PP im Überlapp mit einer speziellen fasergeführten Diodenlaserquelle (Wellenlänge = 1,7 μm) verbunden. Die Schweißgeschwindigkeit betrug 1000 mm/min bei einer Laserleistung von 13 Watt, die Nahtbreite entspricht dem verwendeten Strahldurchmesser von 600 μm .

Ergebnis

In Bild 2 ist der Querschnitt einer mit dem neuen Verfahren geschweißten Verbindung von zwei 0,5 mm dicken PP-Proben dargestellt. Die Fügezone ist homogen und erstreckt sich zur Erzielung einer hohen Festigkeit ausreichend weit über beide Fügepartner. Durch die hohe Flexibilität der Laserstrahlführung erlaubt das Verfahren einen schnellen Wechsel unterschiedlicher Behältergeometrien ohne einen zeitaufwendigen Werkzeugwechsel.

Anwendungsfelder

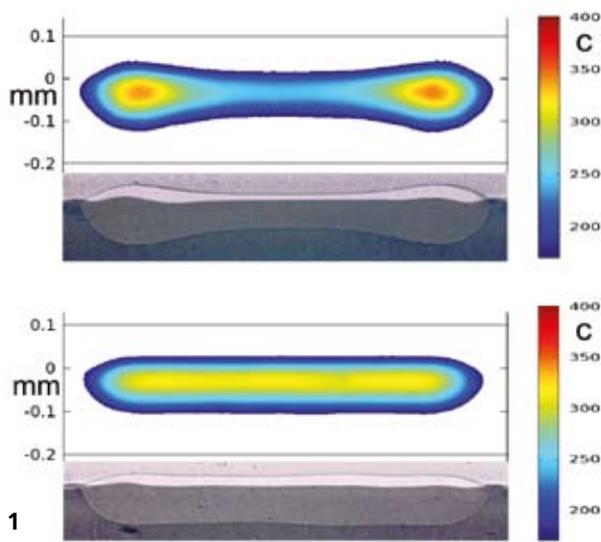
Das Laserschweißen transparenter, unpigmentierter und folienartiger Polymere wird bei Verpackungsanwendungen und auch für Produkte aus den Bereichen Medizintechnik, Mikrofluidik und Bioanalytik eingesetzt.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Gerhard Otto
Telefon +49 241 8906-165
gerhard.otto@ilt.fraunhofer.de

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

2 Mikrotomschnitt der Laserschweißung an Behältern aus 0,5 mm dickem Polypropylen (PP) ohne Strahlungsabsorber; Wellenlänge 1,7 μm .



EINFLUSS DER TWIST®-PARAMETER AUF DIE KUNSTSTOFF-SCHWEISSNAHT

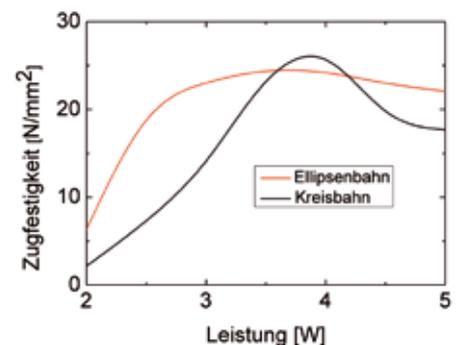
Aufgabenstellung

Beim Kunststoff-Laserstrahlschweißen bietet das TWIST®-Verfahren im Vergleich zum Konturschweißverfahren mehr Möglichkeiten, den Schweißprozess zu optimieren, die Schweißnahtbreite an das Bauteil anzupassen und die Zugfestigkeit der Verbindung zu steigern. Optimale Resultate ergeben sich, wenn sich eine homogene Temperaturverteilung in der Fügezone senkrecht zur Schweißgeschwindigkeit einstellt. Zur Optimierung der Schweißparameter und hier besonders der Freiheitsgrade des TWIST®-Prozesses sollte bereits im Vorfeld eine geeignete Simulationsbasis vorliegen.

Vorgehensweise

Auf der Basis der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung wurde die Temperaturverteilung in den Fügepartnern bei Variation wichtiger Prozessparameter des TWIST®-Prozesses berechnet. Die hier variierten Parameter sind die Ellipsenradien (a : parallel, b : senkrecht zum Vorschub) des periodischen Anteils der TWIST®-Bewegung. Parallel zu den Simulationen wurden Realversuche zur Bestimmung der Festigkeit an Polypropylen mit folgenden Parametern durchgeführt: Strahldurchmesser = $80\ \mu\text{m}$, Schweißgeschwindigkeit = $50\ \text{mm/s}$, TWIST®-Frequenz = $2\ \text{kHz}$.

1 Temperaturverteilung und Mikrotomschnitt
für Kreisbahn (oben), für Ellipsenbahn (unten).



Ergebnis

Bei einer Kreisbahn ($a = b = 400\ \mu\text{m}$) ist die Temperaturverteilung inhomogen mit der typischen Schweißnahtgeometrie (Bild 1 oben). Im Falle einer Ellipsenbahn ($a = 100, b = 400\ \mu\text{m}$) sind die Temperaturverteilung und die Schweißnahttiefe homogen (Bild 2 unten). Dabei zeigen die Zugversuche, dass eine Ellipsenbahn und entsprechend eine homogene Temperaturverteilung zu einer höheren Zugfestigkeit über einen weiteren Parameterbereich führt als eine Kreisbahn (siehe Grafik).

Anwendungsfelder

Mit dem TWIST®-Verfahren lassen sich robuste Prozessfenster bei hoher Schweißnahtfestigkeit insbesondere für Anwendungen im Bereich Automotive, Consumer und Medizintechnik einstellen, bei denen es auf geringe Energieeinbringung und keine Abzeichnung der Naht ankommt.

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



2



3

VERBESSERTE UMFORMUNG HOCHFESTER STÄHLE DURCH LASERWÄRMEBEHANDLUNG

Aufgabenstellung

Leichtbau ist eine effektive Methode, um Verbrauchs- und CO₂-Einsparungen in der Automobilindustrie zu erzielen. Dabei werden gleichzeitig immer höhere Ansprüche an die Crashesicherheit gestellt. Hochfeste Stähle erfüllen beide Anforderungen. Diese sind allerdings schwieriger umzuformen als Tiefziehstähle, da die größere Festigkeit mit einer schlechteren Umformbarkeit einhergeht. Daher wurde im Rahmen des BMBF-Projektes »LOKWAB« (Förderkennzeichen: 02PU2020) die lokale Wärmebehandlung mit Laserstrahlung untersucht, die die Kaltumformbarkeit hochfester Stähle mit bis zu 1200 MPa Zugfestigkeit signifikant verbessern soll. Das Ziel ist, durch die Wärmebehandlung das Material lokal zu entfestigen und damit den Materialfluss bei der Umformung zu verbessern.

Vorgehensweise

Bereiche von Formplatinen werden vor der späteren Kaltumformung mit Laserstrahlung lokal wärmebehandelt. Durch den Einsatz eines fasergekoppelten 10-kW-Hochleistungsdiodelasers und einer Optik mit rechteckiger, homogener Leistungsdichteverteilung von bis zu 90 mm Breite wird eine gleichmäßige und schnelle Wärmebehandlung erzielt. Die lokal entfestigten Platinen werden in einem nächsten Schritt zu B-Säulen umgeformt.

Ergebnis

Die wärmebehandelten Bereiche weisen eine um den Faktor 5 erhöhte Fließfähigkeit des Materials auf, sodass kritische Bereiche riss- und einschnürungsfrei umgeformt werden können. Durch die lokal angepassten mechanischen Eigenschaften der Platinen können B-Säulen aus ca. 50 Prozent festeren Stählen als bisher umgeformt werden. Durch mehrere Schleifen aus Simulation, Wärmebehandlung und Umformung konnte die für eine sichere Umformung benötigte Entfestigungszone verkleinert werden, die Bearbeitungszeit wurde dabei von über 2 Minuten auf 42 Sekunden reduziert.

Anwendungsfelder

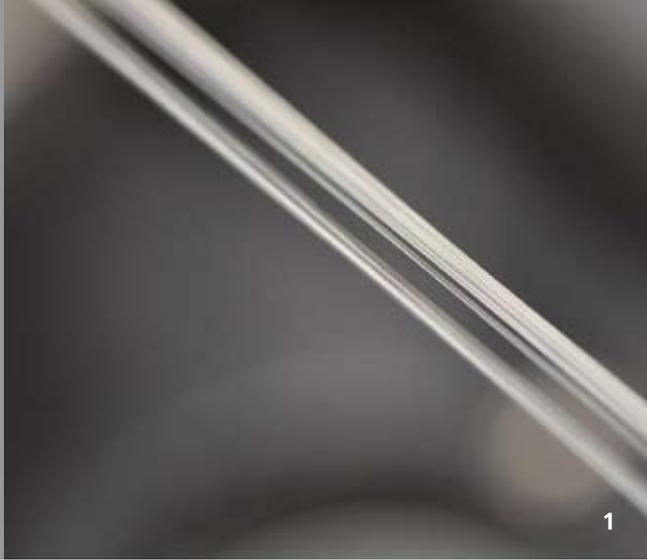
Hauptanwendungsfeld ist die Automobilindustrie. Das Verfahren ermöglicht es, das Bauteilspektrum für hochfeste Stähle zu erweitern. Vorhandene Umformlinien können weiterhin genutzt werden. Durch eine weitere Erhöhung der Laserleistung und Minimierung der Entfestigungszone soll die Bearbeitungsdauer in der Zukunft weiter reduziert werden.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Georg Bergweiler
Telefon +49 241 8906-602
georg.bergweiler@ilt.fraunhofer.de

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

- 2 *Gerissene B-Säule aus MS-W1200.*
3 *B-Säule aus MS-W1200, hergestellt aus einer laserentfestigten Platine (Entfestigungszone = dunkle Bereiche).*



1

1 PAN-Fasern.

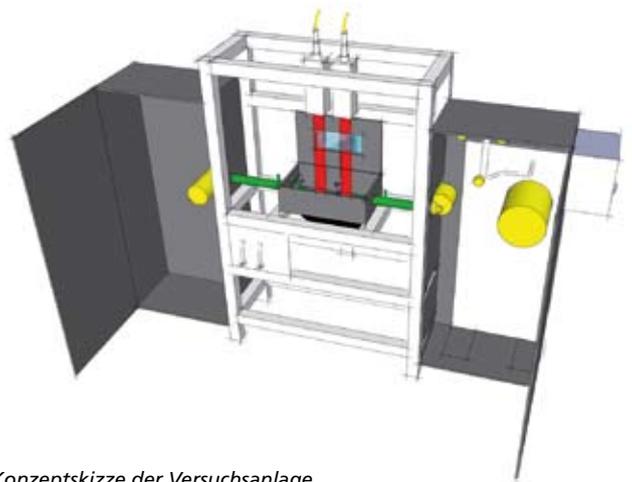
LASERBASIERTE, EFFIZIENTE HERSTELLUNG VON CARBONFASERN

Aufgabenstellung

Leichtbautechnologien sind ein wichtiger Baustein für eine nachhaltige CO₂-Reduzierungsstrategie, insbesondere im Automobilbau und der Luft- und Raumfahrt. Dafür bieten carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) mit einer gegenüber Aluminium bis zu 2,5-fach höheren spezifischen Festigkeit einen exzellenten Ansatzpunkt. Im Bereich Luft- und Raumfahrt wird diese Werkstoffgruppe seit Jahrzehnten in immer höheren Anteilen verwendet (Beispiele sind der Airbus A 380 und die Boeing 787). Ein Grund für den bisher begrenzten Einsatz im Automobilbau sind die hohen Materialkosten der Carbonfasern. Knapp die Hälfte der Materialkosten ist auf die erforderliche 2-stufige Wärmebehandlung (Stabilisierung und Carbonisierung) der kohlenstoffhaltigen Vorläuferfasern (meist aus Polyacrylnitril oder Pech) zu Carbonfasern zurückzuführen. Gründe sind die langen Verweilzeiten in den Öfen (bis zu 2 Stunden) sowie die hohen Energieaufwendungen (Temperaturen bis 1400 °C), die bei der Wärmebehandlung erforderlich sind.

Vorgehensweise

Im Rahmen des vom Land NRW geförderten Projekts »MegaCarbon« wird in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern eine ressourcen-effiziente und hochproduktive Herstellung von Carbonfasern für ein breites Anwendungsspektrum entwickelt. Neben der klassischen Wärmebehandlung der Vorläuferfasern in Öfen wird die Nutzung von Laserstrahlung als Energiequelle für die Stabilisierung und Carbonisierung untersucht.



Konzeptskizze der Versuchsanlage.

Ergebnis

Der Fokus liegt zu Beginn des Projekts auf der Evaluierung der temperaturabhängigen optischen Eigenschaften der Vorläuferfasern aus Polyacrylnitril. Daneben werden mittels Simulationsrechnungen die Strahlpropagation im Faserbündel sowie die Temperaturverteilung in Faserrichtung untersucht. Parallel wird eine Anlage ausgelegt und konstruiert, die Versuche zur Wärmebehandlung von bewegten Fasern unter Schutzgasatmosphäre ermöglichen wird.

Anwendungsfelder

Bei erfolgreicher Implementation wird das Anwendungsspektrum von CFK-Komponenten durch signifikant reduzierte Herstellungskosten deutlich erweitert.

Ansprechpartner

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

Dr. Konrad Wissenbach
Telefon +49 241 8906-147
konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de



2



3

GENERATIVE FERTIGUNG MITTELS LASERAUFTRAG- SCHWEISSEN

Aufgabenstellung

Laserauftragschweißen ist ein generatives Fertigungsverfahren, mit dem metallische Bauteile gefertigt oder bestehende Bauteile im Hinblick auf eine Funktionsintegration (z. B. Verbesserung der Steifigkeit) modifiziert werden können. Vor dem Hintergrund immer kürzerer Produktentwicklungszeiten bietet dieses Verfahren ein hohes Maß an Flexibilität und die Möglichkeit, Kleinserien und Funktionsprototypen rasch zu fertigen. Bei dieser generativen Fertigung wird ein Bauteil Schicht für Schicht in einem schmelzmetallurgischen Prozess aufgebaut. Das Ergebnis ist ein endkonturnahes Bauteil mit nahezu 100 Prozent Dichte und einem Eigenschaftsprofil, das den Spezifikationen des Serienwerkstoffs entspricht.

Vorgehensweise

Ein pulverförmiger Zusatzwerkstoff wird mittels eines inerten Trägergases an den Bearbeitungsort geführt. Der Pulverwerkstoff wird mit einem Laserstrahl vollständig aufgeschmolzen. Gleichzeitig schmilzt die Laserstrahlung eine dünne Randschicht der vorherigen Lage auf, sodass ein schmelzmetallurgischer Verbund entsteht. Pro Lage können typischerweise Schichtdicken von 0,3 bis 2 mm aufgetragen werden. Durch simultane Zufuhr von zwei Werkstoffen, deren Mengenanteile für jede Schicht angepasst werden, können gradierte Volumina aufgebaut werden. Ebenso können hybride Bauteile aus verschiedenen metallischen Werkstoffen hergestellt werden. Die Programmierung der Werkzeugbahnen erfolgt offline mit einer an das Auftragschweißen angepassten

Software. Typische Werkstoffe, die verarbeitet werden können, sind Aluminiumgusslegierungen, Titanlegierungen oder Stahl. Bei harten Werkstoffen ist eventuell eine Vorwärmung erforderlich, um Risse zu vermeiden.

Ergebnis

Im Ergebnis entsteht ein nahezu 100 Prozent dichtes endkonturnahes Bauteil, das mit einem Aufmaß von 0,2 bis 0,5 mm hergestellt ist. Hohlstrukturen sind mit Wandstärken unter 1 mm realisierbar. Die Endbearbeitung von Funktionsflächen erfolgt dann z. B. durch Fräsen oder Erodieren. Falls erforderlich, kann das Bauteil noch einer Wärmebehandlung unterzogen werden (z. B. Spannungsarmglühen, Auslagern).

Anwendungsfelder

Generatives Laserauftragschweißen kann für die Herstellung von Funktionsprototypen und (Klein-)Serienteilen eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind Werkzeug- und Formeneinsätze, Funktionsprototypen für die Automobiltechnik, Unikate und Kleinserien-Bauteile für Luft- und Raumfahrt.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Dominik Dobrzanski
Telefon +49 241 8906-631
Dominik.dobrzanski@ilt.fraunhofer.de

Dr. Andreas Weisheit
Telefon +49 241 8906-621
andreas.weisheit@ilt.fraunhofer.de

- 2 *Generativ gefertigtes Musterteil aus einer Aluminiumlegierung.*
3 *Generativ gefertigtes Musterteil aus einer Stahllegierung.*



GENERATIVE FERTIGUNG VON BLISKS DURCH LASER- AUFTRAGSCHWEISSEN

Aufgabenstellung

BLISks werden zurzeit unter großem Material- (Materialverlust ca. 80 Prozent) und Energieeinsatz sowie großem Zeitaufwand durch z. B. 5-Achs-Fräsen gefertigt, was bei den verwendeten hochwertigen Materialien sehr hohe Produktionskosten verursacht. Ziel ist die Entwicklung einer neuen Fertigungstechnologie, die sowohl die oben genannten Verluste als auch die Produktionskosten signifikant reduziert. Die generative Fertigung von BLISks reduziert diese Verluste und bietet eine vielversprechende Lösung: Materialeinsparungen von ca. 60 Prozent und eine Verkürzung der Fertigungszeit um ca. 30 Prozent werden im Vergleich zu konventionellen Verfahren erwartet. Die Verfügbarkeit der neuen, generativen Fertigung gewährleistet (a) eine ressourcenschonende und somit Zeit und Kosten sparende Fertigung, (b) neue Designmöglichkeiten ohne geometrische Restriktionen – »designed for function, only« – sowie (c) die Erschließung neuer, kürzerer, effizienterer Prozessketten.

Vorgehensweise

Zunächst werden Prozessdiagramme entwickelt, die für einen ausgewählten Werkstoff (z. B. IN 718) Parameterfenster für signifikant gesteigerte Auftraggraten dokumentieren. Hierzu werden Parameterstudien bei Laserleistungen bis zu 10 kW

1 *Auftragschweißen von Testschaufeln auf einem BLISK-Demonstrator.*

2 *Innovative Abschirmung von atmosphärischen Gasen beim Auftragschweißen.*

durchgeführt. Durch die Verwendung einer Zoomoptik können die Spurbreiten darüber hinaus variiert werden, sodass auch bei einlagiger Stegbauweise, z. B. des Schaufelblatts, endkonturnah gearbeitet werden kann. Zur Überprüfung der Materialeigenschaften werden schaufelähnliche Probenkörper für Zug- und Dauerschwingversuche auf einem BLISK-Demonstrator (siehe Bilder) hergestellt. In einem weiteren Schritt erfolgt die Anpassung auf ein OEM-Bauteil.

Ergebnis

Auftragraten bis zu 3,5 kg/h können mit Spurbreiten zwischen 2 und 4 mm erreicht werden, wobei die Materialeigenschaften (bisher untersucht: Zugfestigkeit) an die von gegossenem IN 718 heranreichen. Eine Modellschaufel kann endkonturnah binnen 2 Minuten aufgebaut werden. Bei der hierbei realisierten Auftragrate kann bezüglich der Geometrie eine Toleranz von +/- 200 µm bei einem gewählten Aufmaß von 500 µm für die spanende Endbearbeitung eingehalten werden.

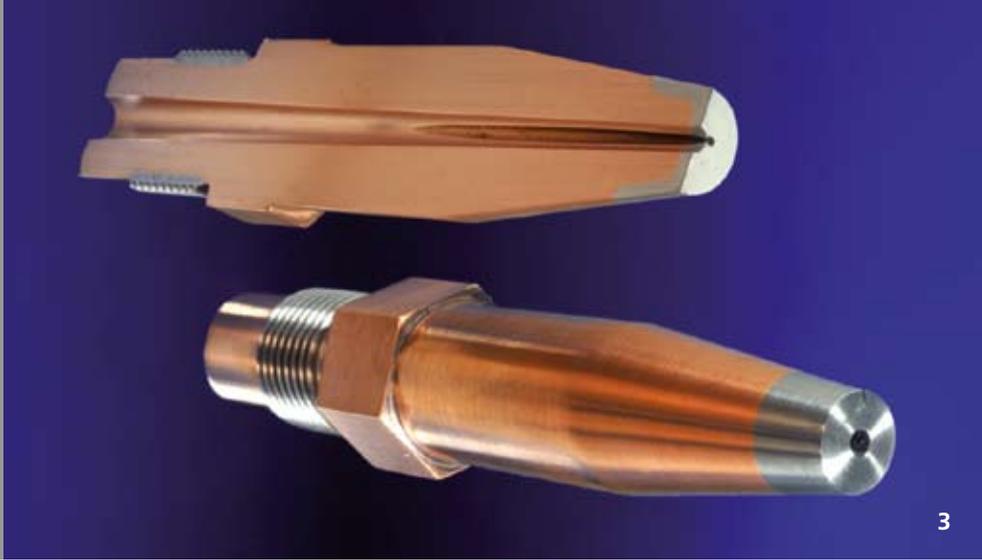
Anwendungsfelder

Anwendungsgebiet ist die Luft- und Raumfahrt, insbesondere die Triebwerkstechnik. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist der Verschleiß- und Korrosionsschutz, dort, wo hohe Auftragraten bei gleichzeitig hohen Anforderungen an die Konturtreue benötigt werden.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Johannes Witzel, M. Eng.
Telefon +49 241 8906-535
johannes.witzel@ilt.fraunhofer.de

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



3

INNOVATIVE BAUTEILE FÜR SPRITZGIESSWERKZEUGE AUS KUPFERWERKSTOFFEN MIT LOKALEM VERSCHLEISS-SCHUTZ

Aufgabenstellung

Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer bietet der Werkstoff Vorteile für das exakte Wärmemanagement in einer Spritzgießmaschine, um z. B. das Erstarren des flüssigen Kunststoffs auf dem Weg vom Extruder in die Form zu verhindern oder in der Heißkanaldüse einspritzfertig vorzuhalten. Der Nachteil sind die geringen Standzeiten infolge der gegenüber Stahl vergleichsweise geringen Verschleißfestigkeit. Ein Lösungsansatz ist der lokale Verschleißschutz durch eine Beschichtung, die mittels Laserauftragschweißen aufgebracht wird. Ziel ist eine Erhöhung der Standzeiten um den Faktor 3 bis 4 gegenüber dem Stand der Technik.

Vorgehensweise

Beim Laserauftragschweißen wird in die Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstoff Metallpulver appliziert und im Laserstrahl geschmolzen. Durch Aufschmelzen der Randschicht des Grundwerkstoffs erfolgt eine schmelzmetallurgische Anbindung des Beschichtungswerkstoffes mit dem Grundwerkstoff. Als Verschleißschutzwerkstoffe werden Kobaltbasislegierungen (Stellite) verwendet. Die Verschleißschutzschichten werden auf Kupferrohlinge aufgebracht, aus denen dann die Bauteile endgefertigt werden. Die Schichten werden nur dort aufgebracht, wo beim fertigen Bauteil die Bereiche größter Beanspruchung bestehen, z. B. bei der

Vorkammerbuchse oder der Heißkanaldüse. Die Verfahrensentwicklung und Bauteilerprobung im Feldversuch erfolgt in Zusammenarbeit mit der Firma Schmelzmetall (Hersteller von Kupferhalbzeugen) und der Firma Pallas (Dienstleister für Oberflächentechnik) im Rahmen des ZIM-Vorhabens »INKULAS«.

Ergebnis

Stellit 21, Stellit 6 sowie Metco 42 C wurden rissfrei und porenarm auf den Werkstoffen K 220 und K 265 aufgebracht. Zur optimalen Anbindung an das Kupfer wird zuvor eine Pufferlage aus einer Nickellegierung aufgetragen. Aus beschichteten Rohlingen werden Heißkanaldüsen gefertigt. Feldversuche sind Gegenstand laufender Arbeiten.

Anwendungsfelder

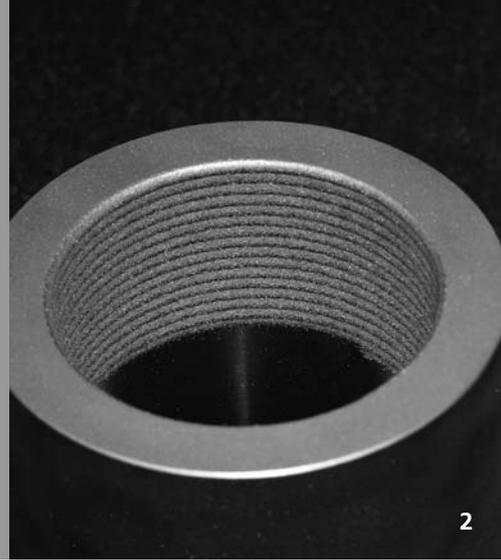
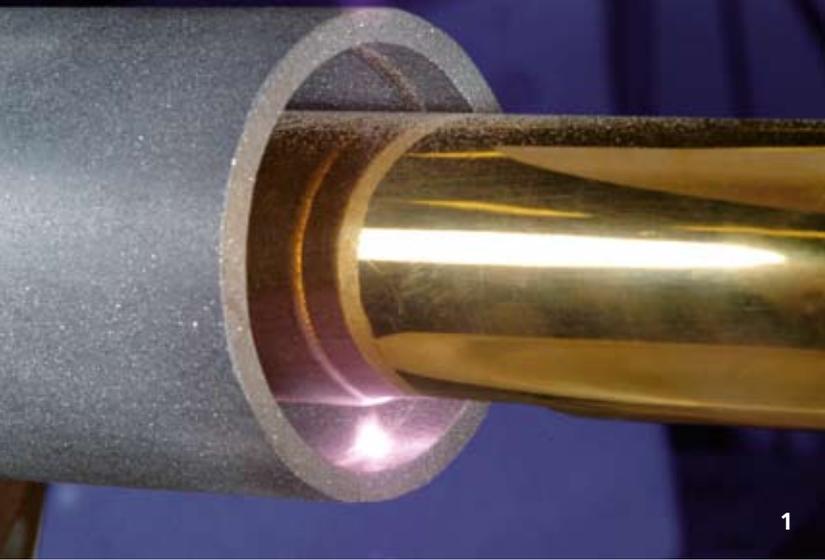
Das unmittelbare Anwendungsfeld ist die kunststoffverarbeitende Industrie und deren Zulieferer. Weitere Anwendungsfelder sind dort zu sehen, wo die hohe Wärmeleitfähigkeit oder elektrische Leitfähigkeit von Kupfer erforderlich ist, gleichzeitig aber auch ein hoher Verschleißschutz gefordert ist, wie z. B. in der Druckgießindustrie.

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 Schnitt einer beschichteten Maschinendüse (oben), nach ca. 6 Monaten im industriellen Einsatz (unten), Werkstoff: K 265, Spitze: Stellit 21, Gewinde: Metco 42 C (Fa. Netstal).



HOCHLEISTUNGS-INNENBE- SCHICHTUNGSKOPF FÜR DAS LASERAUFTRAGSCHWEISSEN MIT GROSSEN AUFTRAGRATEN

Aufgabenstellung

Pulverbasiertes Laserauftragschweißen (LA) ist ein Verfahren für die Reparatur und Modifikation von Bauteilen. Anwendungen, bei denen Innenflächen (meistens rotationssymmetrisch) beschichtet werden müssen, gewinnen zunehmend an Bedeutung für die Reparatur (z. B. Motoren, Werkzeuge) oder den Verschleißschutz (z. B. Lagerbuchsen). Für Durchmesser kleiner als 100 mm sind spezielle Bearbeitungsköpfe mit integrierter Pulverzufuhr erforderlich. Diese Köpfe verfügen bisher nicht über die notwendige Standzeit für das Auftragschweißen über mehrere Stunden bei hohen Leistungen (> 2 kW). Dieses Defizit muss für die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und eine damit einhergehende breitere Nutzung überwunden werden. Ziel der Entwicklung im Rahmen des BMBF-geförderten Vorhabens »HIPOTIN« ist ein Innenbearbeitungskopf, der für Laserleistungen bis zu 6 kW (Diodenlaser) und einen Innendurchmesser der zu bearbeitenden Bauteile von > 50 mm genutzt werden kann.

1 Innenbearbeitungsoptik im Betrieb.

2 Beschichtetes Bauteil.

Vorgehensweise

Es wurde ein Bearbeitungskopf mit einer verbesserten Kühlung des kompletten Tubus und des Umlenkspiegels entwickelt. Die Temperatur des Umlenkspiegels wird mittels eines Thermoelements überwacht, um eine Überhitzung frühzeitig zu erkennen. Die Brennfleckgröße auf dem Werkstück wurde auf 5 mm Durchmesser vergrößert (bisher 3 mm).

Ergebnis

In ersten Tests konnten im Dauertest ($t > 1$ h) mit dem Bearbeitungskopf bei Laserleistungen bis 4 kW einlagig Schichtdicken > 1 mm erzielt werden. Der Spiegel erwärmt sich dabei auf eine Temperatur von max. 60 °C. Auftragraten von 2 kg/h konnten bisher realisiert werden.

Zurzeit wird der Kopf unter industriellen Bedingungen bis 6 kW getestet. Das Ziel sind Auftragraten bis 5 kg/h.

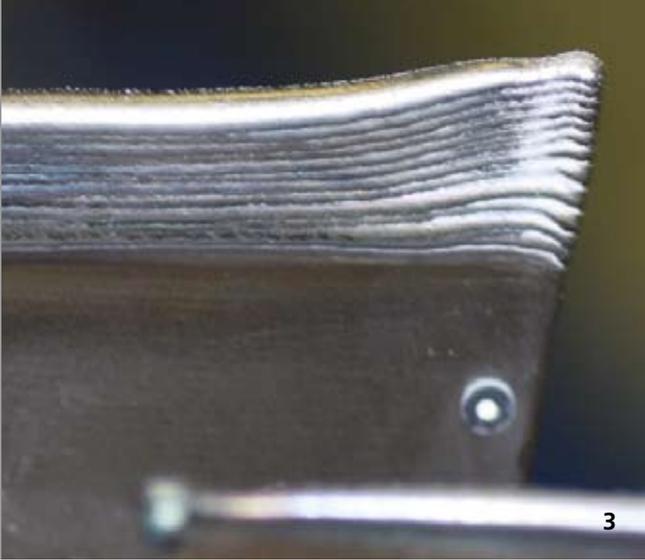
Anwendungsfelder

Der neue Innenbearbeitungskopf kann zum Beispiel für den Verschleißschutz von Lagerbuchsen für die Ölförderindustrie eingesetzt werden. Eine andere Anwendung ist die Reparatur von Zylinderlaufflächen großer Dieselmotoren.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Jung
Telefon +49 241 8906-409
stefan.jung@ilt.fraunhofer.de

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



VERWENDUNG EINER ZOOM-OPTIK ZUR REPARATUR VON SCHAUFELSPITZEN

Aufgabenstellung

Das Laserstrahlaufragschweißen ist als Reparaturverfahren in den letzten Jahren erfolgreich in die Industrie eingeführt worden. Typische Anwendungen finden sich z. B. in der Luftfahrtindustrie. Ein Beispiel ist die Reparatur von Verdichterschaufeln. Heutige Verdichterstufen in Flugtriebwerken sind in sogenannter BLISK-Bauweise (Blade Integrated Disk) ausgeführt, d. h. die Scheibe und alle Schaufeln einer Verdichterstufe werden direkt aus einem Teil gefräst. Im Betrieb unterliegen die Schaufeln an der Spitze Verschleiß durch Abrasion. Aufgrund der hohen Material- und Herstellungskosten der BLISKS soll ein Reparaturverfahren durch Laserstrahlaufragschweißen entwickelt werden, welches eine konturgenaue Reparatur mit möglichst geringem Verzug ermöglicht.

Vorgehensweise

Die Schaufelspitze hat eine variable Breite von ca. 0,3 bis 2 mm. Durch die Verwendung einer Zoom-Optik kann im Gegensatz zu einer Standard-Optik der Laserstrahl an der Bearbeitungsstelle während des Prozesses direkt an die jeweilige Breite der Schaufel angepasst werden.

Für die Reparatur wird eine »VarioClad – Moving Optics« in Kombination mit einem Nd:YAG-Laser verwendet.

Ergebnis

Die Zoom-Optik konnte erfolgreich für die Schaufelspitzen-Reparatur eingesetzt werden. Eine Variation des Laserstrahldurchmessers von ca. 0,6 bis 2 mm, entsprechend der Schaufelbreite, wurde realisiert. Zusätzlich wurde die Laserleistung an die Spurbreite angepasst. Insgesamt wurden 23 Lagen für den Aufbau von ca. 6 mm aufgetragen. Die Breite des auftraggeschweißten Volumens ist endkonturnah (ca. 0,2 mm Übermaß an jeder Seite), sodass eine mechanische Endbearbeitung auf Sollgeometrie ermöglicht wird.

Anwendungsfelder

Anwendung kann die Zoom-Optik überall dort finden, wo die Erzeugung einer variablen Spurbreite erforderlich oder vorteilhaft ist. Das sind meistens Steggeometrien, aber auch flächige Beschichtungen mit hoher Konturgenauigkeit können z. B. mit einer Hülle-Kern-Strategie (schmale Spuren für die Kontur, breite Spuren zum Auffüllen der Fläche) ohne Umrüstarbeit und somit zeitsparend realisiert werden. Interessant ist die Optik auch für Dienstleister, die unterschiedliche Beschichtungen ohne große Umrüstarbeiten realisieren wollen. Die »VarioClad – Moving Optics« wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Reis Lasertec entwickelt.

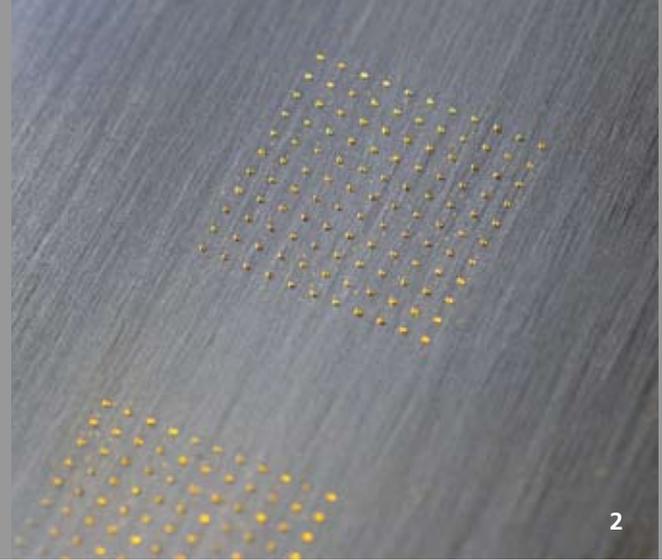
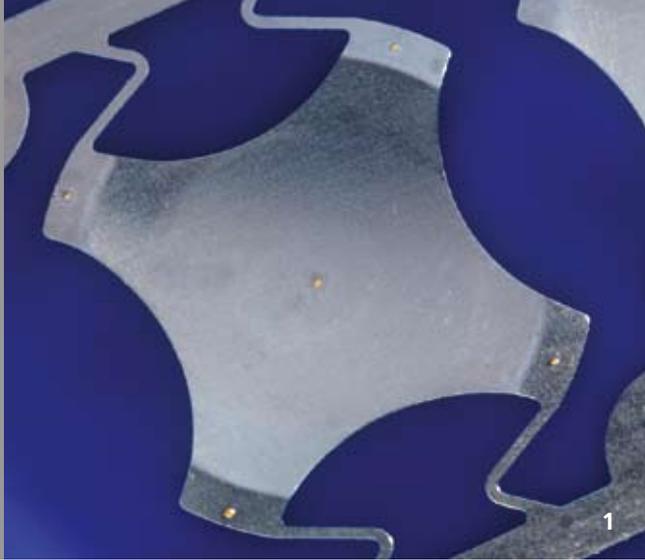
Ansprechpartner

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

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

3 Auftraggeschweißte Schaufelspitze.

4 VarioClad – Moving Optics.



MIKRO-LASERAUFTRAGS- SCHWEISSEN VON GOLDKONTAKTPUNKTEN

Aufgabenstellung

Das Mikro-Laserauftragschweißen (Mikro-LA) eignet sich z. B. zum Aufbringen elektrischer Kontakte. In der Elektroindustrie wird eine Fülle von Bauteilen eingesetzt, die zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit mit Gold beschichtet werden. Herkömmlich wird Gold großflächig z. B. mittels Galvanik aufgebracht. Durch selektives Aufschweißen von Goldkontaktpunkten mittels Mikro-LA werden nur die zur Kontaktierung benötigten Flächen beschichtet und erlauben somit eine signifikante Einsparung des teuren Goldes unter Beibehaltung der erforderlichen Kontakteigenschaften.

Vorgehensweise

Beim Mikro-Laserauftragschweißen von Goldkontaktpunkten wird das pulverförmige Zusatzmaterial mittels einer Düse in die Wechselwirkungszone von Laser und Substratmaterial (z. B. Edelstahl, Nickellegierung) eingebracht. Die Laserenergie schmilzt sowohl eine dünne Randschicht des Substrats als auch das Goldpulver auf, sodass ein Goldkontaktpunkt aufgeschweißt wird, welcher schmelzmetallurgisch mit dem Substrat verbunden ist. Durch die Verwendung eines Faserlasers mit

einem Strahldurchmesser unter 100 µm und Pulver mit Korndurchmessern unter 10 µm können Kontaktpunkte weit unter 100 µm Durchmesser und Höhe aufgetragen werden. Neben reinem Gold können auch Hartgoldlegierungen zur Verbesserung des abrasiven Verschleißwiderstands eingesetzt werden.

Ergebnis

Für die Kontaktierung von Schnappscheiben ist nachgewiesen, dass die flächige Goldbeschichtung durch fünf selektiv aufgeschweißte Goldkontaktpunkte ersetzt werden kann. Die elektrischen Eigenschaften dieser Goldpunkte sind vergleichbar mit denen der galvanischen Beschichtung. In einem Teststand wurde ein Lebensdauererprobungstest mit 100 000 Betätigungen erfolgreich abgeschlossen. Zur Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit laufen derzeit in dem vom BMBF geförderten Vorhaben »MIFULAS« Untersuchungen zum simultanen Auftragschweißen von bis zu 20 Kontakten mittels Mehrstrahlbearbeitung durch Strahlteilung.

Anwendungsfelder

Das Mikro-LA von Kontakten aus Edelmetallwerkstoffen ist grundsätzlich für alle metallischen Bauteile geeignet, die derzeit galvanisch kontaktiert werden. Beispiele sind Schaltelemente für Handys oder Bipolarplatten für Brennstoffzellen.

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

1 Goldkontaktpunkte auf Schnappscheibe (Quelle: INOVAN).

2 Mikrogoldpunkte auf Edelstahl.



SELECTIVE LASER MELTING VON NICKELBASIS-SUPER- LEGIERUNGEN

Aufgabenstellung

Das generative Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM) ermöglicht die direkte Fertigung komplexer metallischer Bauteile. Eine wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Fertigungsverfahren stellt das SLM dabei u. a. für die Kleinserien- oder Prototypenfertigung dar. In der Herstellung hochtemperaturbeanspruchter Bauteile ist der Einsatz derzeit allerdings noch durch die verarbeitbaren Werkstoffe limitiert. Insbesondere Nickelbasis-Superlegierungen, die sich durch eine hohe mechanische Festigkeit sowie Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen auszeichnen, sind dabei von großer Relevanz. Die Hochtemperaturfestigkeit dieser Legierungen steigt dabei mit dem Volumenanteil der γ' -Phase, eine Ausscheidung der Form $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$. Analog zum Schweißen neigen aber Superlegierungen mit hohem γ' -Gehalt zur Rissbildung bei der Verarbeitung mittels SLM. In Zusammenarbeit mit Industriepartnern wird derzeit in verschiedenen Projekten die Verarbeitbarkeit dieser Legierungen untersucht. Ziel ist, ein Verständnis der zugrunde liegenden Rissbildungsmechanismen zu erlangen und darauf basierende Lösungsansätze zur rissfreien Verarbeitung zu entwickeln.

Vorgehensweise

Durch die gezielte Anpassung von Verfahrensparametern können unterschiedliche Erstarrungsbedingungen beim SLM eingestellt werden, was die systematische Untersuchung der Einflussgrößen auf die Rissbildung ermöglicht. Ein Fokus liegt dabei auf dem Einfluss der Vorheiztemperatur im Prozess.

Für Nickelbasis-Superlegierungen sind Vorheiztemperaturen $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ interessant, die in Laboraufbauten durch neue Heizungskonzepte realisiert werden müssen.

Ergebnis

Im Labor konnte die grundsätzliche Machbarkeit der rissfreien Verarbeitung hoch γ' -haltiger Legierungen durch die Verwendung von Vorheiztemperaturen $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ gezeigt werden. Aktuell wird die Entwicklung von Prozessführung und Anlagentechnik zur Übertragung der Ergebnisse auf den Aufbau komplexer Bauteile durchgeführt.

Anwendungsfelder

Großes Potenzial hat die Verarbeitung von Nickelbasis-Superlegierungen mittels SLM in der Energie- und Luftfahrtindustrie im Bereich von Gasturbinen. Turbinenschaufeln können z. B. mit komplexen internen Strukturen zur Steigerung der Kühlungseffizienz oder zur Gewichtsreduzierung hergestellt werden.

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

3 Aus einer Superlegierung mittels SLM gefertigter Stator und Rotor einer Mikrogasturbine. Konstruktive Auslegung durch das Fraunhofer IPT.



1



2

KONTROLLE DES SELECTIVE-LASER-MELTING-PROZESSES

Aufgabenstellung

Seit etwa Anfang der Neunzigerjahre haben sich die generativen Fertigungsverfahren in der industriellen Produktentwicklung etabliert. Mit Selective Laser Melting (SLM) hergestellte Bauteile weisen bezüglich Dichte, Gefüge und mechanischer Kennwerte weitgehend serienidentische Eigenschaften auf. Somit hat das Verfahren das Potenzial, auch für den direkten Serieneinsatz verwendet zu werden. Ein Hindernis für den Serieneinsatz ist u. a. die fehlende Qualitätssicherung und -kontrolle während des Prozesses. Fehler werden oft während des mitunter mehrere Stunden (bis zu 100 h) dauernden Produktionsprozesses nicht detektiert. Somit sollen Methoden zur Kontrolle des SLM-Prozesses entwickelt werden mit dem Ziel, Fehler frühzeitig zu erkennen und betroffene Bauteile aussortieren zu können bzw. die Fehler zu korrigieren.

Vorgehensweise

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Vorhabens »GenErgie« wird im ersten Schritt als Basis für ein Kontrollsystem die visuelle Erfassung der Schmelzbadgeometrie angestrebt. Das Eigenleuchten der Schmelze und die reflektierte Laserstrahlung werden mittels eines vor der Kamera positionierten Filters unterdrückt, die Beleuchtung des zu beobachtenden Gebiets erfolgt mithilfe eines Diodenlasers, die Beobachtung mittels einer CMOS-Kamera. Sowohl die Kamera als auch der Diodenlaser sind koaxial zum Bearbeitungslaser angeordnet. Im Rahmen der Untersuchung wurden mehrere CMOS-Kameras und Beleuchtungssysteme erprobt.

Ergebnis

Die besten Ergebnisse werden bei kohärenter koaxialer Beleuchtung mit einer Wellenlänge von 810 nm erzielt. Dadurch werden hohe Beleuchtungsstärken erreicht, die eine Zeitauflösung von ca. 10 μ s/Bild erlauben. Die Kameraauflösung von ca. 15 x 15 μ m²/Pixel ermöglicht die Aufnahme des Prozesses mit einer Frequenz von bis zu 15 kHz. Die spektrale Empfindlichkeit der Kamera liegt zwischen 320 und 1100 nm. Dabei ist es möglich, eine Bildgröße von ca. 4 mm² zu erreichen. Bei dieser Auflösung können die ca. 200 μ m große Schmelzbadgeometrie, einzelne Pulverkörner der Größe von 20 bis 45 μ m und die Pulverbewegung auf der Probe bei Scangeschwindigkeiten von ca. 800 mm/s aufgelöst und beobachtet werden. Simulierte Fehlstellen in Form von Nuten und unregelmäßigem Pulverauftrag können direkt detektiert werden.

Anwendungsfelder

Ein System zur Prozesskontrolle ist grundsätzlich für das SLM-Verfahren in allen Anwendungsbereichen vorteilhaft einsetzbar.

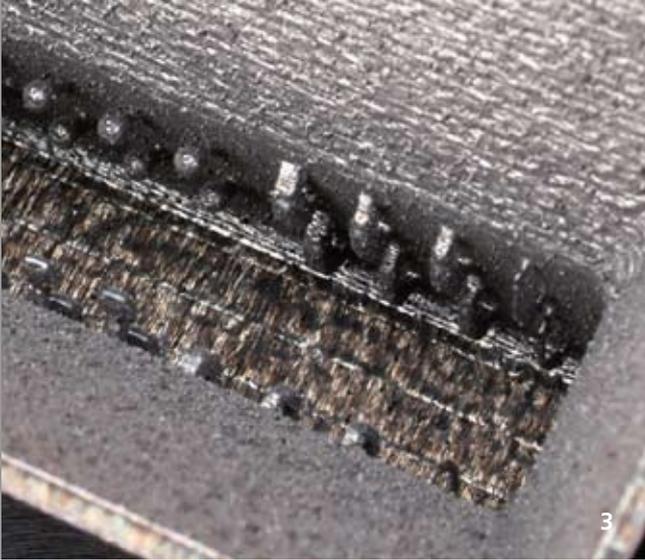
Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Andrei Diatlov
 Telefon +49 241 8906-608
 andrei.diatlov@ilt.fraunhofer.de

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

1 Dentalprothese, hergestellt mit SLM.

2 Anschlag der Firma Festo, hergestellt mit SLM.



WERKZEUGE AUS WERKSTOFFKOMBINATIONEN

Aufgabenstellung

Selective Laser Melting (SLM) findet unter anderem Anwendung für die direkte Fertigung von Formeinsätzen für Spritzgusswerkzeuge. Die große Geometriefreiheit des SLM wird beispielsweise zur Fertigung von Formeinsätzen mit kompliziert geformten konturnahen Kühlkanälen mit variierender Querschnittsgeometrie eingesetzt, um eine möglichst effektive Temperierung zu erreichen. Die Konstruktion von konturnahen Kühlkanälen kann abhängig von der Werkzeuggeometrie sehr zeitaufwendig sein.

Vorgehensweise

Als Alternative zur Temperierung mittels komplexer konturnaher Kühlkanäle entwickelt das Fraunhofer ILT in Zusammenarbeit mit dem Gießerei-Institut der RWTH Aachen und industriellen Partnern im Rahmen des AiF-geförderten Vorhabens »GenCast« die Herstellung von Formeinsätzen aus Werkstoffkombinationen. Hierbei werden die Vorteile von Werkzeugstahl mit hoher Verschleißbeständigkeit und z. B. Kupfer oder Aluminium mit hoher Wärmeleitfähigkeit in einem Bauteil vereint. Die Herstellung erfolgt in einem zweistufigen Prozess: Im ersten Schritt wird nur die Hülle des Werkzeugs mittels SLM aus einem verschleißbeständigen Werkzeugstahl wie z. B. 1.2343 generativ gefertigt. Im zweiten Schritt wird der Kern mit einem hochwärmeleitfähigen Werkstoff wie z. B. Aluminium gießtechnisch ausgefüllt. Abschließend erfolgt die Endbearbeitung mit konventioneller Fertigungstechnik.

Primäres Ziel ist eine defektfreie Verbindung des Werkstoffverbunds Hülle/Kern, sodass eine optimale Abfuhr der Wärme gewährleistet werden kann. Dies soll durch verklammernde Elemente und werkstofftechnische Vorbehandlung der Hüllinnenseite ermöglicht werden.

Ergebnis

Erste Ergebnisse zeigen, dass in Abhängigkeit von der Geometrie der verklammernden Elemente ein vollständiges Umfließen erreicht werden kann. In einem nächsten Schritt wird die Vorbehandlung der Hüllinnenseite untersucht.

Anwendungsfelder

Anwendungen für die beschriebene Technik bieten alle Bereiche, in denen folgende Vorteile solcher Formeinsätze effektiv genutzt werden können:

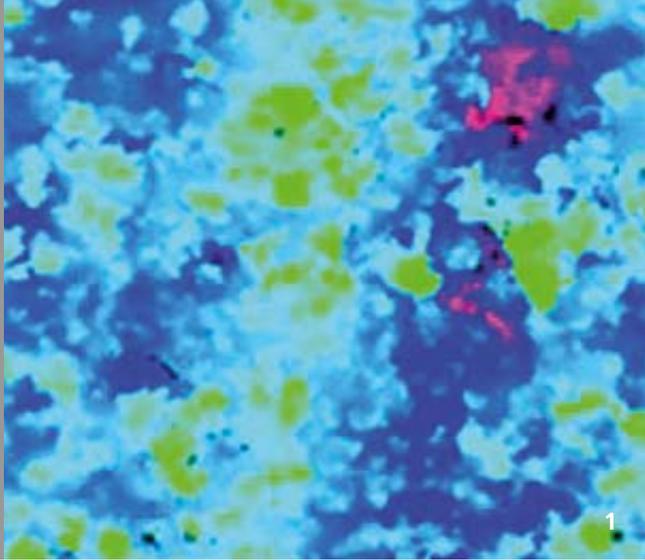
- Geringe Fertigungsdauer für generative Fertigung
- Verschleißbeständige Hülle
- Sehr homogene Temperierung des Werkzeugs durch hochwärmeleitfähigen Kern
- Geringer Konstruktionsaufwand, da kein oder nur ein einfacher Temperierkanal notwendig ist

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. David Becker
Telefon +49 241 8906-568
david.becker@ilt.fraunhofer.de

Dr. Konrad Wissenbach
Telefon +49 241 8906-147
konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de

- 3 Verschleißbeständiger Hüllkörper mit Verbindungselementen, hergestellt mit SLM.**
- 4 Ausgießen generativ gefertigter Hüllkörper.**



OBERFLÄCHENCHARAKTERISIERUNG VON SLM-BAUTEILEN MITTELS RA-SPEKTRUM

Aufgabenstellung

Die Reduzierung der Oberflächenrauheit ist eines der wichtigsten Forschungsthemen bei dem additiven Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM), da einer der wesentlichen Kosten- und Zeitfaktoren die Nachbearbeitung von Oberflächen ist. Bisher wurde die Oberflächenrauheit durch die Wahl eines kleineren Laserspots und/oder dünnerer Pulverschichten verbessert, die jedoch gleichzeitig auch zur Erhöhung der Produktionszeit führen. Um die während des SLM-Prozesses entstehende Oberflächenrauheit gezielt reduzieren zu können, ist es erforderlich, die physikalischen Prozesse, die für die Rauheitsentstehung verantwortlich sind, zu verstehen. Ein erster Schritt hierzu ist der Einsatz eines Messverfahrens, das nicht nur wie bisher Amplitudenparameter beschreibt (R_z, a), sondern auch die spektrale Verteilung der Rauheit berücksichtigt.

Vorgehensweise

Die Oberflächenrauheit von SLM-Proben soll mittels Ra-Spektren analysiert werden. Um ein Ra-Spektrum zu erhalten, das Amplitudenparameter und die spektrale Verteilung der Rauheit beschreibt, wird mithilfe eines optischen Messgeräts (Infinite Focus von Alicona) eine Flächenmessung ($1,5 \times 5 \text{ mm}^2$ aufgrund statistischer Überlegungen) durchgeführt. Die erhaltene 3-D-Topographie wird als Datenmatrix exportiert und

mit Gaußfiltern weiter bearbeitet, dann fouriertransformiert, um das Oberflächenprofil des Bauteils in seine kurz-, mittel- und langwelligen Komponenten zu separieren und nach ihrer Wellenlänge zu sortieren. Dieses Ergebnis wird in der Form von Rauheit R_a in Abhängigkeit von dem zugeordneten Wellenlängenbereich wiedergegeben.

Ergebnis

Durch die Sortierung der Oberflächenrauheit R_a nach Wellenlängen ist es möglich, die typischen Oberflächenstrukturen der SLM-Oberflächen als lokale Maxima zu identifizieren. Erste Untersuchungen zeigen, dass ein lokales Maximum auf der SLM-Oberfläche typischerweise bei Wellenlängen von 640 bis 1280 μm liegt. Diese sind signifikant größer als die typischen Prozessgrößen wie Schichtdicke, Strahldurchmesser oder Pulverkorngroße. Dies deutet auf Schwankungen des Schmelzbadvolumens während des Prozesses hin.

Anwendungsfelder

Die Oberflächencharakterisierung von SLM-Bauteilen ist ein wichtiges Analyseverfahren zur Untersuchung der Bauteilqualität in allen Anwendungsbereichen des SLM.

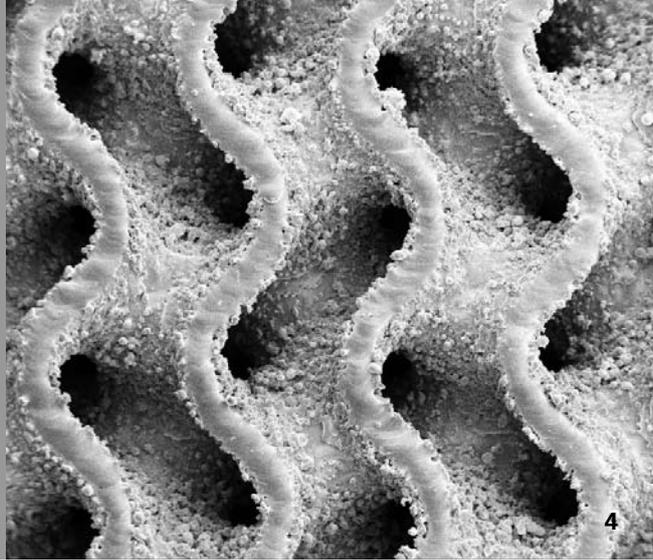
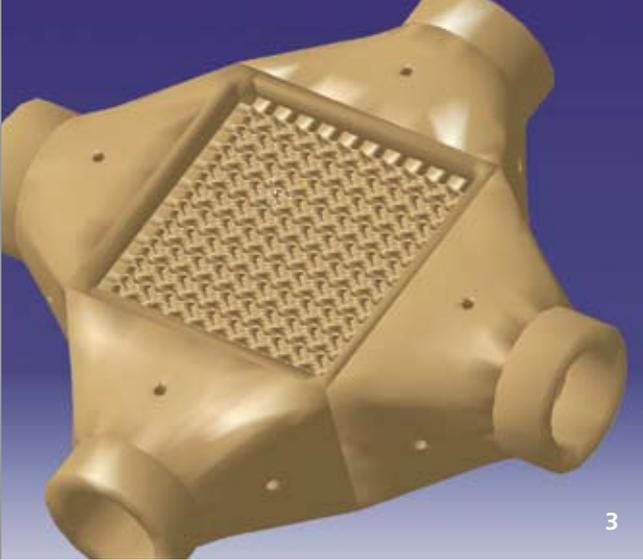
Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Andrei Diatlov
 Telefon +49 241 8906-608
 andrei.diatlov@ilt.fraunhofer.de

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

1 Falschfarbenbild einer SLM-Oberfläche.

2 Infinite-Focus-Messung, Quelle: Fa. Alicona.



GENERATIVE HERSTELLUNG MIKROTECHNISCHER BAUTEILE MIT DEM (μ -)SLM-VERFAHREN

Aufgabenstellung

Zunehmende Hightech-Anwendungen, z. B. im Bereich der Mikrotechnik, bedingen eine immer stärker werdende Miniaturisierung von Produkten bei gleichzeitig erhöhter Funktionalität, Integrationsdichte und Individualisierung. Sowohl an Produkte als auch an Produktionsprozesse werden steigende Anforderungen wie geringere Strukturgrößen, höhere Präzision, kleinere Bauteilgeometrien und neue Funktionalitäten gestellt. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojekts »MicroGen« soll erstmals das generative Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM) zur Herstellung mikrotechnischer Bauteile (μ -SLM) mit Strukturgrößen $< 100 \mu\text{m}$ entwickelt werden.

Vorgehensweise

Das Potenzial des generativen Fertigungsverfahrens SLM wurde zur Herstellung komplexer und innovativer Makrobauteile (Strukturgrößen $> 500 \mu\text{m}$) für unterschiedliche Anwendungen bereits aufgezeigt. Das erforderliche Prozessverständnis und eine angepasste Anlagentechnik, um komplexe Bauteile mit Strukturgrößen im Bereich von 10 bis $100 \mu\text{m}$ generativ aus metallischen Serienwerkstoffen herzustellen, müssen noch erarbeitet werden. Dazu soll der Einfluss der wesentlichen Verfahrensparameter wie Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Schichtdicke auf das Bearbeitungsergebnis untersucht werden. Bezüglich der Anlagentechnik werden der Pulverauftrag sowie die Strahlformung und -führung modifiziert, um die genannten Strukturgrößen herstellen zu können.

Ergebnis

Durch den Einsatz einer brillanten Laserstrahlquelle (Faserlaser) wurden an einer SLM-Anlage erste Untersuchungen durchgeführt. So konnten durch eine modifizierte Auftragvorrichtung feinstfraktionäre Pulver ($< 10 \mu\text{m}$) prozesssicher aufgetragen werden und ein Strahldurchmesser mit entsprechender Optikauslegung und -anpassung von $30 \mu\text{m}$ realisiert werden. Anhand der erarbeiteten Grundlagen konnten erste Bauteile (Strukturgrößen $\leq 100 \mu\text{m}$) mit Schichtdicken von $10 \mu\text{m}$ aufgebaut werden.

Anwendungsfelder

Die Erweiterung des Verfahrens in den Bereich $\leq 100 \mu\text{m}$ bedeutet eine Vergrößerung des Anwendungspotenzials und des Produktportfolios. Durch dieses mikrogenerative Fertigungsverfahren können in verschiedenen Branchen, z. B. Medizintechnik, Elektrotechnik und Elektronik, optischen Technologien und der Solartechnik neue Anwendungsfelder erschlossen werden.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Rui João Santos Batista
Telefon +49 241 8906-203
rui.santos.batista@ilt.fraunhofer.de

Dr. Konrad Wissenbach
Telefon +49 241 8906-147
konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de

- 3 Anwendungsbeispiel Mikrowärmetauscher,
Quelle: Lehrstuhl CVT der RWTH Aachen.
4 Mit μ -SLM gefertigter Demonstrator-
Wärmetauscher (REM).



WERKZEUGMASCHINE ZUM LASERPOLIEREN

Aufgabenstellung

Stand der Technik für das Polieren im Werkzeug- und Formenbau ist die manuelle Politur. Sowohl aus zeitlichen als auch aus finanziellen Gründen besteht in dieser Branche ein großer Bedarf an automatisierten Polierverfahren für komplex geformte 3-D-Oberflächen. Zusammen mit mehreren Partnern aus der Industrie entwickelt das Fraunhofer ILT im Rahmen des vom BMBF geförderten Vorhabens »Alpine« eine Werkzeugmaschine für das Laserpolieren metallischer Bauteile, die den Anforderungen einer industriellen Fertigung genügt.

Vorgehensweise

Basis der Entwicklung sind umfangreiche Erfahrungen aus der Verfahrensentwicklung und der Erprobung von Labormaschinen. Diese Erfahrungen werden in eine robuste Maschinenteknik umgesetzt, die für eine industrielle Fertigung geeignet ist. Die Basis der Maschine bildet ein 5-Achsen-Portalsystem, das die Werkstücke positioniert und langsame Vorschubbewegungen ausführt. Kombiniert wird dieses Achssystem mit einem dynamischen 3-Achsen-Laserscanner, der die erforderlichen Prozessgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s ermöglicht.

Aufgrund der Maschinenkinematik mit 5 + 3 Achsen werden allerdings besondere Anforderungen an die CAM-NC-Datenkette gestellt. Hierzu entwickelt das Fraunhofer ILT Lösungen, bei denen der Anwender sein vom Fräsen bekanntes CAM-System auch für die Bahnplanung beim Laserpolieren verwenden kann.

Ergebnis

Die Werkzeugmaschine für das Laserpolieren ist für Bauteile mit einem Durchmesser von bis zu 450 mm und einem Gewicht von bis zu 100 kg geeignet. Eine ergonomisch zur Seite öffnende Prozesskammer erlaubt das einfache Bestücken der Maschine, manuell oder mittels Kranbeladung. Ein Taster erfasst die Lage der Werkstücke für den Nullpunktgleich zwischen CAM-Planung und Maschine.

Anwendungsfelder

Maschine und CAM-NC-Datenkette stehen Kunden für bauteil- und anwendungsspezifische Erprobungen zur Verfügung. Anwendungsfelder sind vor allem der Werkzeug- und Formenbau, wobei der Schwerpunkt auf Anwendungen liegt, bei denen mittlere Oberflächenqualitäten gefordert werden. Dies sind z. B. Formen für die Glasformung oder Präge- und Schmiedewerkzeuge.

Ansprechpartner

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

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



SELEKTIVES LASERPOLIEREN

Aufgabenstellung

Für Kunststoffteile, z. B. bei Armaturentafeln im PKW, werden häufig strukturierte oder genarbte Oberflächen gewünscht. Zur Herstellung solcher Kunststoffteile werden daher die Werkzeuge entsprechend strukturiert. Hierzu kommt im Wesentlichen das photochemische Ätzen zum Einsatz. Weit verbreitet sind naturnahe, z. B. Lederstrukturen, oder auch technische Strukturen. Die Anforderungen an die Strukturen liegen u. a. in der Optik und Haptik. Mit dem neuen Fertigungsverfahren selektives Laserpolieren wird eine Politur z. B. nur der Täler der Struktur ermöglicht, um so optisch variable Effekte zu erzielen. Auf dem abgeformten Bauteil sind dann z. B. nur die Erhebungen poliert. Somit können bisher nicht oder nur mit großem Aufwand zu fertigende Oberflächen hergestellt werden.

Vorgehensweise

Die selektive Laserpolitur wird im BMBF-Vorhaben »EFFILAS« anhand von Werkzeugeinsätzen mit unterschiedlichen Geometrien (z. B. Kugeln und Zylinder) und genarbten Oberflächen aus dem Werkzeugstahl 1.2343 untersucht. Dazu wird zuerst die komplette Oberfläche mittels eines optischen Sensorsystems mit einer Auflösung von 1040 dpi digitalisiert. Um eine selektive Laserpolitur z. B. nur der Täler der Ledernarbungsstruktur durchzuführen, muss die Ledernarbungsstruktur von der zugrunde liegenden Geometrie des Werkzeugs separiert werden. Dies erfolgt mittels einer angepassten Profilfilterung der digitalisierten Oberfläche auf Basis einer Fourier-Analyse. Bei der Bearbeitung wird die Oberfläche mäanderförmig

abgerastert und der Laserstrahlfokus gemäß der Werkzeuggeometrie nachgeführt. Zusätzlich wird die Laserleistung entlang der Bearbeitungsbahnen in Abhängigkeit von den vorhandenen Strukturen (nur die Täler werden laserpoliert) angepasst.

Ergebnisse und Anwendungsfelder

Durch die lokale Anpassung der Laserleistung werden die Rauheit und somit der Glanzgrad in den Tälern der Struktur verringert, womit ein Zweiglanzeffekt erzeugt wird. Abhängig von der gewählten Laserleistung variiert dabei der einstellbare Glanzgrad vom Ausgangszustand bis hin zu sehr hohem Glanz. Bisher wurden Werkzeugeinsätze mit Freiformflächen und geätzter Ledernarbung erfolgreich selektiv laserpoliert. Zusätzlich wurden von diesen Werkzeugeinsätzen Kunststoffteile mit einem Zweiglanzeffekt abgeformt. Die Bearbeitungszeit beträgt zurzeit ca. 30 bis 60 s/cm² bei einer Auflösung von 1040 dpi. Die kleinste auflösbare Struktur beträgt derzeit 150 µm x 150 µm und ist bestimmt durch die Größe des verwendeten Laserstrahldurchmessers. Ein wesentliches Ziel weiterer Forschungsarbeiten ist die Übertragung der Ergebnisse auf reale Werkzeuge, z. B. Armaturenträger für PKWs, und die Erprobung des Verfahrens im industriellen Umfeld.

Ansprechpartner

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

Dr. Konrad Wissenbach
 Telefon +49 241 8906-147
 konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de

- 2 *Selektiv laserpolierte Freiformfläche aus dem Werkzeugstahl 1.2343.*
 3 *In Kunststoff abgeformte Freiformfläche aus Bild 2 mit Zweiglanzeffekt.*



LASERPOLIEREN VON PRÄGEWERKZEUGEN

Aufgabenstellung

Das manuelle Polieren von Prägewerkzeugen ist zeitaufwendig und kostenintensiv. Mit abrasiven Poliermitteln werden manuell geführte Werkzeuge zeitaufwendig über die zu polierenden Flächen geführt. Aufgrund der Zugänglichkeit sind Ecken und filigrane Geometrien besonders schwer zu polieren. Aus diesem Grund wird am Fraunhofer ILT zusammen mit der Firma Robert Bosch GmbH das Laserpolieren von Prägewerkzeugen für die Klauenpolherstellung erprobt.

Vorgehensweise

Mittels Laserstrahlung wird eine dünne Randschicht des Prägewerkzeugs umgeschmolzen. Beim Umschmelzen wird die Oberfläche durch die Oberflächenspannung geglättet. Zur Erzeugung von Werkzeugbahnen für die 3-D-Oberflächen der Prägewerkzeuge wird eine am ILT entwickelte CAM-NC-Datenkette verwendet. Hierdurch ist es möglich, konturangepasste Werkzeugbahnen zu erzeugen, sodass komplexe Geometrien und auch filigrane Ecken, die mit konventionellen Polierverfahren nur schwierig zu polieren sind, bearbeitet werden können. Im Rahmen des Projekts werden laserpolierte Prägewerkzeuge in der Produktion von Klauenpolen eingesetzt und insbesondere mit den Standzeiten manuell polierter Prägewerkzeuge verglichen.

Ergebnis

Im Rahmen der Untersuchungen konnte die Bearbeitungszeit von ca. einer Stunde pro Prägewerkzeug für die manuelle Politur auf ca. 14 Minuten für die Laserpolitur reduziert werden. Die erreichte Rauheit beträgt $Ra \approx 0,2 \mu\text{m}$. Erste Tests von laserpolierten Prägewerkzeugen im Fertigungseinsatz zeigen vielversprechende Ergebnisse. Umfangreichere Tests sollen nun zeigen, ob und wie sich die Laserpolitur auf die Standzeit der Prägewerkzeuge auswirkt.

Anwendungsfelder

Neben den hier untersuchten Prägewerkzeugen kann das Laserpolieren bei vielen Werkzeugen die manuelle Politur ersetzen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei jedoch nicht auf einer Reduzierung der Rauheit gegenüber der manuellen Politur. Ziel ist vielmehr, die Politur für mittlere Qualitätsanforderungen zu automatisieren und deutliche Kostenvorteile zu erreichen.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Jonas Huther
Telefon +49 241 8906-8054
jonas.huther@ilt.fraunhofer.de

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

1 Laserpoliertes Prägewerkzeug
und damit hergestellter Klauenpol.



POLIEREN VON TITAN- UND NICKELBASISLEGIERUNGEN MIT CW-LASERSTRAHLUNG

Aufgabenstellung

In Flugtriebwerken werden vor allem Titan- und Nickelbasislegierungen verwendet. Die Ti-Legierung Ti6Al4V zeichnet sich vor allem durch eine hohe Festigkeit bis zu einer maximalen Einsatztemperatur von 400 °C und eine geringe Dichte aus. Eine hohe Warmfestigkeit bis zu einer maximalen Einsatztemperatur von 700 °C qualifiziert die Ni-Legierung Inconel 718 als Werkstoff für Triebwerkteile im Heißgasbereich.

Die Bauteile aus diesen Legierungen müssen nach der spanenden Formgebung teilweise poliert werden, z. B. zur Reduzierung von Strömungswiderständen. Die manuelle Politur dieser Werkstoffe ist aufgrund der hohen Festigkeit zeit- und somit auch kostenintensiv. Durch das Laserpolieren wird eine Reduzierung des Polieraufwands angestrebt. Bisher wurde das Laserpolieren jedoch nur für feingefräste Oberflächen mit gepulster Laserstrahlung untersucht. Das Polieren mit cw-Laserstrahlung für Titan- und Nickelbasislegierungen wird in dem von der VW-Stiftung geförderten Vorhaben »HYBMAN« untersucht.

Vorgehensweise

Das Laserpolieren beruht auf dem Umschmelzen einer dünnen Randschicht und Glättung der Oberfläche infolge der Grenzflächenspannung. Im Vergleich zu konventionellen Schleif- und Polierverfahren wird kein Material abgetragen,

sondern ausschließlich umgeschmolzen. Durch dieses grundlegend andere Wirkprinzip des Laserpolierens in Verbindung mit der Automatisierbarkeit des Verfahrens wird eine Aufwandsreduzierung gegenüber der zeit- und kostenintensiven konventionellen Oberflächenbearbeitung der Titan- und Nickellegierungen angestrebt.

Ergebnis

Bei einer Bearbeitungszeit $t = 7 \text{ s/cm}^2$ kann auf gedrehten Flachproben der Titanlegierung Ti6Al4V die Oberflächenrauheit von $R_a = 1,0 \text{ }\mu\text{m}$ auf $R_a = 0,16 \text{ }\mu\text{m}$ reduziert werden. Bei der Nickellegierung Inconel 718 kann die Oberflächenrauheit in einer Bearbeitungszeit von $t = 53 \text{ s/cm}^2$ von $R_a = 0,36 \text{ }\mu\text{m}$ auf $R_a = 0,12 \text{ }\mu\text{m}$ verkleinert werden. Diese aus ersten Parameterstudien gewonnenen Ergebnisse zeigen Anwendungspotenzial und bilden somit die Grundlage für weitergehende Prozessoptimierungen hinsichtlich einer Reduzierung der Rauheit und der Bearbeitungszeit.

Anwendungsfelder

Neben der Verwendung in Triebwerken für die Luft- und Raumfahrt ist eine Erzeugung optischer Effekte oder biokompatibler Oberflächen aus Ti6Al4V für medizinische Anwendungen denkbar.

Ansprechpartner

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

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



LASERMIKROPOLIEREN VON ALUMINIUMWERKSTOFFEN

Aufgabenstellung

Die Funktionsflächen von Bauteilen aus Aluminiumwerkstoffen müssen häufig poliert werden. Dreidimensionale Freiformflächen werden zurzeit nahezu ausschließlich manuell poliert, da hierzu, abgesehen von einigen Spezialanwendungen, keine automatisierten Fertigungsverfahren zur Verfügung stehen. Am Fraunhofer ILT wird bereits seit einigen Jahren das Polieren von Stahl- und Titanwerkstoffen mittels gepulster Laserstrahlung entwickelt. Mit dem Verfahren kann vor allem die Mikrorauheit von Oberflächen geglättet und der Glanzgrad erhöht werden. Die Vorteile sind neben der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit vor allem die Automatisierbarkeit und die hohe Geometrietreue. Das Werkstoffspektrum dieses Verfahrens soll nun auf Aluminiumwerkstoffe erweitert werden.

Vorgehensweise

Neben einer Anpassung der Verfahrensparameter erfolgt die Lasermikropolitur von Aluminiumwerkstoffen unter Verwendung einer geeigneten Prozessgasatmosphäre und eines Scheibenlasers TruMicro7050 mit Pulslängen im Bereich $t_p = 1 - 2 \mu\text{s}$. Beispielhaft werden die Untersuchungen an Flachproben aus EN AW-6082 (AlMgSi1Mn) und EN AW-7022 (AlZn5Mg3Cu) durchgeführt. Typische Anwendungsfelder dieser Werkstoffe sind Zier- und Designleisten (EN AW-6082) sowie Blasformen für die Kunststoffverarbeitung (EN AW-7022).

Ergebnis

Durch die Mikropolitur mit gepulster Laserstrahlung konnte die Oberflächenrauheit beim Werkstoff EN AW-7022 von $R_a = 0,20 \mu\text{m}$ auf $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ reduziert werden. Bei EN AW-6082 wurde eine Reduzierung der Rauheit von $R_a = 0,13 \mu\text{m}$ auf $R_a = 0,07 \mu\text{m}$ erreicht. Bei beiden Werkstoffen beträgt die Bearbeitungsgeschwindigkeit ca. $6,5 \text{ s/cm}^2$.

Anwendungsfelder

Neben den Anwendungen Zier- und Designleisten sowie Blasformen können die Ergebnisse überall dort angewendet werden, wo ein Oberflächenfinish von Aluminiumwerkstoffen mittels Politur notwendig ist. Dies betrifft zum Beispiel Komponenten im Motorenbau, im Leichtbau oder in der Luft- und Raumfahrttechnik.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Christian Nüsser
Telefon +49 241 8906-669
christian.nuesser@ilt.fraunhofer.de

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



ABTRAGEN UND POLIEREN VON GLAS MIT LASERSTRAHLUNG ZUR HERSTELLUNG VON OPTISCHEN KOMPONENTEN

Aufgabenstellung

Die zunehmenden Anforderungen an optische Elemente hinsichtlich Abbildungsqualität sowie Gewichtseinsparung bei gleichzeitig kleinerem Volumen können durch den vermehrten Einsatz von asphärischen oder frei geformten Optiken erfüllt werden. Die konventionelle Fertigung von optischen Elementen, deren Oberfläche von einer sphärischen Form abweicht, ist jedoch zeit- und kostenaufwendig und lässt dadurch keine wirtschaftliche individuelle Fertigung in kleiner Stückzahl zu. Aus diesem Grund wird am Fraunhofer ILT in dem vom BMBF geförderten Vorhaben »FoPoLas« ein laserbasiertes Fertigungsverfahren zur Herstellung von Optiken entwickelt, welches nahezu beliebige Oberflächengeometrien in kurzer Zeit erzeugen kann.

Vorgehensweise

Im Rahmen einer zum Patent angemeldeten Prozesskette wird die laserbasierte Optikfertigung auf drei Prozessschritte aufgeteilt. Ausgehend von einem Glasrohling wird Material durch kontinuierliche CO₂-Laserstrahlung abgetragen und die Grobform erzeugt. Ein ebenfalls mit CO₂-Laserstrahlung durchgeführter Polierschritt glättet anschließend die Oberfläche ohne weiteren Materialabtrag und ohne Veränderung der Oberflächenform. Ein Feinstabtrag als weiterer Prozessschritt reduziert verbleibende Formabweichungen und gleicht die Ist- der Sollkontur an.

Ergebnis

Durch geeignete Scanstrategien lassen sich nahezu beliebige Strukturen mit einer Abtragrate von über 20 mm³/s und einer resultierenden Rauheit von Ra < 5 µm herstellen. Der Polierprozess erreicht ausgehend von geschliffenen Proben eine bereits für Beleuchtungsoptiken ausreichende Rauheit von Rq = 3 nm und Wq = 8 nm (gemessen nach ISO 10110 auf Messfeldern von 1 x 1 mm² bzw. 16 x 16 mm²). Diese Werte können ebenfalls bereits auf Sphären, Asphären und Freiformoberflächen erzielt werden. Der Feinstabtrag ermöglicht eine Abtragtiefe von 2 nm pro Überfahrt, welche mit einer Ortsauflösung von < 250 µm variiert werden kann. Darüber hinaus zeigen erste Kombinationen der einzelnen Prozessschritte bereits vielversprechende Ergebnisse.

Anwendungsfelder

Über das Anwendungsfeld der Herstellung von sphärischen und besonders nichtsphärischen optischen Komponenten hinaus können die Prozessschritte auch einzeln verwendet und gegebenenfalls mit der konventionellen Fertigung kombiniert werden. Beispielsweise lässt sich der Polierprozess auch zur Innenpolitur von Bohrungen ab einem Durchmesser von einigen Millimetern einsetzen.

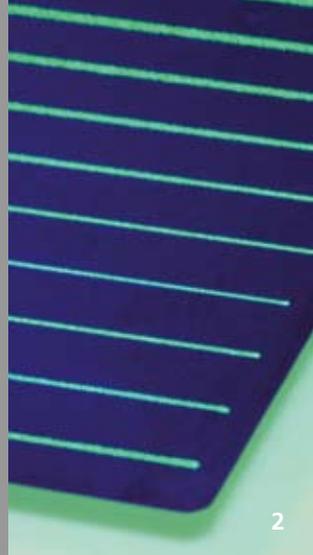
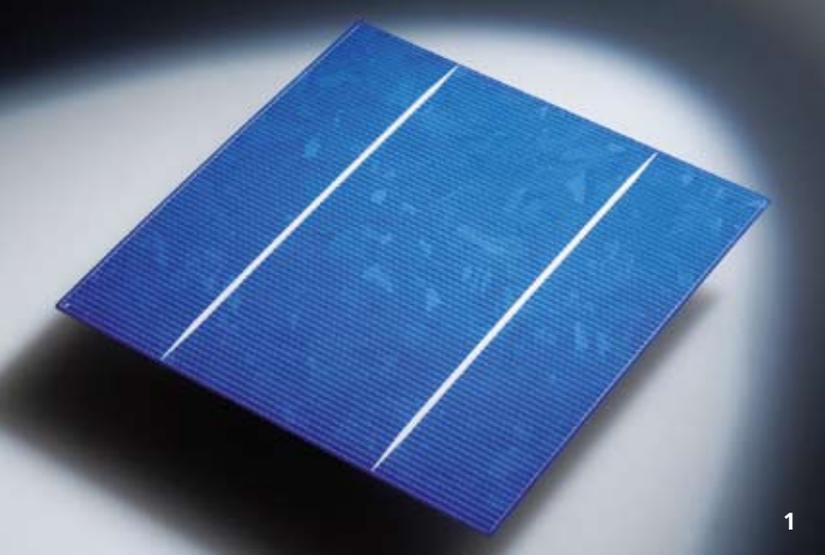
Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Sebastian Heidrich
Telefon +49 241 8906-645
sebastian.heidrich@ilt.fraunhofer.de

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

2 Stadien der Prozesskette.

3 Laserpolierte Linse und Ausgangszustand.



LASERABLATION VON PASSIVIERUNGSSCHICHTEN AUF KRISTALLINEN SOLARZELLEN

Aufgabenstellung

Bei der Herstellung kristalliner Silizium-Solarzellen werden die elektrischen Kontakte auf der Frontseite der Zelle mittels Siebdruckverfahren von Silberleitpasten und anschließendem Einbrennen aufgebracht. Das lokale Öffnen der Passivierungsschicht durch Laserstrahlung verspricht die Umsetzung neuer Zellkonzepte im Massenproduktionsmaßstab. Im Besonderen ermöglicht das Entfernen der Siliziumnitrid-Passivierungsschicht auf der Zellvorderseite die Anwendung fortgeschrittener Metallisierungsmethoden, wie z. B. Galvanotechnik oder Inkjet-Druck. Zudem kann die Breite der Kontaktfinger deutlich unter 100 μm reduziert werden.

Vorgehensweise

Beim Abtragen der Passivierungsschicht ist darauf zu achten, dass der Emitter der Solarzelle nicht beschädigt wird, da dies die Effizienz der Solarzelle reduziert. Zur Vermeidung thermischer Schädigungen, wie sie bei Nanosekundenlasern auftreten, wurde der Einfluss verschiedener Laserparameter (Wellenlänge, Pulsdauer von 200 fs bis 10 ps, Fluenz und Pulsüberlapp) auf die elektrischen Zelleigenschaften untersucht. Wegen der einfachen Charakterisierung wurde die Studie auf vollständigen Solarzellen durchgeführt, indem ein Teil der Oberfläche zwischen den Metallkontakten ablatiert wurde.

Ergebnis

Bei Verwendung von 532 nm Wellenlänge und bei Pulslängen im ps- und ns-Bereich wird ein starker Anstieg der Degradierung der elektrischen Eigenschaften beobachtet. Nur mit Pulsen im fs-Bereich lassen sich hinreichende Ergebnisse erzielen. Eine Verwendung von 355 nm Wellenlänge verringert die Degradierung so weit, dass kein Abfall der elektrischen Eigenschaften sichtbar ist. In jedem Fall ist eine Bearbeitung sehr nah an der Abtragschwelle vorteilhaft, da hohe Fluenzen stärkeren laserinduzierten Schaden bedeuten. Es wurde beobachtet, dass ein hoher Pulsüberlapp (> 85 Prozent) die Abtragsqualität verbessert, da so direkt an der Abtragschwelle ausreichende Linienbreiten erzielt werden.

Anwendungsfelder

In der hier dargestellten Untersuchung der Laserablation wurde berücksichtigt, dass der Prozess in der Massenproduktion von kristallinen Silizium-Solarzellen eingesetzt werden soll. Ein ähnlicher Laserprozess wird sowohl bei der Kontaktbildung auf der Zellrückseite (PERC-Konzept) als auch bei der Produktion von Dünnschicht-Solarzellen und OLEDs angewendet.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Daniel Trusheim
Telefon +49 241 8906-600
daniel.trusheim@ilt.fraunhofer.de

Dr. Jens Holtkamp
Telefon +49 241 8906-273
jens.holtkamp@ilt.fraunhofer.de

1 Standard kristalline Silizium-Solarzelle.

2 Ablationsprozess mit einer Wellenlänge von 532 nm.

3 Ergebnis der Laserablation.



ULTRAHYDROPHOBE UND ULTRAHYDROPHILE METALLOBERFLÄCHEN

Aufgabenstellung

Die Herstellung ultrahydrophober oder ultrahydrophiler Oberflächen verlangt nach einer Möglichkeit, diese schnell und effektiv aufzurauen. Neben chemischen, anodisierenden Verfahren oder Plasmaätzverfahren bietet eine laserbasierte Aufrauung eine hohe Formfreiheit und Ortsselektivität.

Vorgehensweise

Der Laserabtrag mit Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern erlaubt neben der Erzeugung von Mikrostrukturen und Mikroformen mit hohen Abtragsqualitäten und -genauigkeiten auch die Möglichkeit der Herstellung von besonders rauen Oberflächen. Mittels einer einfachen Laserstrukturierung kann somit, insbesondere bei Metallen, die Oberfläche von Werkstücken schnell um ein Vielfaches vergrößert werden.

Die so entstehende Oberflächentopographie weist ein verändertes Benetzungsverhalten mit Wasser im Vergleich zu einer polierten Oberfläche auf. Die Oberflächenenergie der Oberfläche bestimmt dabei die Richtung der Benetzungsänderung (hydrophiler/hydrophober), die Topographie der Oberfläche den Grad der Änderung. Mittels einer am Fraunhofer IFAM vorgenommenen Beschichtung kann die Oberflächenenergie des Materials entscheidend beeinflusst werden. Basierend auf einem Niederdruckplasmaverfahren können dabei verschiedene Polymere mit Schichtdicken im Nanometerbereich auch auf Freiformflächen abgeschieden werden.

Ergebnis

Durch die Kombination aus Laserstrukturierung von Metalloberflächen und anschließender Beschichtung können, je nach Art der Beschichtung, ultrahydrophobe und ultrahydrophile Oberflächen hergestellt werden. Die Laserstrukturierung erzeugt dabei Oberflächen, die mindestens um einen Faktor 12 größer sind als die Grundfläche des Substrats. Die Vorteile einer Beschichtung liegen hier, neben der genauen Einstellung der Oberflächenenergie, vor allem in der Langzeitbeständigkeit des Effekts.

Anwendungsfelder

Anwendungen liegen zum Beispiel in der Medizintechnik (hydrophobe Kanülen) oder in der ortsselektiven Modifikation der Benetzungseigenschaften von Freiformbauteilen.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Stephan Eifel
Telefon +49 241 8906-311
stephan.eifel@ilt.fraunhofer.de

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

- 4 REM-Bild der Stahloberfläche nach Aufrauung durch einen UKP-Laser. Zwei Strukturgrößenregime (Cone-like Protrusions und Nanoripples) sind erkennbar.
- 5 Ultrahydrophobe Stahloberfläche nach Laseraufrauung und Beschichtung mit hydrophobem Polymer.



STRUKTURIERUNG DURCH LASERUMSCHMELZEN

Aufgabenstellung

In vielen Bereichen sind Bauteile mit strukturierten Oberflächen heutzutage nicht mehr wegzudenken. Zur Strukturierung dieser Oberflächen werden oft Spritzgießwerkzeuge aus Metall verwendet. Ein übliches Verfahren zur Erzeugung der gewünschten Struktur auf dem Werkzeug ist das photochemische Ätzen. Dieses Verfahren ist jedoch zeit- und kostenintensiv, da ein Großteil des Verfahrens noch auf Handarbeit basiert. Ein zweites etabliertes Verfahren ist das Abtragen mit Laserstrahlung zur Strukturierung metallischer Oberflächen. Beide Verfahren erzeugen raue Oberflächen. In hygiene relevanten Bereichen können diese Verfahren nicht eingesetzt werden, da die so bearbeiteten Bauteile nur unzureichend gereinigt werden können. Defizite liegen weiterhin häufig in den geringen Flächenraten.

Verfahrensprinzip

Im Rahmen des von der VW-Stiftung geförderten Vorhabens »FluidStruc« wird ein neuartiges Verfahren zum Strukturieren metallischer Oberflächen durch Umschmelzen einer dünnen (~ 100 µm) Randschicht mit kontinuierlicher Laserstrahlung entwickelt. Dabei wird ein Laserstrahl über das Werkstück geführt und schmilzt durch den Wärmeeintrag die Metalloberfläche lokal auf. Gleichzeitig wird die Laserleistung mit Frequenzen zwischen 10 Hz bis 100 Hz moduliert, sodass

1 In Kunststoff abgeformtes Bauteil mit unterschiedlichen, fingerabdruckgroßen Strukturen.

2 Werkzeugeinsatz aus 1.2343 mit verschiedenen, neuartigen, fingerabdruckgroßen Strukturen.

die Schmelzbadgröße kontinuierlich verändert wird. Durch die Modulation der Schmelzbadgröße wird das Material umverteilt, es entstehen Berge und Täler: Die eine Hälfte der entstandenen Struktur liegt oberhalb ihres Ausgangsniveaus, die andere Hälfte liegt darunter. Die Randschicht erstarrt direkt aus der Schmelze, sodass neben der Strukturierung eine gleichmäßig kleine Rauheit erzielt wird. Die strukturierte Oberfläche wird somit gleichzeitig poliert. Zur Erweiterung des Spektrums der zu erzeugenden Oberflächenstrukturen werden komplexe ortsabhängige Laserleistungssignale untersucht.

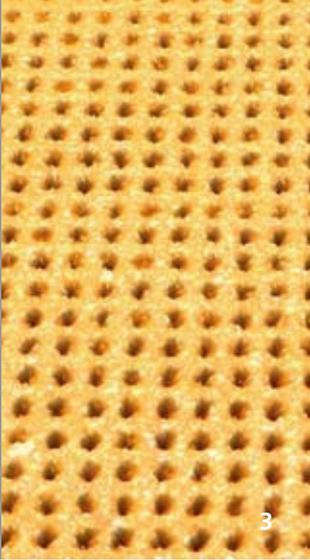
Ergebnis und Anwendungsfelder

Zur Demonstration des Verfahrens werden zahlreiche neuartige Strukturen mit angepasster Laserleistungsmodulation auf Werkzeugeinsätzen aus 1.2343 erzeugt (Bild 2). Die Oberflächen weisen eine kleine Mikrorauheit auf und werden in sehr guter Übereinstimmung mit dem strukturierten Werkzeugeinsatz in Kunststoff abgeformt (Bild 1). Die Höhe der Strukturen beträgt nach acht aufeinanderfolgenden Bearbeitungsschritten ca. 60 µm bei einer Strukturwellenlänge von einem Millimeter. Die Bearbeitungszeit beträgt für diese Strukturen derzeit ca. 2 min/cm². Anwendungsfelder für derartige Strukturen liegen u. a. im Hygienebereich, wo eine ansprechende Optik und Haptik der strukturierten Oberfläche wichtig sind. Zudem muss sie gut zu reinigen sein. Außerdem können diese Strukturen in allen Bereichen Anwendung finden, in denen neuartige optische und haptische Designelemente verwendet werden sollen. Insbesondere die gute Abformbarkeit der Strukturen in Kunststoff eröffnet ein breites Anwendungsspektrum.

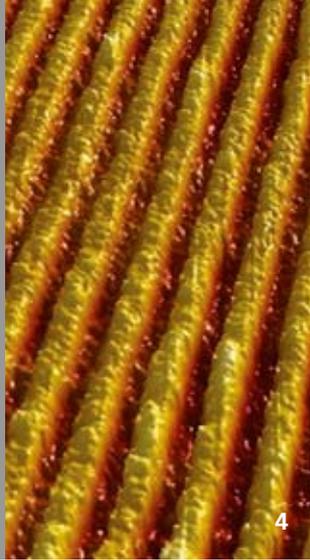
Ansprechpartner

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

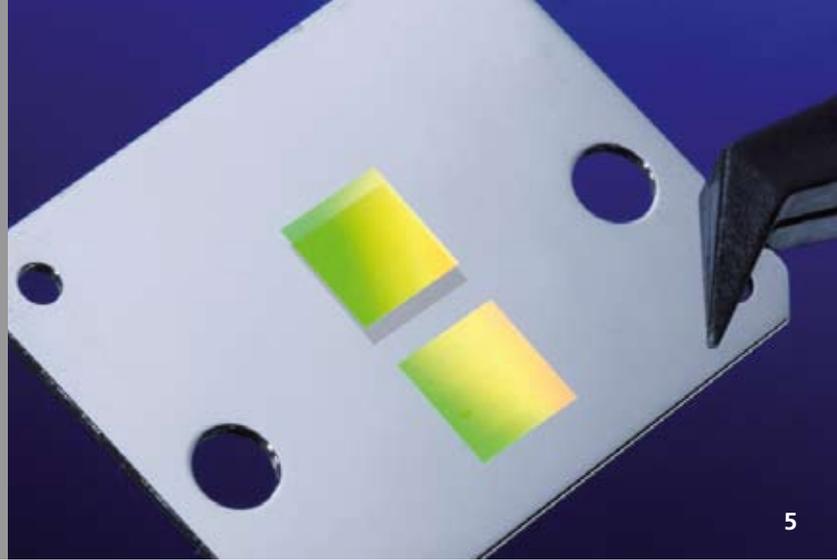
Dr. Konrad Wissenbach
 Telefon 0241 8906-147
 konrad.wissenbach@ilt.fraunhofer.de



3



4



5

VIERSTRAHL-INTERFERENZ-STRUKTURIERUNG VON METALLEN

Aufgabenstellung

Die Nanotechnologie ist eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts, die durch die besonderen Eigenschaften nanoskaliger Strukturen eine Vielzahl neuer Produkte prägt. Mit Methoden der modernen Lasertechnologie lassen sich diese Funktionalitäten wirtschaftlich für unterschiedliche Branchen nutzen, um damit funktionale Oberflächenstrukturen zu generieren, um beispielsweise Benetzung, Adhäsion oder Lichtleitung zu beeinflussen.

Vorgehensweise

Zur Erzeugung nanoskaliger Strukturen mit lasertechnischen Verfahren wurde eine Vierstrahlinterferenz-Anlage realisiert, bei der mit einer 1-D- bzw. 2-D-Phasenmaske der Laserstrahl in zwei bzw. vier kohärente Teilstrahlen aufgeteilt und mit einer Schwarzschildoptik unter einem vorgegebenen Winkel überlagert wird. Das so entstehende Interferenzmuster wird verwendet, um unterhalb der Beugungsgrenze Strukturen im Material zu generieren. Die Schwarzschildoptik besteht aus einem kleinen primären konvexen Spiegel und einem größeren sekundären konkaven Spiegel. Dieses Objektiv ist frei von chromatischer und sphärischer Aberration und selbst Koma und Astigmatismus können korrigiert werden. Aufgrund dieser Eigenschaften ist es möglich, Laserquellen, die nur eine kurze Kohärenzlänge besitzen, zur Interferenz-Strukturierung zu verwenden. Als Laserquelle wurde ein frequenzverdreifachter Nd:YAG-Laser mit einer Pulslänge von 10 Pikosekunden eingesetzt.

Ergebnis

Mit dem System wurden Löcher mit einem Durchmesser von ca. 350 nm in einer quadratischen Anordnung generiert. Die Tiefe der Löcher beträgt ca. 300 nm. Über die Pulsenergie des Lasers und über die Pulsanzahl ist die Tiefe dabei regelbar. Die Periode der Struktur wird von der verwendeten Wellenlänge und von der numerischen Apertur des eingesetzten Schwarzschildobjektivs vorgegeben und beträgt hier ca. 700 nm. Mit entsprechender Strahlaufweitung und ausreichender Pulsenergie des Lasers können so mehr als 100 000 Löcher mit einem Laserpuls erzeugt werden. Diese Strukturen wurden in verschiedenen Metallen wie Stahl, Messing, Kupfer oder Aluminium bereits realisiert.

Anwendungsfelder

Nanostrukturen finden immer mehr Anwendung im Bereich der Photovoltaik zur Oberflächenvergrößerung. In der Bio- und Medizintechnik dienen sie als ortsselektive, funktionelle Oberflächen. Auch zur Reibungsminimierung oder als Sicherheitskennzeichnung bzw. Plagiatenschutz, ähnlich dem Barcode, können sie eingesetzt werden. Derart strukturierte Stahl- oder Kupferbauteile dienen als Master in der Spritzguss- oder Prägetechnik.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Stefan Beckemper
Telefon +49 241 8906-325
stefan.beckemper@ilt.fraunhofer.de

Dr. Jens Holtkamp
Telefon +49 241 8906-273
jens.holtkamp@ilt.fraunhofer.de

- 3 AFM-Scan einer Lochstruktur in Stahl.
- 4 AFM-Scan einer Linienstruktur in Messing.
- 5 Großflächige Nanostruktur in Stahl.



HOCHAUFGELÖSTE LASER-STRUKTURIERUNG TRANSPARENTER LEITER FÜR DIE ORGANISCHE ELEKTRONIK

Aufgabenstellung

Auf Kunststoff basierende Elektronik steht kurz vor der Markteinführung. Schon heute findet man eine Vielzahl an Produkten, in die beispielsweise OLEDs integriert sind. Ein großer Vorteil der organischen Elektronik, neben der Flexibilität und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten, ist die potenziell sehr preisgünstige Produktion mittels Drucktechniken im Rolle-zu-Rolle-Verfahren. Allerdings können mit diesen Verfahren nur Strukturgrößen von mindestens $10\ \mu\text{m}$ erzeugt werden, was für schnelle hochintegrierte Elektronik nicht ausreichend ist. Um kleinere Strukturen zu erzeugen, werden sehr langsame Verfahren wie Lithographie oder Micro Contact Printing verwendet, die nicht mit einem schnellen Rolle-zu-Rolle-Prozess kompatibel sind. Für die Markteinführung vieler weiterer Produkte wird daher ein schnelles und hochauflösendes Strukturierungsverfahren benötigt.

Vorgehensweise

Eine Möglichkeit, großflächig und schnell hochauflöste Strukturen zu erzeugen, ist die Laserablation mit Excimerlaserstrahlung. Da die Schichtdicken in der organischen Elektronik typischerweise wenige $100\ \text{nm}$ betragen, lässt sich mittels

Maskenprojektion eine große Fläche mit einem oder wenigen Pulsen strukturieren. Trotz der relativ geringen Repetitionsrate von Excimerlasern kann so ein hoher Durchsatz erreicht werden.

Ergebnis

Besonders die Wellenlängen im tiefen UV um $200\ \text{nm}$ eignen sich zum Abtragen organischer Elektronik aufgrund der sehr hohen Absorption in diesen Materialien. In dem organischen transparenten elektrischen Leiter Poly (3,4-ethylen dioxothiophen) Polystyren sulfonat (PEDOT/PSS) lassen sich auf diese Weise Strukturgrößen von etwa $1,5\ \mu\text{m}$ erreichen. Eine etwas geringere Auflösung von etwa $5\ \mu\text{m}$ kann durch Excimerlaserabtrag in dem anorganischen transparenten Leiter Indium Zinn Oxid (ITO) erreicht werden. In beiden Fällen ist ein Puls ausreichend, um die komplette Schicht abzutragen.

Anwendungsfelder

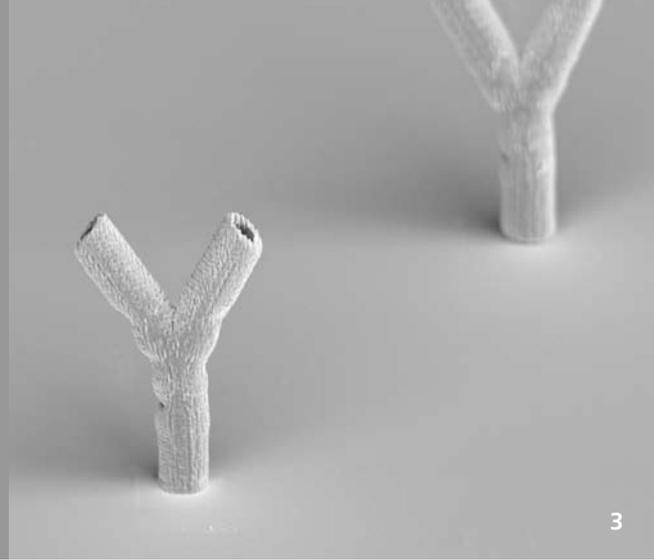
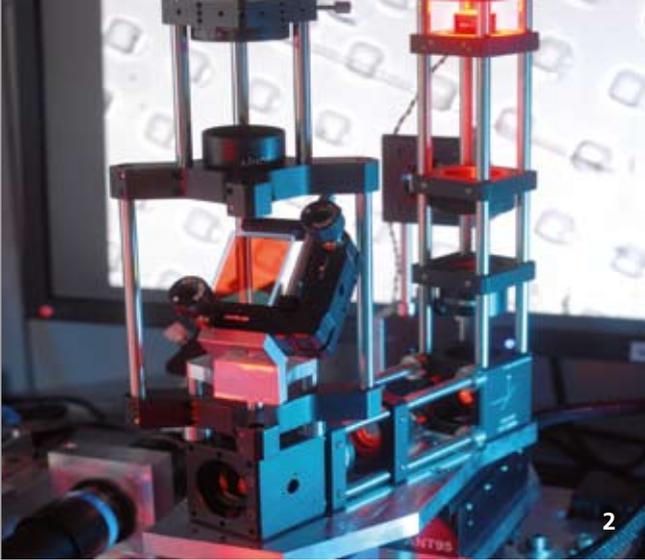
Hochauflöste Strukturierung organischer Elektronik spielt besonders bei der Herstellung von multifunktionalen RFID-Tags, hochauflösten flexiblen Displays und großflächigen ortsaufgelösten Sensoren eine große Rolle.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Moritz Schaefer
Telefon +49 241 8906-305
moritz.schaefer@ilt.fraunhofer.de

Dr. Jens Holtkamp
Telefon +49 241 8906-273
jens.holtkamp@ilt.fraunhofer.de

1 Für Dünnschichttransistoren benötigte Kammstruktur in PEDOT/PSS.



DESKTOP-SYSTEM FÜR DIE HERSTELLUNG HOCHAUFGE- LÖSTER MIKROSTRUKTUREN

Aufgabenstellung

Die zweiphotoneninduzierte Vernetzung von Polymeren ist ein direkt schreibendes laserbasiertes Verfahren für die Herstellung von Mikrostrukturen mit sub- μm -Auflösung. Solche Mikrostrukturen gewinnen in Bereichen wie z. B. photonische Kristalle und Metamaterialien, aber auch für die Erzeugung definierter Mikroumgebungen für die 3-D-Zellkultur in der Biologie an Bedeutung. Heutige maschinelle Umsetzungen dieser Technologie sind meist groß und teuer, was eine Weiterverbreitung erschwert.

Vorgehensweise

Das Fraunhofer ILT hat ein kostengünstiges Desktop-System für die Mikrostereo- und Multiphotonen-Lithographie entwickelt, das sich vor allem durch seine Kompaktheit auszeichnet. Ziel war es hierbei, die hohe Auflösung der Zweiphotonentechnik mit einem großen Bearbeitungsfeld zu kombinieren. Hierbei erfolgt der Aufbau der 3-D-Strukturen unabhängig vom Substratmaterial, sodass sich das System zur Kombination mit anderen generativen Fertigungsverfahren eignet. Das Fraunhofer ILT arbeitet dabei in enger Kooperation mit dem Fraunhofer IPA an einer Kombination der hochauflösenden Zweiphotonentechnik mit einem 3-D-Druckverfahren. Hierdurch eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Herstellung komplexer Strukturen, wie etwa die Kombination von Materialien unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften oder eine drastisch beschleunigte Prozesszeit.

Ergebnis

Die Zweiphotonentechnik wurde erfolgreich zur Herstellung mikroskaliger 3-D-Strukturen eingesetzt. Unter anderem wurden verzweigte Kapillaren mit einem Innendurchmesser von ca. $20\ \mu\text{m}$ aus einem elastischen Polymer sowie definierte Proteinmikrostrukturen und Kombinationen aus Polymeren und Proteinen hergestellt. Es konnte außerdem die Machbarkeit der Prozesskombination 3-D-Druck und Zweiphotonentechnik gezeigt werden. Eine komplette Anlage, in der diese Kombination realisiert wird, befindet sich gerade im Aufbau.

Anwendungsfelder

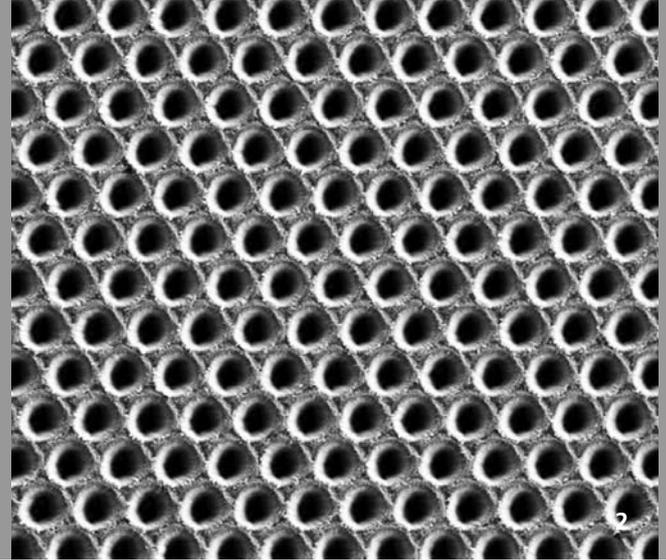
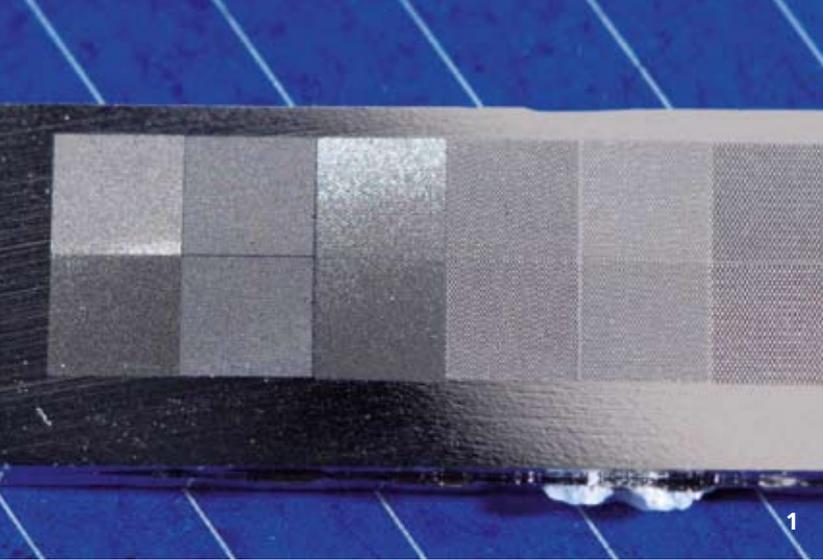
Das Fraunhofer ILT fokussiert seine Entwicklungen auf die biomedizinische Forschung. Die Vielseitigkeit der Methode erlaubt es, komplexe 3-D-Zellkulturumgebungen zu schaffen, um spezifische zellbiologische Fragestellungen zu untersuchen. Durch die Kombination mit dem 3-D-Druck ist die Herstellung von makroskopischen mit mikroskopischen, hochaufgelösten Strukturen, etwa eines vielfach verzweigten künstlichen Blutgefäßsystems zur Versorgung von Geweben, ein realisierbares Ziel geworden.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Sascha Engelhardt
Telefon +49 241 8906-605
sascha.engelhardt@ilt.fraunhofer.de

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

- 2 Prototyp für die Herstellung von Mikrostrukturen.
3 Verzweigte Kapillaren mit Innendurchmesser $20\ \mu\text{m}$.



MIKROSTRUKTURIERUNG VON METALLISCHEM GLAS

Aufgabenstellung

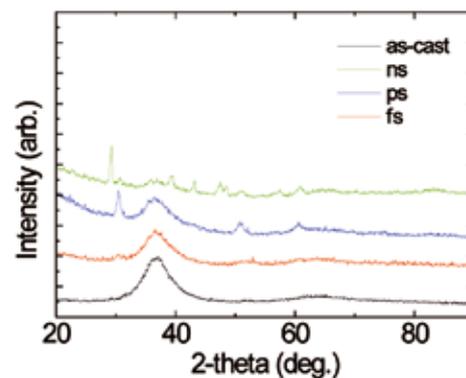
Amorphe Metalle oder metallische Gläser sind Legierungen, die auf atomarer Ebene keine kristalline, sondern eine amorphe Struktur aufweisen. Metallische Gläser sind im Allgemeinen härter, korrosionsbeständiger und fester als gewöhnliche Metalle. Zur Konservierung des amorphen Zustands sind Abkühlraten von bis zu 10^6 K/s notwendig. Bei der formgebenden Strukturierung oder Oberflächenmodifikation muss ein Wärmeeintrag ins Material weitgehend verhindert oder eine ähnliche Abkühlrate gewährleistet werden. Mechanische Strukturierungsverfahren erfüllen diese Anforderungen nicht.

Vorgehensweise

Die Lasermaterialbearbeitung mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich ermöglicht einen minimierten Wärmeeintrag in das Grundmaterial und eine nahezu vollständige Abfuhr der eingebrachten Energie im Verdampfungsprodukt. Durch ultrakurz gepulste Laserstrahlung wird die Oberfläche strukturiert oder die Oberflächenbeschaffenheit modifiziert. Mittels Röntgen-Diffraktometrie (XRD) wird die Struktur bezüglich ihrer amorphen und kristallinen Anteile vermessen.

Ergebnis

Die XRD-Messung der mit fs-Laserstrahlung bearbeiteten Oberfläche zeigt keinerlei Strukturänderung gegenüber dem gegossenen Ausgangsmaterial (as-cast), die amorphe Struktur bleibt erhalten. Bei der Bearbeitung mit Piko- und Nanosekunden-Laserstrahlung zeigen die Peaks in der XRD-Messung die teilweise oder vollständige Ausbildung einer kristallinen Struktur.



Anwendungsfelder

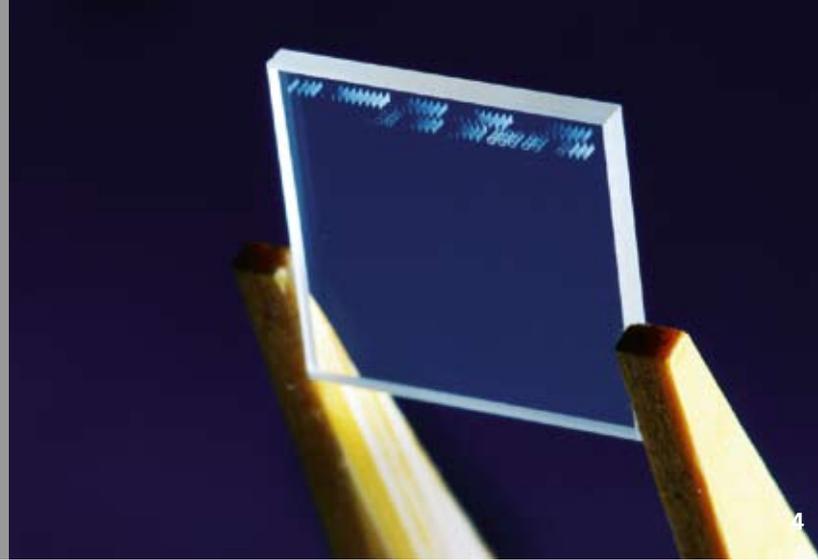
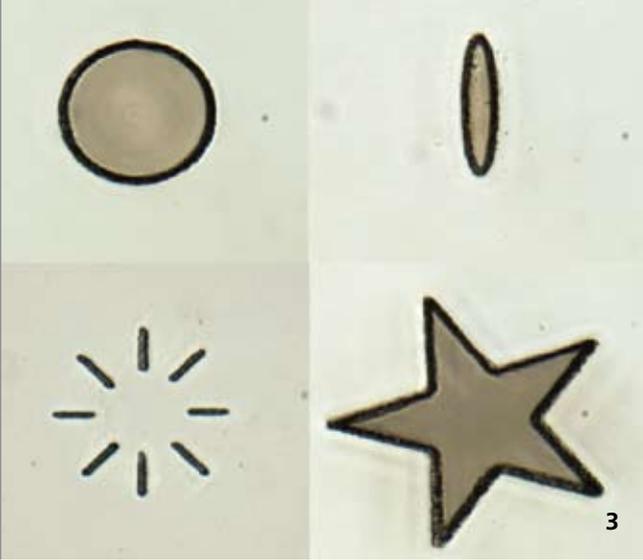
Aufgrund ihrer mechanischen, magnetischen und optischen Eigenschaften finden metallische Gläser Anwendung in der Elektrotechnik, Unterhaltungselektronik und im Sportartikelbereich (Golfschläger). Aufgrund der Biokompatibilität sind sie auch für medizintechnische Anwendungen interessant.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Dirk Wortmann
Telefon +49 241 8906-276
dirk.wortmann@ilt.fraunhofer.de

Dr. Ingomar Kelbassa
Telefon +49 241 8906-356
ingomar.kelbassa@ilt.fraunhofer.de

- 1 An der Oberfläche modifizierte metallische Glasprobe.
- 2 Mit fs-Laserstrahlung strukturierte Näpfchen mit $5 \mu\text{m}$ Durchmesser.



LICHTWELLENLEITER MIT BELIEBIGER MANTELGEOMETRIE

Aufgabenstellung

In der Integrierten Optik werden wellenleitende Strukturen in transparenten Dielektrika genutzt, um Licht auf kleinstem Raum zu modulieren. Eine flexible Gestaltung der Wellenleitergeometrie gestattet die gezielte Formung und Führung von Diodenlaserstrahlung. Durch Auslegung der Wellenleitergeometrie kann das Strahlprofil der geführten Strahlung an individuelle Anforderungen angepasst werden. Voluminöse, optische Systeme können durch eine integrierte und damit kompaktere Lösung ersetzt werden.

Vorgehensweise

Im Volumen eines transparenten Materials wird mit fokussierter Femtosekunden-Laserstrahlung eine lokale Brechungsindexänderung induziert, die als Lichtwellenleiter fungiert. Die Modifikationen werden mit einer Auflösung im Mikrometerbereich in drei Raumdimensionen generiert. Ein Präzisionsscanner in Kombination mit einer 3-Achs-Verfahrenanlage ermöglicht eine flexible Strahlführung zum Schreiben der Modifikationen. Innerhalb der erzeugten Strukturen kann Licht geführt und geformt werden. Aufgrund nichtlinearer Absorptionsprozesse sind die Volumenwellenleiter in nahezu jedem transparenten Material wie beispielsweise Glas, Kunststoff oder Kristallen realisierbar.

Ergebnis

Wellenleiter mit beispielsweise elliptischer und sternförmiger Mantelgeometrie sind im Volumen von Quarzglas und Saphir realisiert worden. Der Kerndurchmesser der 2 mm langen Wellenleiter wurde dabei von wenigen Mikrometern bis über 100 Mikrometer variiert. Dabei ist eine numerische Apertur $NA > 0,1$ demonstriert worden. Der Präzisionsscanner ermöglicht Herstellungszeiten < 1 Sekunde und die Anpassung der Wellenleitergeometrie an die Abstrahlcharakteristik der Laserdiode.

Anwendungsfelder

Durch die flexible Strahlführung des Präzisionsscanners während der Strukturierung können Wellenleiter individuell und schnell an die optischen Anforderungen angepasst werden. Die hergestellten Wellenleiter eignen sich zur Strahlformung und Strahlführung von Diodenlaserstrahlung. In Kombination mit mikrofluidischen Komponenten sind biomedizinische Anwendungen möglich. Optische Systeme können durch integrierte Lösungen kompakter und flexibler werden.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Dennis Beckmann
Telefon +49 241 8906-632
dennis.beckmann@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Dagmar Schaefer
Telefon +49 241 8906-628
dagmar.schaefer@ilt.fraunhofer.de

3 Wellenleiter mit unterschiedlicher Querschnittsform.

4 Quarzglasprobe mit Volumenwellenleitern.



PRÄZISIONSBAUTEILE AUS RUBIN

Aufgabenstellung

In der Uhrenindustrie wird Rubin in Form von Uhrensteinen aufgrund seines kleinen Reibungskoeffizienten (Rubin/Stahl geölt: 0,04 - 0,05), der großen Härte (9 Mohs) und des hiermit einhergehenden geringen Verschleißes der Einzelkomponenten eingesetzt. Die Herstellung der Lagersteine mit mechanisch abtragenden Fertigungsverfahren ist sehr zeit- und kostenintensiv und durch einen hohen Materialverlust geprägt. Bei komplexen Geometrien ist eine Kombination unterschiedlicher Fertigungsverfahren für die Herstellung der Lagersteine erforderlich. Ziel ist es, mittels selektivem laserinduzierten Ätzen (In-volume Selective Laser Etching, ISLE) Bauteile aus hartsprödem Material wie Rubin mit einem einzigen Verfahren hochpräzise herzustellen.

Vorgehensweise

Das Material des gewünschten Bauteils wird beim selektiven laserinduzierten Ätzen zunächst mit stark fokussierter, ultrakurz gepulster Laserstrahlung modifiziert. Unter Verwendung eines hochpräzisen Scannersystems werden beliebige, dreidimensionale Strukturen im Volumen transparenter Materialien erzeugt. Im nachfolgenden Ätzschritt werden die modifizierten Bereiche mit einer Ätzflüssigkeit entfernt. Das unbestrahlte Material verbleibt nahezu unbeeinflusst, sodass Kanäle im Volumen entstehen. Mittels dieser schichtweisen Bestrahlung lassen sich komplexe, dreidimensionale Bauteile realisieren.

Ergebnis

Neben der Herstellung von Bauteilen in Rubin wie Zylinder und Röhrchen sind bereits kubische Hohlräume und Kanäle mit einem Aspektverhältnis von 1000:1 bis zu einer Länge von 10 mm in Saphir realisiert worden.

Anwendungsfelder

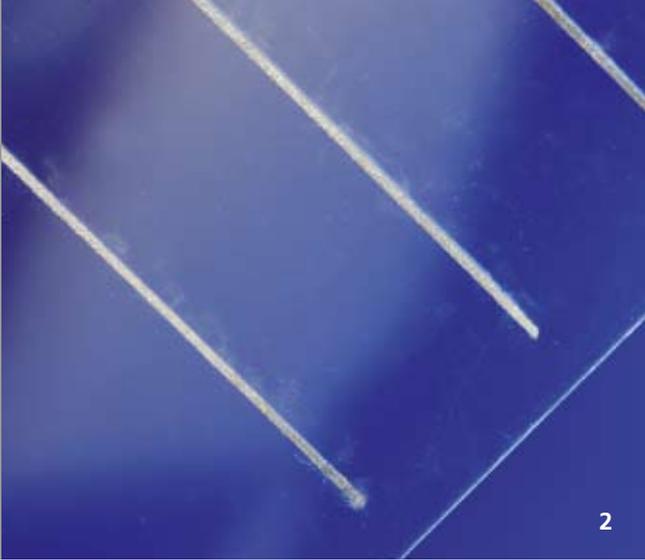
Präzisionsbauteile aus hartspröden Materialien wie Rubin und Saphir finden einen großen Anwendungsbereich in der Uhrenindustrie, der chemischen Industrie und der Medizintechnik. Aufgrund der guten Zugänglichkeit des Laserstrahls beim berührungslosen Herstellungsverfahren ISLE können auch Bauteilgeometrien realisiert werden, welche bisher bedingt durch fertigungstechnische Restriktionen konventioneller Verfahren nicht realisiert werden können. Das zweistufige ISLE-Verfahren ersetzt Fertigungsprozesse mit bis zu 30 einzelnen Arbeitsschritten und reduziert somit die Herstellungszeit um ein Vielfaches.

Ansprechpartner

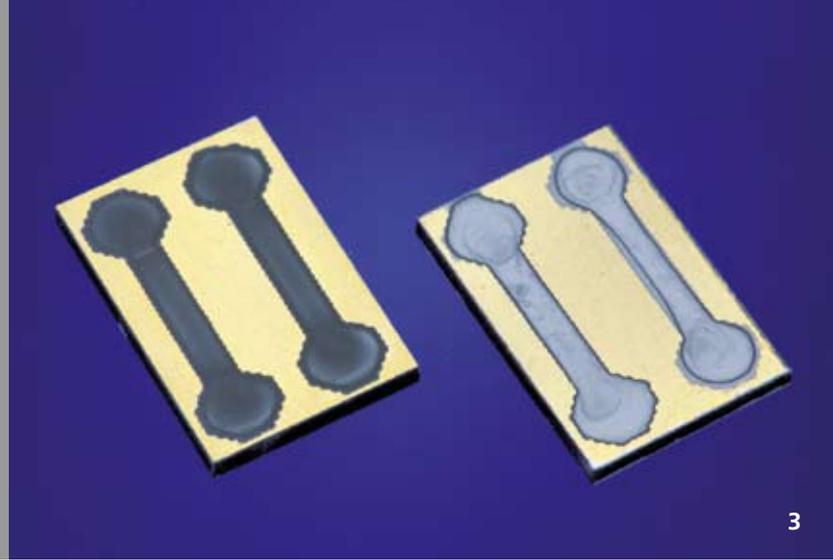
Dipl.-Phys. Maren Hörstmann-Jungemann
Telefon +49 241 8906-472
maren.hoerstmann-jungemann@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Dagmar Schaefer
Telefon +49 241 8906-628
dagmar.schaefer@ilt.fraunhofer.de

1 Mittels ISLE hergestelltes Röhrchen aus Rubin (1 mm Länge, 900 µm Außendurchmesser, 400 µm Innendurchmesser).



2



3

KOMBINIERTES DRUCK- UND LASERVERFAHREN ZUR HERSTELLUNG ORTSSELEKTIVER FUNKTIONSSCHICHTEN

Aufgabenstellung

Funktionelle metallische Schichten werden vielfach durch kosten- und zeitintensive PVD- und CVD-Prozesse aufgebracht. Diese Verfahren erfordern einen hohen technischen Aufwand durch die Verwendung von Vakuumkammern und unflexiblen Maskenverfahren. Mittels maskenloser Druckverfahren (z. B. Inkjet) lassen sich Metallpartikel-Dispersionen ortsselektiv und inliniefähig aufbringen. Die geforderten funktionellen Eigenschaften können nur durch zusätzliche thermische Nachbehandlungen wie z. B. Trocknen, Sintern/Schmelzen (überwiegend Ofenprozesse) erreicht werden. Ziel ist es, diese erforderliche Nachbehandlung durch ein substratschonendes und energieeffizientes Laserverfahren zu realisieren.

Vorgehensweise

Bei der Funktionalisierung und Trocknung dünner Schichten mittels Laserstrahlung wird die auf den Absorptionsgrad des Schichtmaterials abgestimmte Laserstrahlung ortsselektiv in das zu bearbeitende Material eingekoppelt, sodass die Schicht im ersten Schritt getrocknet und daraufhin versintert oder partiell aufgeschmolzen werden kann. So können z. B. bei metallischen Schichten Leitfähigkeiten nahe der des Bulkmaterials erzielt werden.

Ergebnis

Strukturierte metallische Schichten aus μm -Partikel-Dispersionen konnten über Druckverfahren auf verschiedene Substrate (z. B. Keramik und Kunststoffolie) aufgebracht werden. Durch Laserstrahlung lassen sich die nach Druck und Trocknung nicht leitfähigen Schichten so thermisch nachbehandeln, dass Leitfähigkeiten von bis zu 50 Prozent des Bulkmaterials erzielt werden.

Anwendungsfelder

Das kombinierte Druck- und Laserverfahren kann überall dort zum Einsatz kommen, wo Beschichtungen ortsselektiv benötigt werden oder eine herkömmliche thermische Nachbehandlung aufgrund temperaturempfindlicher Substrate nicht möglich ist, z. B. bei funktionellen Schichten für die Elektronik wie isolierende Schichten, Leiterbahnen oder Kontaktpunkte.

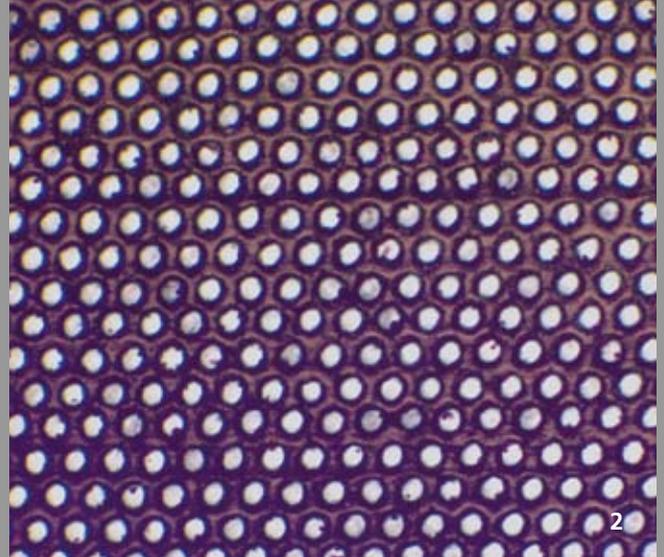
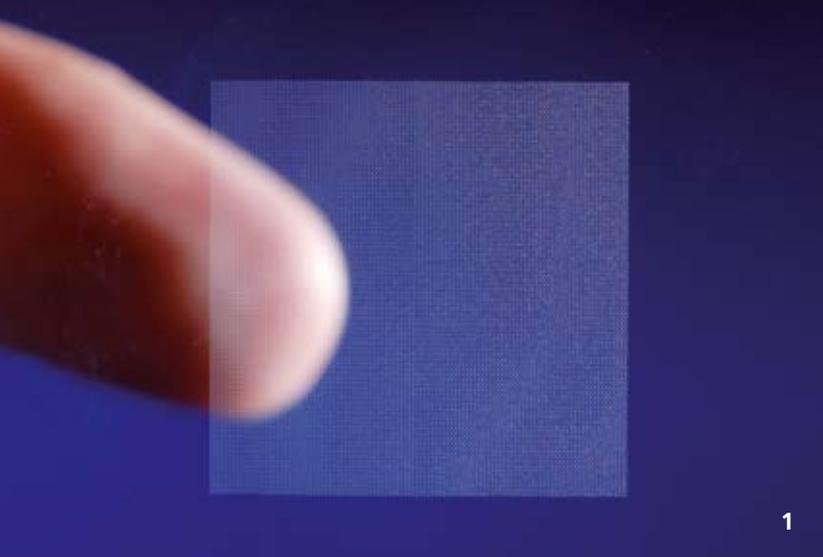
Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Melanie Meixner
Telefon +49 241 8906-626
melanie.meixner@ilt.fraunhofer.de

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

2 Silberleiterbahn auf Polymerfolie
(Inkjetdruck).

3 Mittels Pipejetdruck hergestelltes Zinnlötpad.



PRÄZISIONSBOHREN DÜNNER METALL- UND GLASFOLIEN MIT PIKOSEKUNDENLASERN

Aufgabenstellung

In Medizin und Technik werden verstärkt Mikrobohrungen z. B. als Entlüftungs- oder Dosierbohrungen benötigt. Der Durchmesser dieser Löcher liegt dabei häufig im Bereich $< 20 \mu\text{m}$ bei einer Materialstärke von typischerweise 50 bis $100 \mu\text{m}$. Die Anzahl der Bohrungen kann mehrere Tausend betragen. Die geforderten Taktraten liegen dabei bei > 1000 Löcher/Sekunde. Anordnung, Anzahl und Durchmesser der Löcher sind hierbei je nach Kundenwunsch unterschiedlich und sollten leicht anpassbar sein. Die zu bohrenden Materialien sind dabei dünne Folien unterschiedlicher Materialien wie verschiedene Metalle, Glas, Keramiken, aber auch Kunststoffe.

Vorgehensweise

Um die kleinen Lochdurchmesser erreichen zu können, wird ein frequenzverdreifachter Nd:YAG ps-Laser eingesetzt, der mittels einer Linse kleiner Brennweite fokussiert wird. Zur flexiblen und schnellen Positionierung des Laserstrahls wird ein Galvanometerscanner verwendet.

1 Perforiertes Dünnglas. Glasdicke $50 \mu\text{m}$, Bohrungsdurchmesser $20 \mu\text{m}$.

2 Perforierte Aluminiumfolie mit einem Bohrlochdurchmesser von $6 \mu\text{m}$ und einem Transmissionsgrad der Folie von 23 Prozent.

Durch den Einsatz eines ps-Lasers soll die thermische Belastung der Folie bei der Bearbeitung minimiert werden, um eine Schädigung der Materialien zu vermeiden. Die Anordnung der Bohrungen innerhalb des Scanfelds wird mittels CAD/CAM-Kopplung an die Software übergeben. Die Bohrstrategie sowie die Bearbeitungsparameter werden für die jeweiligen Materialien angepasst. Je nach Material werden die Verfahren auf unterschiedliche Ergebnisse optimiert, z. B. Bearbeitungsgeschwindigkeit für Metalle, Rissfreiheit für Gläser.

Ergebnis

Durch den Einsatz des ps-Lasers können Bohrungsdurchmesser von 3 bis $6 \mu\text{m}$ bei Bohrraten > 1200 Löcher/Sekunde in $50 \mu\text{m}$ dickem Aluminium erreicht werden. Der minimale realisierbare Mittenabstand der Bohrungen beträgt $< 10 \mu\text{m}$ bei einer minimalen Stegbreite von $5 \mu\text{m}$. Damit können maximale Transmissionsgrade der Folie (Verhältnis gebohrte Fläche zu Gesamtfläche der Folie) von 23 Prozent erreicht werden. In $50 \mu\text{m}$ dicken Glasfolien konnten Bohrraster mit Lochdurchmessern $< 20 \mu\text{m}$ erreicht werden.

Anwendungsfelder

Die Anwendungsfelder des Verfahrens liegen hauptsächlich in Anwendungen der Mikro- und Ultrafiltrationstechnologie zur mechanischen Wasseraufreinigung, der Photovoltaik zur Erzeugung von Rückseitenkontakten in Solarzellen oder auch im Bereich der Li-Ionen-Akkumulatoren.

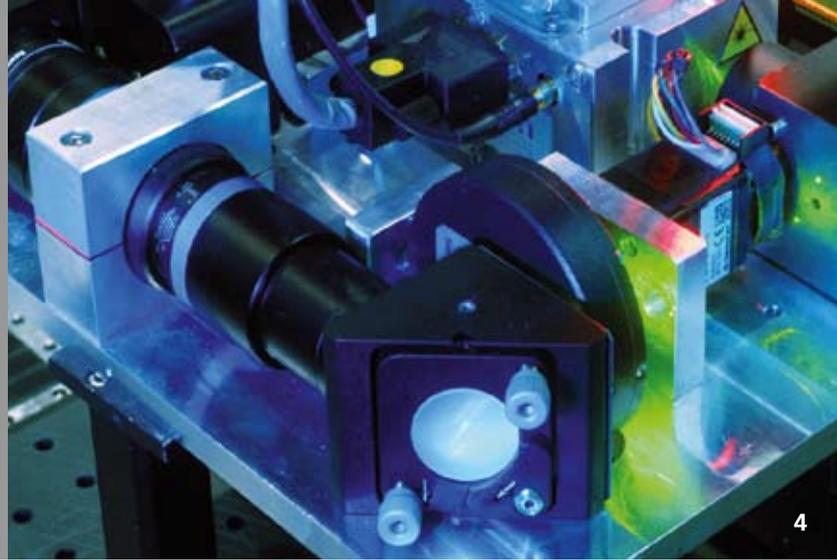
Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Claudia Hartmann
Telefon +49 241 8906-207
claudia.hartmann@ilt.fraunhofer.de

Dr. Jens Holtkamp
Telefon +49 241 8906-273
jens.holtkamp@ilt.fraunhofer.de



3



4

KAMERABASIERTE 3D-FOKUSPOSITIONIERUNG ZUM MIKROBOHREN

Aufgabenstellung

Die Laserbearbeitung von Mikrobauteilen stellt hohe Anforderungen an die Prozesssensorik und Systemtechnik. In der Serienfertigung betrifft dies neben der Sicherstellung der Prozessstabilität auch das verlässliche Positionieren des Bauteils. Bei der Bearbeitung von Mikrokapillaren mit einer Wandstärke im Bereich von 20 μm und einem Durchmesser von 200 μm ist bereits das Greifen und Spannen eine Herausforderung für einen automatisierten Fertigungsprozess. Noch höhere Anforderungen werden an Maschine und Optik gestellt, wenn eine referenzfreie Positionierung des Bauteils relativ zum Strahlfokus im Genauigkeitsbereich von einigen Mikrometern erfolgen soll.

Vorgehensweise

Die Herstellung von Bohrungen mit einem Durchmesser von weniger als 4 μm in Kunststoff-Mikrokapillaren setzt aufgrund der Fokussierung des Lasers eine genaue Kenntnis der Fokuslage relativ zum Werkstück voraus. Die kamerabasierte Überwachung der Mikrokapillare durch die Bearbeitungsoptik hindurch ermöglicht die präzise Bestimmung des Fokus relativ zur Oberfläche. Dabei wird die Abbildungsqualität der Struktur der Werkstückoberfläche zur Bestimmung der Fokusposition genutzt. Ist die Entfernung zwischen Objektiv und Objekt bestimmt, wird mit einem Positionierantrieb das Abstandsprofil aufgenommen und zur Bestimmung der Hauptachse des Bauteils verwendet. Die so ermittelte räumliche Position der Mikrokapillare wird der Maschinensteuerung für die Durchführung des Bohrprozesses zugestellt.

Ergebnis

Die Ermittlung des realen Abstands zwischen Werkstückoberfläche und Fokusposition ist unabhängig von der Justierung der Positionierantriebe und Optik. Sie ermöglicht damit eine referenzfreie Positionsermittlung der Mikrokapillare und die präzise, automatisierte Positionierung. Darüber hinaus ist das Bearbeitungssystem durch die koaxiale Beobachtung und Signalanalyse tolerant gegenüber Variationen bei der Einspannung.

Anwendungsfelder

Die Anwendungen von sowohl Messtechnik als auch Bearbeitungstechnik liegen vor allem in der Lasermaterialbearbeitung von Mikrobauteilen mit flexibler Aufspannung und bei biegeschlaffen Bauteilen, bei denen die Bauteilpositionierung nicht über eine exakte Werkstückaufnahme garantiert werden kann, wie beispielsweise bei Pipetten und Analysekomponenten in der Medizintechnik und Analytik.

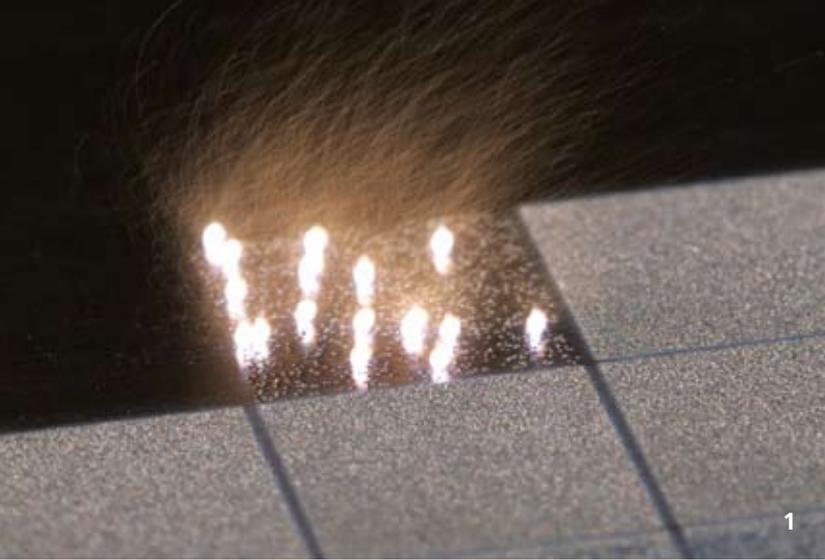
Ansprechpartner

M. Sc. Dipl.-Ing. (FH) B. Eng. (hon) Ulrich Thombansen
Telefon +49 241 8906-320
ulrich.thombansen@ilt.fraunhofer.de

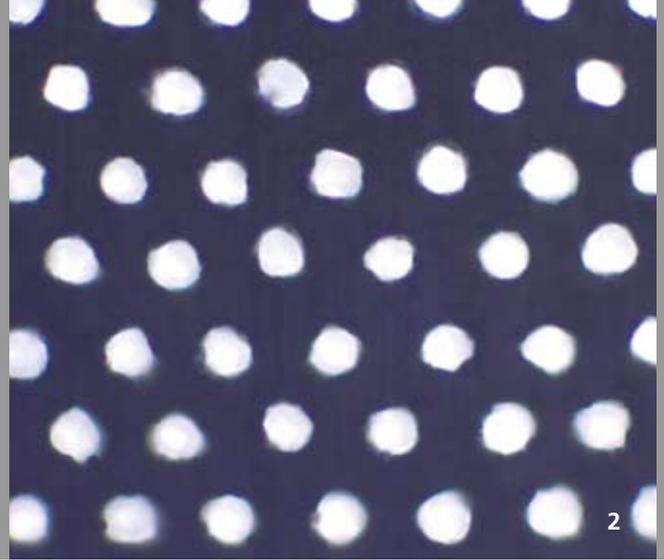
Dipl.-Ing. Joachim Ryll
Telefon +49 241 8906-463
joachim.ryll@ilt.fraunhofer.de

3 *Polyimid-Mikrokapillare
mit Prozessbeobachtung.*

4 *Optik-Modul des Bearbeitungssystems
mit Mikrochip-Laser (532 nm, 600 ps,
67 mW, 7 kHz).*



1



2

PERFORIERTE ABLEITERFOLIEN FÜR LITHIUM-IONEN-AKKUMULATOREN

Aufgabenstellung

Li-Ionen-Akkumulatoren bestehen aus Elektroden, bei denen die Aktivmassen auf Kathoden- und Anodenseite auf eine Metall-Ableiterfolie aufpastiert werden. Die Folie fungiert als elektrischer Leiter, mechanische Stütze und zur Ableitung der Wärme aus der Zelle. Als Aktivmasse werden Interkalationsmaterialien verwendet, die meist eine große Volumenänderung beim Laden oder Entladen durch das Ein- bzw. Auslagern von Lithium durchlaufen. Dadurch wird eine mechanische Belastung induziert, welche die Lebensdauer besonders bei Vollzyklisierung durch die größtmögliche Volumenänderung deutlich verkürzt. Durch eine Lochstruktur in der Metallfolie soll ein besserer mechanischer Kontakt zwischen Aktivmasse und Folie erreicht werden und ein mechanisches Aufbrechen des elektrischen Kontakts verhindert werden.

Vorgehensweise

Für die Herstellung einer mikroperforierten Folie wird ein frequenzverdreifachter Nd:YAG-Laser mit Pulsdauern im ns-Bereich eingesetzt. Durch die kurze Wellenlänge und den Einsatz sehr kurzer Brennweiten können Fokusedurchmesser im Bereich bis 5 μm erreicht werden. Zur Positionierung des Laserstrahls wird ein Galvanometerscanner verwendet.

1 Prozessleuchten beim Perforieren einer Metallfolie.

2 Perforierte Aluminiumfolie mit einem Bohrlochdurchmesser von 12 μm und einem Bohrlochmittenabstand von 27 μm .

Die Position und Bohrreihenfolge der Bohrungen innerhalb des Scanfeldes werden mittels Software definiert. Ein besonderes Augenmerk wird hier auf die Einflussfaktoren gelegt, die die Stabilität des Perforationsprozesses begrenzen.

Ergebnis

Zwei Haupteinflussfaktoren, die die Rundheit der Bohrungen sowie die Standardabweichung des Bohrungsdurchmessers beeinflussen, wurden festgestellt. Ein Faktor ist die Strahlstabilität des verwendeten Lasers, die durch ihre Schwankung in Form einer Ellipse die Bohrung beeinflusst. Ein weiterer liegt in thermischen Effekten, die durch die Reihenfolge der Bohrungen im Bohrraster beeinflusst werden. Durch entsprechende Wahl der Bohrstrategie können die Effekte so überlagert werden, dass sie minimiert werden.

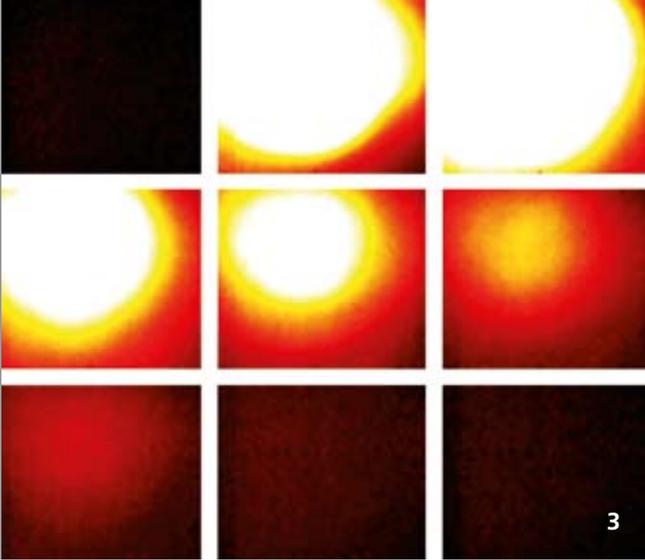
Anwendungsfelder

Die Anwendungsfelder des Hochrate-Bohrverfahrens liegen sowohl im Bereich der Li-Ionen-Akkumulatoren als auch in Anwendungen der Mikro- und Ultrafiltrationstechnologie zur mechanischen Wasseraufreinigung, der Photovoltaik zur Erzeugung von Rückseitenkontakten in Solarzellen oder auch der Filtration von Flüssigkeiten.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Claudia Hartmann
Telefon +49 241 8906-207
claudia.hartmann@ilt.fraunhofer.de

Dr. Jens Holtkamp
Telefon +49 241 8906-273
jens.holtkamp@ilt.fraunhofer.de



3



4

OPTISCHE DURCHBRUCH- ERKENNUNG BEIM LASERPERKUSSIONSBOHREN

Aufgabenstellung

Turbinenschaufeln von Flugtriebwerken sind extremen thermischen Belastungen ausgesetzt. Die heißen Abgase der Triebwerksbrennkammer treffen unmittelbar auf die Turbinenschaufeln, wobei die Abgastemperaturen die Schmelztemperaturen der Schaufelwerkstoffe übersteigen. Aus diesem Grund müssen Turbinenschaufeln durch einen zusätzlichen Luftstrom gekühlt werden. Diese Kühlluft strömt aus den Kavitäten der hohlen Turbinenschaufeln über Bohrungen auf die Schaufeloberfläche, wo sich ein schützender Kühlfilm ausbildet. Die Kühlluftbohrungen werden mittels Laserstrahlbohren (Perkussionsbohren) in die Turbinenschaufeln eingebracht. Da Turbinenschaufeln sicherheitsrelevante Bauteile sind, muss jede Bohrung auf vollständige Durchbohrung geprüft werden. Diese Qualitätskontrolle erfolgt heute ausschließlich manuell mithilfe spezieller Prüfpins. Mittels eines automatisierten Prüfverfahrens soll eine Möglichkeit geschaffen werden, optisch den Durchbruch beim Laserperkussionsbohren automatisiert und zuverlässig zu erkennen.

Vorgehensweise

Eine bestehende Anlage wurde durch koaxiale Überwachung, basierend auf einer Hochgeschwindigkeitskamera, erweitert. Während der laufenden Serienproduktion von Turbinenschaufeln wurden an dieser Anlage rund 10 000 Bohrungen durchgeführt und diese mittels der Kamera bei einer Bildrate

von 20 kHz aufgezeichnet. Die Aufnahmen wurden mit den dazugehörigen Prozessparametern in einer Datenbank gesichert, mittels speziell entwickelter Bildverarbeitungsalgorithmen analysiert und diese Ergebnisse wiederum statistisch ausgewertet. Eine besondere Herausforderung bestand darin, das Verfahren robust gegenüber unterschiedlichen Inzidenzwinkeln des Laserstrahls und unterschiedlichen Bohrungstiefen zu realisieren.

Ergebnis

Bei jeder Prozessüberwachung muss ein Kompromiss zwischen »Durchschlupf« (nicht erkannte Fehler) und »Pseudofehlern« (fälschlicherweise als fehlerhaft deklarierte Ergebnisse) eingegangen werden. Beim vorliegenden Anwendungsfall ist aufgrund der Sicherheitsrelevanz der Bauteile Durchschlupf mit einer Rate kleiner als ein Promille zu erzielen. Im Ergebnis lässt sich mit dem beschriebenen Überwachungsverfahren dann eine Zuverlässigkeit erzielen, die auch bei der Pseudofehlerrate einen sehr niedrigen Wert im Promillebereich ergibt.

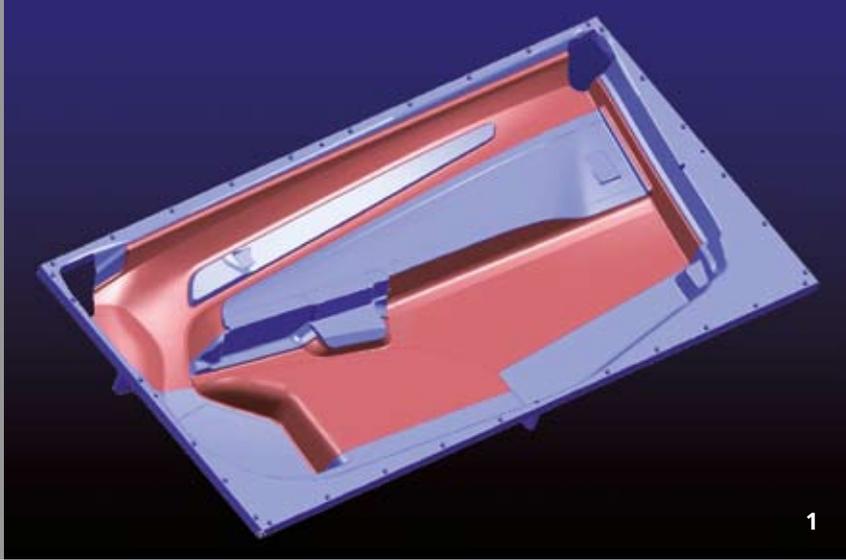
Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Alp Özmert
Telefon +49 241 8906-366
alp.oezmert@ilt.fraunhofer.de

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

3 *Prozessaufnahmen in zeitlicher und örtlicher Auflösung.*

4 *Systemtechnik für die Lasermaterialbearbeitung.*



AUTOMATISIERTES LASERSTRAHLBOHREN VON WERKZEUGFORMEN

Aufgabenstellung

Für die Herstellung von Formhäuten, wie z. B. Cockpit- oder Türinnenverkleidungen von Autos, wird das Rotationsintern, auch Slush-Molding genannt, eingesetzt. Zurzeit werden ca. 80 Prozent der Formhäute aufgrund komplexer Freiformflächen und Oberflächenstrukturen wie z. B. einer Leder- narbung mit Galvanoformen hergestellt. Die Herstellung dieser Galvanoformen ist je nach Komplexitätsgrad der Geometrie zeitaufwendig und durch die Vielzahl der Prozess- schritte kostenintensiv. Die konventionellen Galvanoformen sollen durch laserstrahlgebohrte Formen ersetzt werden.

Vorgehensweise

Die Bohrungen sollen mittels Laserstrahlung automatisiert in Werkzeugformen gefertigt werden. Als Anlagensystem wird ein Roboter mit einer Faserlaser-Strahlquelle eingesetzt. Hierfür wird eine CAx-Prozesskette entwickelt, in der die CAD-Daten der Werkzeugformen bearbeitet, Bohrlochfelder erzeugt und ein maschinenspezifisches NC-Programm erstellt werden. Für die Herstellung der Bohrungen mittels Faserlaserstrahlung werden verfahrensspezifische Grundlagen wie z. B. geeignete Prozessfenster und Prozessführungen erarbeitet.

Ergebnis

Durch laserstrahlgebohrte Werkzeugformen werden gegenüber den Galvanoformen folgende Vorteile erzielt:

- Neue, z. B. scharfkantige Werkzeugformgeometrien
- Neue Oberflächenstrukturen
- Verkleinerung der Market Response Time und Time to Market
- Reduzierung der Kosten pro Werkzeugform durch Reduzierung der erforderlichen Fertigungsschritte um ca. 50 Prozent

Anwendungsfelder

Die Vorteile der neuen laserstrahlgebohrten Werkzeugformen können zum Ablösen der konventionellen Galvanoformen führen, sodass alte Märkte neu erschlossen oder weitere Märkte durch neue Formen oder Kostenreduzierungen geschaffen und adressiert werden.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Hermann Uchtmann
Telefon +49 241 8906-8022
hermann.uchtmann@ilt.fraunhofer.de

Dr. Ingomar Kelbassa
Telefon +49 241 8906-143
ingomar.kelbassa@ilt.fraunhofer.de

1 CAD-Modell: Werkzeugform
einer PKW-Türinnenverkleidung.

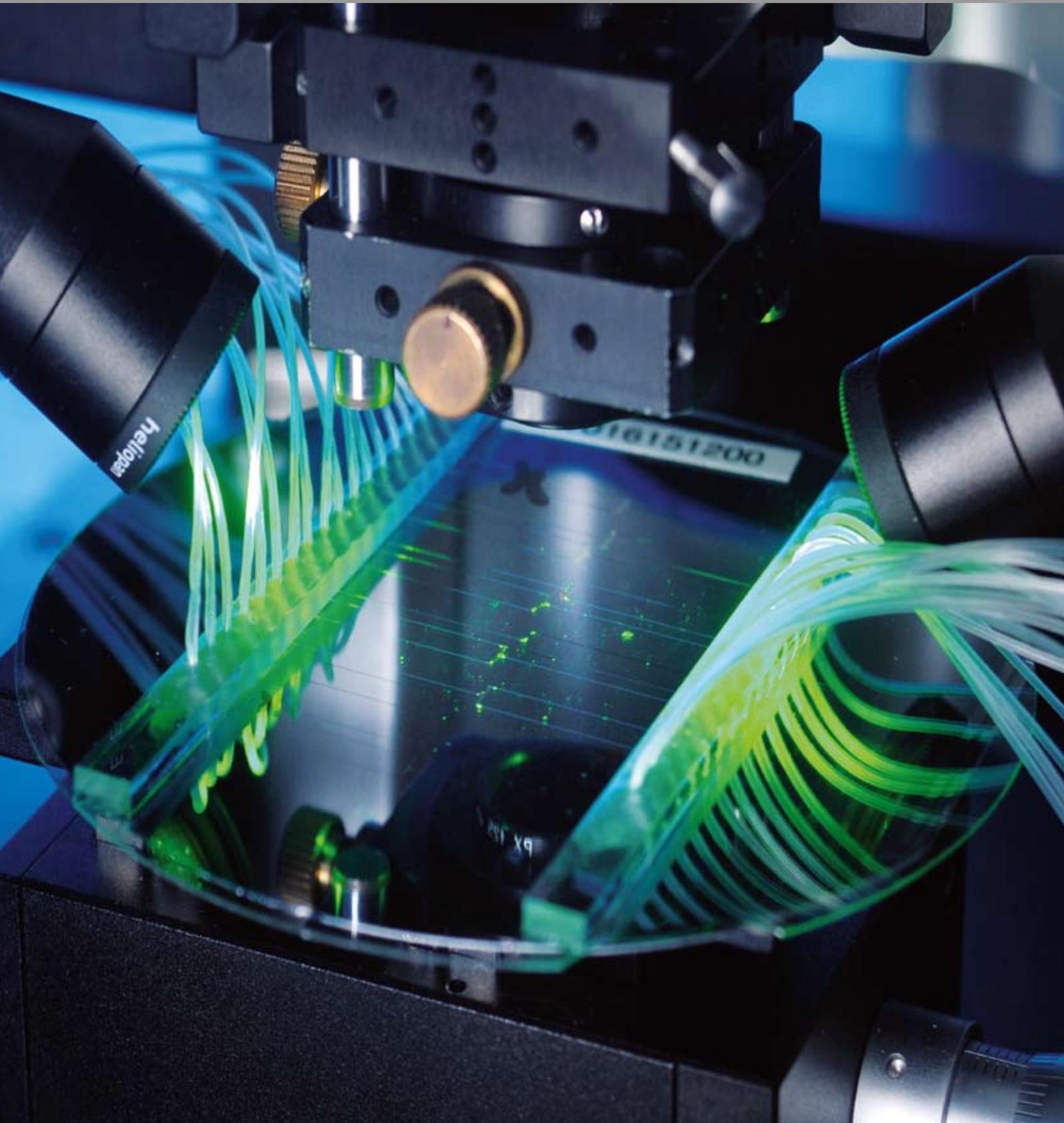
TECHNOLOGIEFELD MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK

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.

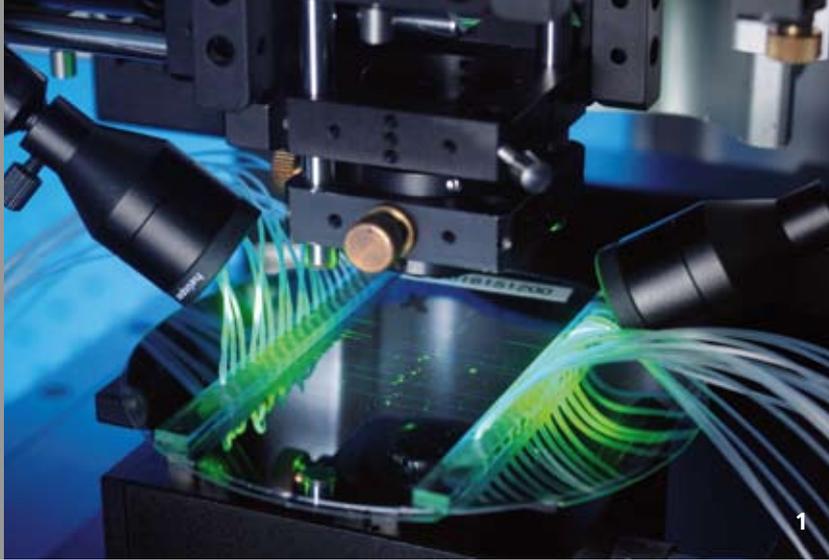
Die Nanoanalytik sowie die Point-of-care Diagnostik erfordern kostengünstige Einweg-Mikrofluidikbauteile. Diese werden mit Hilfe von Laserverfahren wie Fügen, Strukturieren und Funktionalisieren mit hoher Genauigkeit bis in den Nanometerbereich gefertigt. Die klinische Diagnostik, die Bioanalytik und 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.

MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK



INHALT

Sepsis-Schnelldiagnostik im mikrofluidischen Sorter	116
Automatisierte Vermessung von Stammzell-Morphologien	117
Topographische und chemische Nanostrukturen für Zelleitsubstrate	118
Analyse des Ablaufs der antimikrobiellen photodynamischen Therapie	119
Mikrochirurgisches Laserskalpell mit Echtzeit-Assistenzsystem	120



SEPSIS-SCHNELLDIAGNOSTIK IM MIKROFLUIDISCHEN SORTER

Aufgabenstellung

Die schnelle Diagnose bakterieller Erkrankungen im Hinblick auf die Erregerspezies und die Antibiotikawirksamkeit ist im klinischen Umfeld oft entscheidend für das Überleben des Patienten. So erkranken in Deutschland jährlich 75 000 Menschen an einer Blutvergiftung, von denen 60 000 Menschen nicht überleben. Der letale Verlauf der Erkrankung ist meist auf eine zu späte Identifikation von wirksamen Antibiotika zurückzuführen. Mit zunehmender Verbreitung multiresistenter Erreger ist eine Entspannung der Situation nicht zu erwarten. Mithilfe von Fluoreszenzsensorik und Mikrofluidiktechnologie soll die Diagnosezeit erheblich reduziert werden.

Vorgehensweise

Das Verfahren basiert auf einer Anfärbung der Erreger durch fluoreszenzmarkierte Antikörper. Durch eine empfindliche Fluoreszenzsensorik ist es möglich, einzelne Erreger in einer Lösung zu erkennen und in einer Mikrofluidik von anderen Erregern zu trennen. Die Herausforderung liegt hierbei in der Vielfalt von Erregern, was es nötig macht, mehrstufig zu sortieren und somit an verschiedenen Orten gleichzeitig Erreger zu identifizieren. Trotz Parallelisierung und Miniaturisierung der Sensorik müssen die Anforderungen an Detektionsempfindlichkeit und Robustheit erfüllt werden.

Ergebnis

Im Labormaßstab wurde ein Fluoreszenzsensor aufgebaut, der durch eine auf den fluidischen Kanal abgestimmte Strahlformung zuverlässig fluoreszenzmarkierte Probepartikel bei Volumenströmen bis zu $dV/dt = 30 \mu\text{l}/\text{min}$ registriert und dabei ein Signal-Rausch-Verhältnis von $\text{SNR} = 30 \text{ dB}$ erreicht.

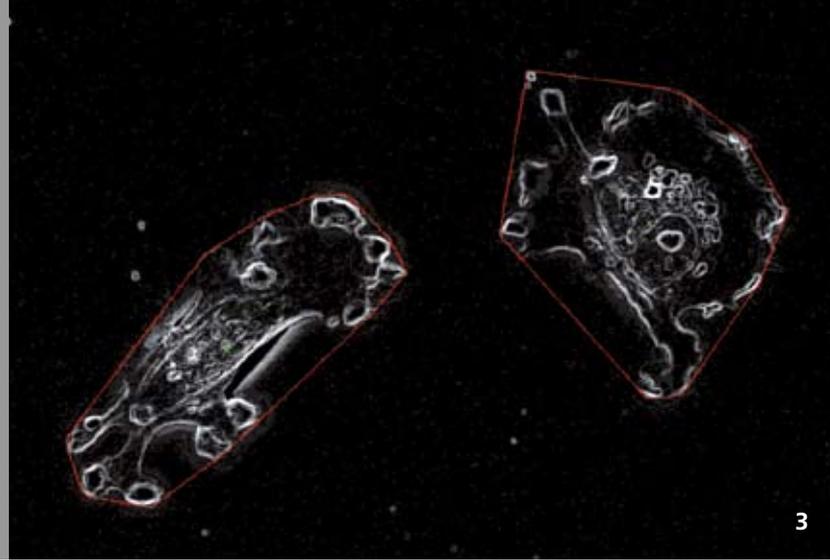
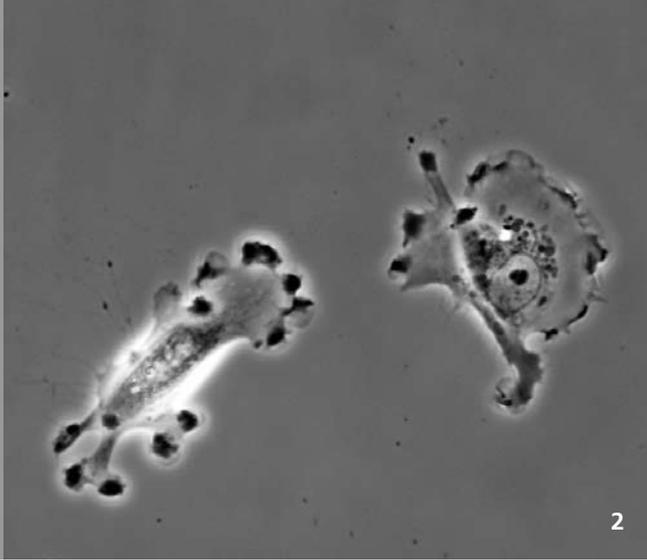
Anwendungsfelder

Neben dem klinischen Anwendungsfeld, wo eine schnellere Identifikation der bakteriellen Erreger für eine höhere Überlebenswahrscheinlichkeit des Patienten und für finanzielle Einsparungen im intensivmedizinischen Bereich sorgt, ist dieses Verfahren insbesondere für die Lebensmittelindustrie geeignet. Durch eine schnelle Identifikation von verunreinigten Zutaten und Produkten können die Verarbeitung und Verteilung frühzeitig gestoppt und Folgekosten reduziert werden.

Ansprechpartner

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

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



AUTOMATISIERTE VERMESSUNG VON STAMMZELL-MORPHOLOGIEN

Aufgabenstellung

Die Nutzung von Stammzellen erfährt in der Medizin eine immer größere Bedeutung. Die Forschung sucht nach Wegen, aus Stammzellen beispielsweise Hautzellen, blutbildende Zellen und in Zukunft ganze Organe zu generieren. Im Rahmen eines Kooperationsprojekts zwischen der Max-Planck-Gesellschaft und der Fraunhofer-Gesellschaft werden die für die Differenzierung von hämatopoetischen Stammzellen notwendigen Voraussetzungen anhand von mehrschichtigen, dreidimensionalen Stammzellsystemen erforscht. Neben der genauen Zellpositionierung stellt die automatisierte Auswertung der Zellverbände eine Hauptaufgabe für das Fraunhofer ILT dar.

Vorgehensweise

Die Morphologie der Stammzellen wird über schichtweise 2-D-Scans hochaufgelöster Mikroskopaufnahmen von Zellkulturen ermittelt. Dabei werden die Zellkonturen jeder Ebene mit analytischen Verfahren der Bildverarbeitung ermittelt. Die Zellkonturen der einzelnen Ebenen werden in einem weiteren Schritt zu einer dreidimensionalen Zellmorphologie zusammengesetzt. Eine besondere Herausforderung stellt die räumliche Abgrenzung von zwei aneinander angrenzenden Zellen dar. Mithilfe des zeitlichen Verlaufs der Zellmorphologie soll die schwierige Unterscheidung von Einzelzellen und Zellgruppen jedoch möglich werden.

Ergebnis

Ansätze zur Detektion der Zellkontur einer Ebene werden bereits an Mikroskopbildern einzelner Zellen erprobt. Nach geeigneter Vorverarbeitung (Kontrastbild) werden Pixel mit ähnlicher Intensität zu einem Cluster zusammengefasst. Umriß und Schwerpunkt eines Clusters charakterisieren die Zellausdehnung in der Ebene und liefern so die Zellkonturhöhenlinie einer Ebene, siehe Bild 3.

Anwendungsfelder

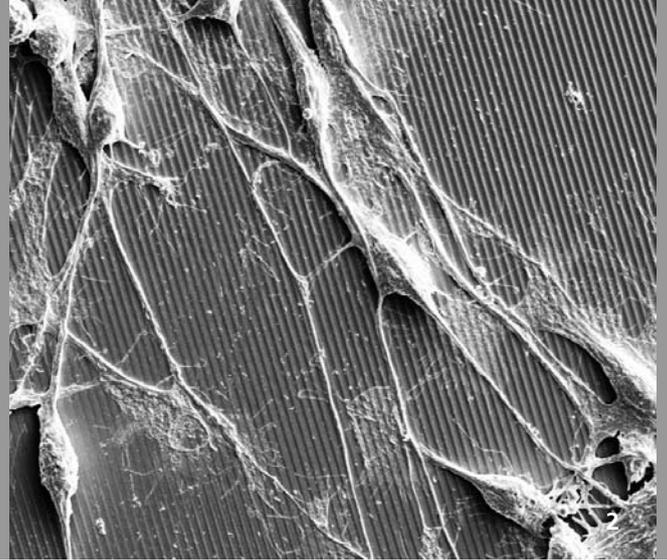
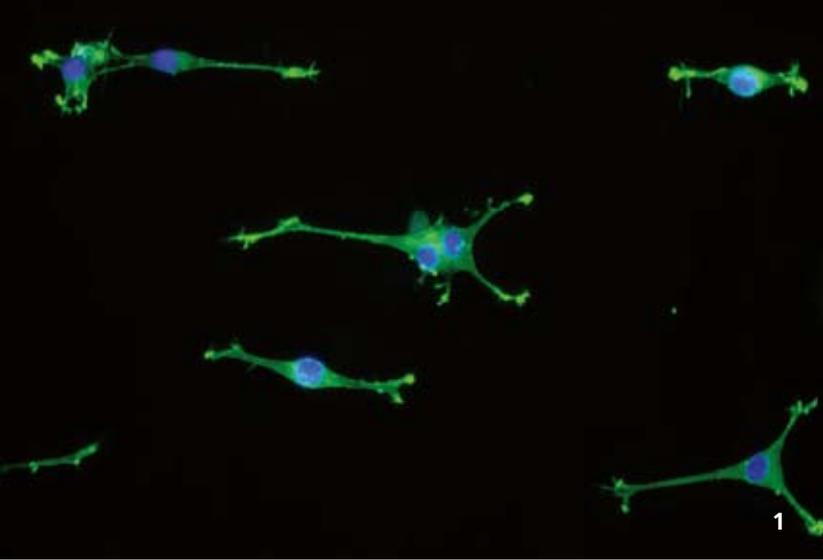
Der Anwendungsbereich der Entwicklungen ist die gezielte In-vitro-Herstellung von Stammzellnischen mitsamt ihrer Umgebung und deren automatisierte Auswertung. Die so gewonnenen Erkenntnisse werden einen Beitrag zur Aufklärung der Vorgänge innerhalb von Stammzellnischen und damit langfristig zur Nutzung von In-vitro-Stammzellnischen in der Wirkstoffentwicklung leisten.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Michael Ungers
 Telefon +49 241 8906-281
 michael.ungers@ilt.fraunhofer.de

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

- 2 *Mikroskopaufnahme zweier Zellen, aufgenommen am Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin.*
- 3 *Konturerkennung auf Basis des Kontrastbilds.*



TOPOGRAPHISCHE UND CHEMISCHE NANOSTRUKTUREN FÜR ZELLEITSUBSTRATE

Aufgabenstellung

Das Wachstum von Zellen und ihre Ausrichtung werden von den äußeren Bedingungen des jeweiligen Substrats beeinflusst. Topographie und chemische Zusammensetzung der Oberfläche sind häufig entscheidend für die Reaktion von Zellen auf künstliche Materialien wie Implantate oder In-vitro-Zell-Assays. Dabei spielen Nanostrukturen und Nanofunktionalitäten eine große Rolle, da diese Strukturgrößen im natürlichen Umfeld der Zellen maßgeblich sind. Durch die gezielte Herstellung von Nanostrukturen im Bereich von 90 nm bis 1000 nm in biokompatiblen Polymeren und eine nanoskalige photochemische Modifizierung soll der Einfluss solcher Oberflächen auf Zellen ermittelt und daraus Rückschlüsse auf optimierte Implantatoberflächen gezogen werden.

Vorgehensweise

Die Interferenzstrukturierung basiert auf der Erzeugung sinusförmiger Intensitätsprofile durch Überlagerung zweier Laserstrahlen, wodurch Strukturen im Nanometermaßstab erzeugt werden können. Weiterentwicklungen dieser Technik erlauben es, Rillen und Noppen sowie Kombinationen daraus mit unterschiedlichen Strukturbreiten und -tiefen in biokompatiblen Polymeren herzustellen. Zur chemischen Nanostrukturierung werden photoaktivierbare Verbindungen

1 *Ausrichtung neuronaler Zellen (B 35) an Nanomuster, Dapi-I/Phalloidin-Doppelfärbung.*

2 *Neuronale Zellen (B 35) orientieren sich entlang von 1 µm breiten und 650 nm tiefen Rillen.*

wie Azide eingesetzt, die nur in bestrahlten Zonen oberhalb einer Schwellenenergie an das Polymer binden. Diese Azide verfügen über eine zweite Funktionalität, die der Anbindung von Proteinen etc. zugänglich ist.

Ergebnis

Die grundsätzliche Machbarkeit des Ansatzes zur photochemischen Nanomodifizierung konnte anhand von XPS- und fluorenszenzspektrometrischen Daten gezeigt werden. Zellkulturuntersuchungen zur Orientierung von neuronalen Zellen auf den erzeugten Nanostrukturen zeigen eine Ausrichtung entlang der Rillen, wenn diese eine gewisse Tiefe, genauer ein Aspektverhältnis größer 0,6 aufweisen. Weitere systematische Untersuchungen auf unterschiedlichen Materialien, mit verschiedenen Zellen und Kombinationen der topographischen und chemischen Effekte sind Gegenstand laufender Forschungsarbeiten.

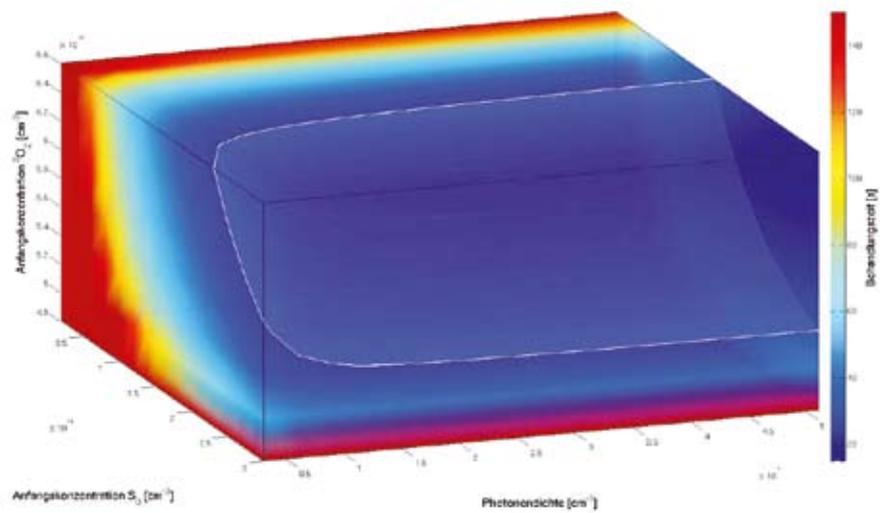
Anwendungsfelder

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Tissue Engineering eingesetzt, um ein verbessertes Einwachsen von Implantaten zu erzielen. Gerade wenn es um die Ansiedlung unterschiedlicher Zelltypen geht, können solche topographischen und chemischen Nanostrukturen helfen, die Zellen gezielt zu beeinflussen. Auf diese Weise sollen Leitstrukturen nach biomimetischen Gesichtspunkten hergestellt werden. Die Arbeiten werden im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP1327 gefördert.

Ansprechpartner

Dr. Elke Bremus-Köbberling
Telefon +49 241 8906-396
elke.bremus@ilt.fraunhofer.de

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



3

ANALYSE DES ABLAUFES DER ANTIMIKROBIELLEN PHOTODYNAMISCHEN THERAPIE

Aufgabenstellung

Die antimikrobielle Photodynamische Therapie (aPDT) ist ein in der Praxis der Parodontitisbehandlung eingesetztes Verfahren zur Abtötung von Keimen. Dennoch wirft die Diskrepanz zwischen den erfolgreichen In-vitro-Studien und dem geringeren Erfolg bei klinischen Studien die Notwendigkeit auf, die bei der aPDT ablaufenden Prozesse tiefgehend zu untersuchen.

Vorgehensweise

Durch die Analyse der chemischen Reaktionen und physikalischen Interaktionen zwischen den an dem Prozess beteiligten Stoffen werden die bedeutendsten Einflussgrößen identifiziert. Die Analyse der opto-chemischen Prozesse erfolgt mittels eines Systems von sechs gekoppelten gewöhnlichen Differenzialgleichungen. Das Lösungsverhalten des Gleichungssystems wird untersucht, um Parameterbereiche zu finden, in denen die Lösung gegenüber Schwankungen patientenabhängiger Parameter wenig sensibel ist. Ein zusätzliches Kriterium für die erfolgreiche Behandlung ist eine kleine Konzentration der Bakterien nach möglichst kurzer Behandlungszeit.

Ergebnis

Mit der Analyse des Gleichungssystems konnte im Parameterraum eine Schwelle aufgefunden werden, mit deren Überschreiten der Erfolg der Behandlung superlinear anwächst. Eine Möglichkeit zur Entwicklung eines Zusammenhangs von geeigneten Messsignalen und dem Therapieerfolg ist damit gegeben und wird derzeit detaillierter untersucht. Die Analyse liefert Aussagen über eine günstige Wahl der Behandlungsparameter, wobei das Behandlungsergebnis robust gegen Parameterschwankungen ist.

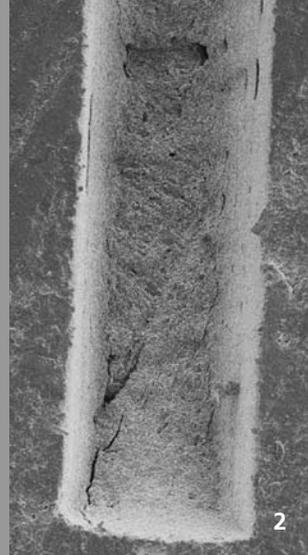
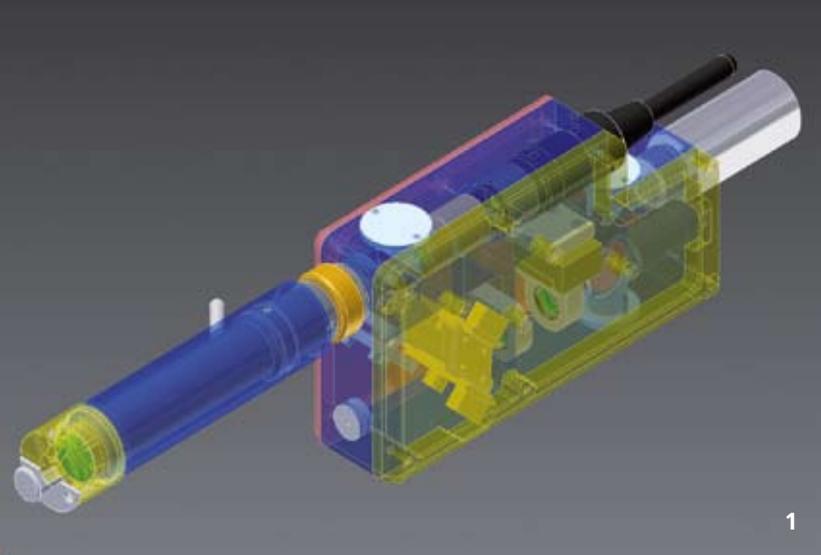
Anwendungsfelder

Mithilfe der dargestellten Untersuchungen wird das langfristige Ziel einer zunehmend modellgestützten Therapie verfolgt. Neben der Parodontitisbehandlung bieten die Tumorthherapie und die Sterilisierung von Wasser attraktive Anwendungsmöglichkeiten.

Ansprechpartner

Ruta Mikalauskaite
 Telefon +49 241 8906-610
 ruta.mikalauskaite@ilt.fraunhofer.de

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



MIKROCHIRURGISCHES LASERSKALPELL MIT ECHTZEIT-ASSISTENZSYSTEM

Aufgabenstellung

Um neurochirurgische Eingriffe am Gehirn durchzuführen, muss im ersten Schritt das darüber liegende Knochengewebe entfernt werden. Kurzpuls-Laser sind zum Aufschneiden der Schädeldecke vorteilhaft gegenüber dem Stand der Technik, weil mit Laserstrahlung, anders als mit mechanischen Trepanfräsen, kein Anpressdruck notwendig ist. Somit kann das Verletzungsrisiko der Hirnhaut minimiert werden. Zudem können Laserschnitte in Hartgewebe ohne Spanabhebung mit einer Schnittbreite von lediglich 0,5 mm erstellt werden, wodurch das kosmetische Ergebnis beim Wiedereinsetzen des Knochengewebes gesteigert wird.

Vorgehensweise

Die hochintensive Pikosekunden-Laserstrahlung wird in ein Handstück eingekoppelt, mit dem der Chirurg markierten Schnittlinien folgen kann. Der Chirurg behält dabei die Prozesskontrolle. Die integrierte Mikroschnitttechnologie sorgt für eine dreidimensionale Feinpositionierung des Laserfokus in der Schnittfuge. Mithilfe eines 3-D-Messsystems können die Restdicke der Schnittfuge sowie das Tiefenprofil in Echtzeit überwacht werden. Ein 2-D-Bilderfassungssystem analysiert automatisch die Schnittführung und kann unter anderem Abweichungen durch Zitterbewegungen des Operateurs

ausgleichen. Über ein integriertes Spül- und Absaugsystem können abgetragene Gewebefragmente und Blut aus dem Operationsfeld entfernt werden. Zum Ablösen der Hirnhaut von der Schädeldecke dient ein höhenverstellbarer Dura-Ablöser. Alle Komponenten, die direkt mit dem Patienten in Kontakt kommen, sind sterilisierbar.

Ergebnis

Im Rahmen des Fraunhofer-Verbundprojekts »MILOS« wird derzeit ein Demonstrator für vorklinische Studien aufgebaut. In Laborexperimenten zur Evaluierung des Schneidprozesses sind Abtragsraten von 8 mm³/min an Hartgewebe ohne thermische Schädigung und Schnitttiefen bis zu 3,5 mm erreicht worden.

Anwendungsfelder

Das Handstück kann in der Hartgewebe- und Weichgewebechirurgie überall dort eingesetzt werden, wo händische Schnittführung bei hoher Schnittpräzision notwendig ist, wie z. B. in der Wirbelsäulen-, Kiefer- und Gesichtschirurgie.

Ansprechpartner

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

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

- 1 Laserskalpell mit Mikrooptik.
- 2 Laserschnitt in Hartgewebe.
- 3 Hochleistungs-Pikosekundenlaser.

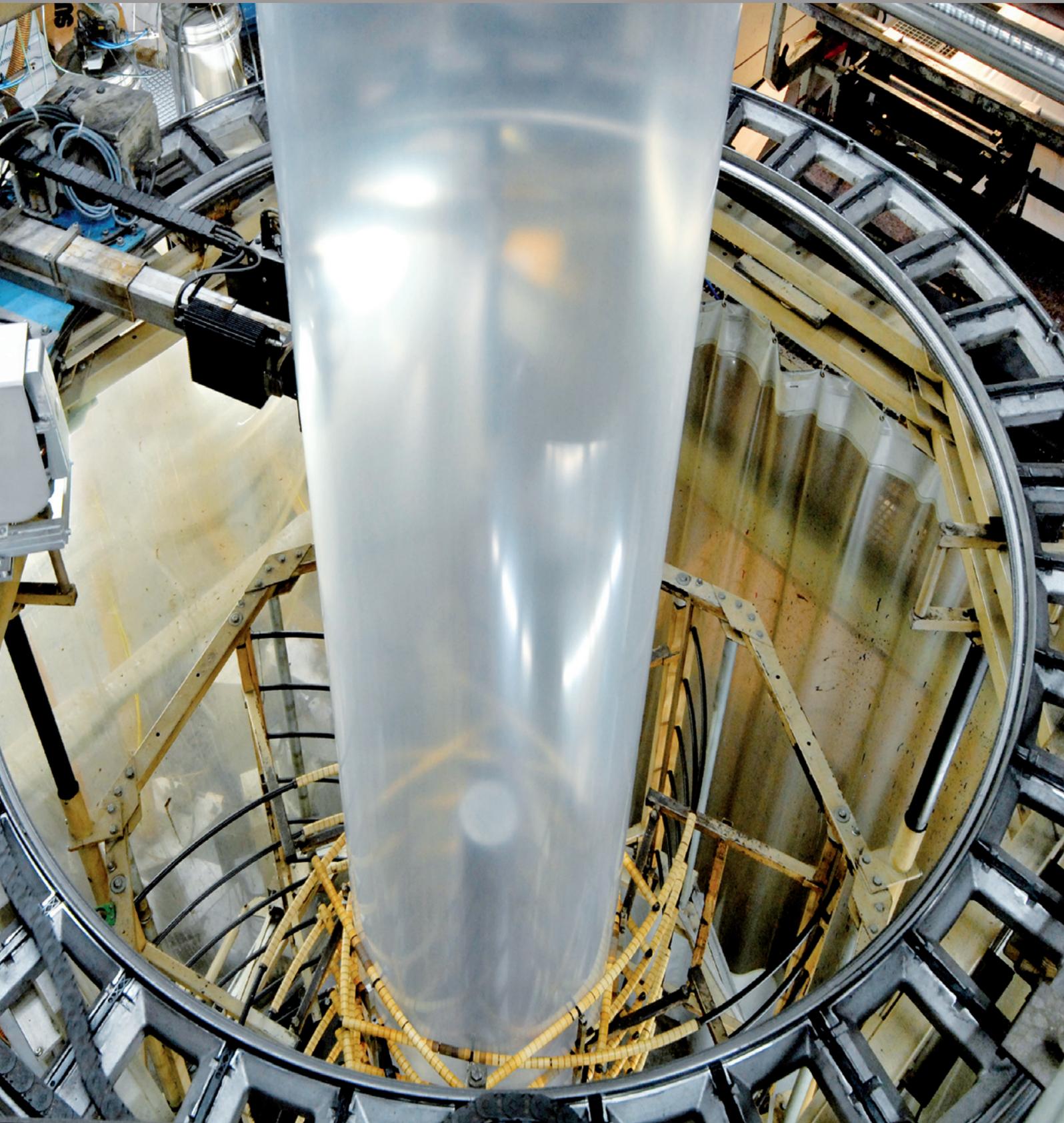
TECHNOLOGIEFELD LASERMESSTECHNIK UND EUV-TECHNOLOGIE

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.

LASERMESSTECHNIK UND EUV-TECHNOLOGIE



INHALT

Inline-Messung der Einzelschichtdicken von Kunststofffolien	124
Interferenz-Mikroskopie für die Prozessanalytik	125
Vermessung der Partikeldichteverteilung von Pulverdüsen	126
Toxinanalytik mit Fluoreszenzpolarisation	127
Nahfeldmikroskopie: Infrarotspektroskopie mit Sub-Mikrometer-Ortsauflösung	128
Mobile mikrowellenverstärkte Laser-Emissionsspektroskopie	129
Kompakte Quelle für extrem ultraviolette Strahlung	130
EUV-Hartmann-Wellenfrontsensor	131



INLINE-MESSUNG DER EINZELSCHICHTDICKEN VON KUNSTSTOFFFOLIEN

Aufgabenstellung

Kunststofffolien, insbesondere solche zur Verpackung von Lebensmitteln, bestehen aus mehreren Einzelschichten, denen individuelle Funktionen zukommen. So gewährleisten diese beispielsweise die mechanische Festigkeit oder dienen als Diffusionsbarriere, um die verpackten Produkte lange frisch zu halten. Das Bestreben, den Rohstoffeinsatz auf ein Minimum zu reduzieren, erfordert eine zuverlässige Inline-Qualitätskontrolle, um den Prozess zu regeln und den Ausschuss zu minimieren. Bei der Herstellung von Kunststofffolien sind Messsysteme zur Bestimmung der Gesamtfoliendicke für die Qualitätskontrolle sowie zur Prozessregelung bereits Stand der Technik. Für die Inline-Vermessung des Schichtaufbaus von Mehrschichtfolien stehen bislang jedoch keine Folieninspektionssysteme zur Verfügung.

Vorgehensweise

Der am Fraunhofer ILT entwickelte optische Sensor nutzt das an den Grenzen der einzelnen Folienschichten zurückgestreute Licht des Messstrahls, um die Schichtdicken eines Folienverbunds getrennt zu vermessen. Zunächst wurde die prinzipielle Eignung des Messverfahrens zur Einzelschichtdickenmessung in Laborversuchen gezeigt. Im zweiten Entwicklungsschritt wurde der optische Sensor in die Blasfolienanlage eines Kunden integriert, wo er unter industriellen Bedingungen in einem Langzeittest erprobt wird.

1 *Optischer Sensor zur Einzelschichtdickenmessung an einer Blasfolienanlage.*

Ergebnis

Innerhalb des Messbereichs von 4,5 mm werden die Einzelschichten mit Mindestdicken von 10 µm inline gemessen. Während der Messungen umfährt der optische Sensor den Folienschlauch, um die Einzelschichtdicken über dem gesamten Umfang der Folie zu vermessen. Eine Analyse-Software wertet die Rohdaten im Messtakt aus, identifiziert die Schichtgrenzen und stellt dem Folienproduzenten die gemessenen Einzelschichtdicken auf einem Kontrollmonitor zur Überwachung seiner Blasfolienanlage zur Verfügung.

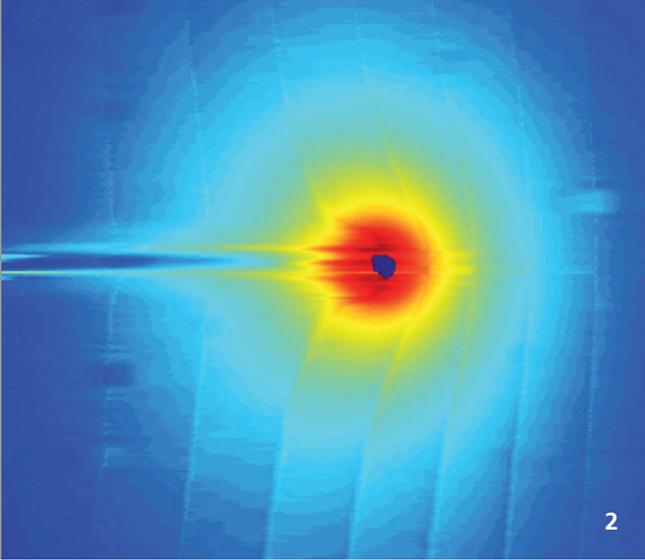
Anwendungsfelder

Durch die Inline-Messungen der Einzelschichtdicken hat der Folienproduzent die Möglichkeit, frühzeitig regelnd in den Herstellungsprozess einzugreifen, wenn das Produkt hinsichtlich der Einzelschichtdicken von den Sollwerten abweicht. Dadurch können die Einzelschichtdicken mit geringerer Toleranz produziert werden, woraus sich Einsparungen bei Material und Kosten ergeben.

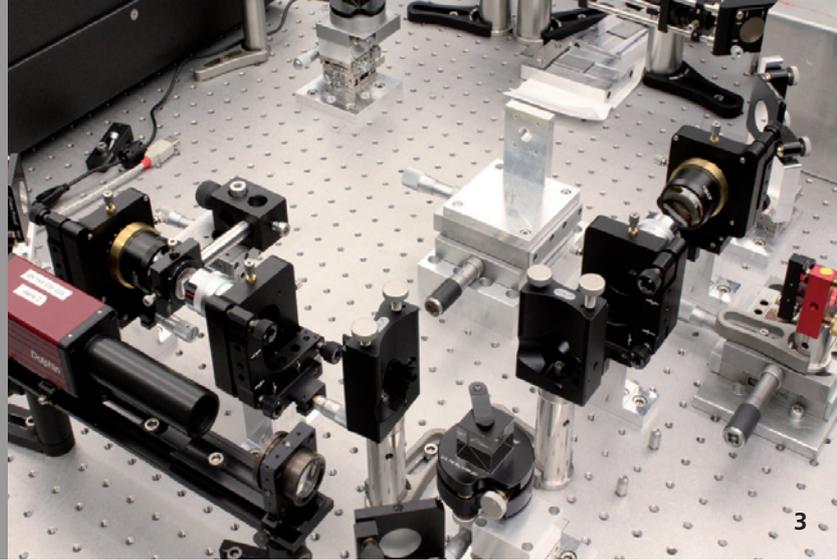
Ansprechpartner

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

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



2



3

INTERFERENZ-MIKROSKOPIE FÜR DIE PROZESSANALYTIK

Aufgabenstellung

Mittels Femtosekundenlaserstrahlung, die in das Volumen von transparenten Materialien fokussiert wird, lässt sich eine auf weniger als $10 \mu\text{m}^3$ begrenzte Modifikation des Materials erzielen. Die Modifikation besteht in einer rissfreien Änderung des Brechungsindex sowie in einer Vergrößerung der nass-chemischen Ätzbarkeit. Diese induzierten Effekte können zur Herstellung von integrierten optischen und mikrofluidischen Komponenten sowie zum Verschweißen von Gläsern genutzt werden. Zur Entwicklung eines Prozessmodells, das eine Prozessoptimierung und -kontrolle ermöglichen soll, ist die Messung der lokalen Temperaturverteilung erforderlich.

Vorgehensweise

Die Interferenz-Durchlichtmikroskopie ermöglicht die ortsaufgelöste In-situ-Bestimmung der Temperaturverteilung über die Messung der wärmeinduzierten Brechungsindexänderung im Material.

Mittels eines Mach-Zehnder-Interferometers mit integriertem Mikroskop wird die laserinduzierte Änderung der optischen Weglänge über die Auslenkung der Interferenzstreifen bestimmt. Mit der Kenntnis der Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex lässt sich die Temperatur im Material berechnen.

Ergebnis

Das am Fraunhofer ILT entwickelte Interferenz-Durchlichtmikroskop ermöglicht erstmalig die Temperaturbestimmung während der Strukturierung mittels fokussierter Femtosekundenlaserstrahlung im Volumen von transparenten Materialien mit Prozesstemperaturen von 2000 bis 5000 K.

Anwendungsfelder

Neben der Prozessanalytik für die Strukturierung im Volumen von transparenten Materialien bietet die Interferenz-Durchlichtmikroskopie die Möglichkeit zur In-situ-Analytik von Prozessgasströmungen bei der Lasermaterialbearbeitung.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Martin Hermans
Telefon +49 241 8906-471
martin.hermans@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Dagmar Schaefer
Telefon +49 241 8906-628
dagmar.schaefer@ilt.fraunhofer.de

- 2 Aus interferometrischer Aufnahme berechnete Phasenkarte während der Modifikation im Innern von Borofloat 33.
3 Interferometer.

VERMESSUNG DER PARTIKELDICHTEVERTEILUNG VON PULVERDÜSEN

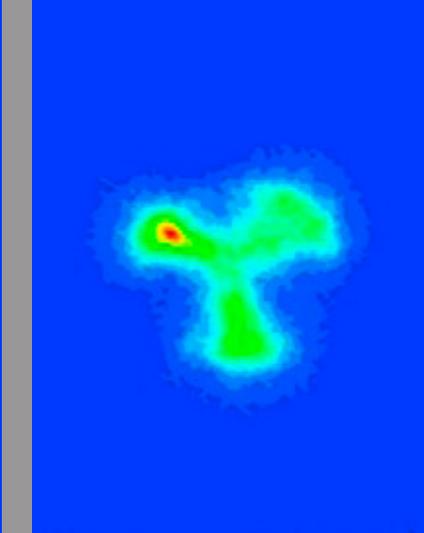
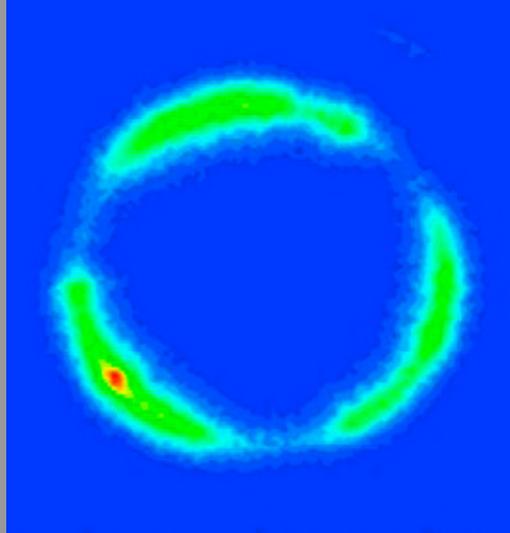
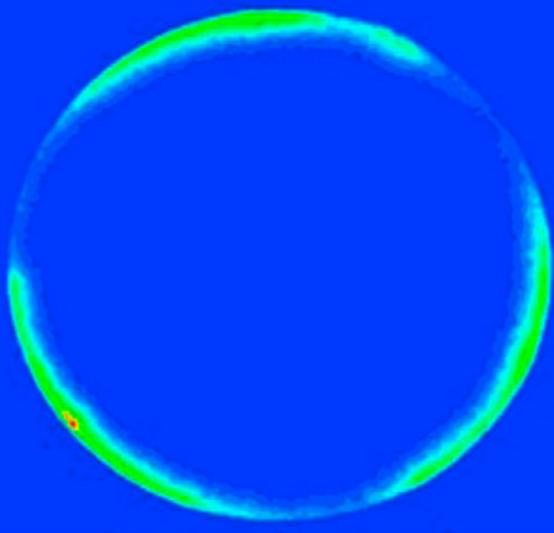
Aufgabenstellung

Beim Laserstrahlauftragschweißen kommt der Pulverzufuhr in das Schmelzbad eine entscheidende Bedeutung zu. Der Pulvernutzungsgrad, die Oxidation durch die umgebende Atmosphäre und die Rauheit der Schicht werden dadurch maßgeblich bestimmt. Daher besteht die Notwendigkeit, den Pulvergasstrahl zur Sicherstellung der Prozessqualität zu charakterisieren. Für die 3-D-Vermessung des Pulvergasstrahls steht zurzeit kein Verfahren zur Verfügung.

Vorgehensweise

Wichtige, zu überwachende Größen des Pulvergasstrahls stellen die Konstanz des Pulvermassenstroms, die Symmetrie des Pulvergasstrahls sowie die Lage und Größe des Pulverfokus dar. Um die geforderten Größen messtechnisch erfassen zu können, wird der Pulvergasstrahl mit einer Laserlinie von der Seite 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. Aus diesen Filmen lässt sich mit entsprechenden Algorithmen die Partikeldichteverteilung errechnen. Durch das Übereinanderlegen einzelner Schichten kann eine räumliche Partikeldichteverteilung des Pulvergasstrahls berechnet werden.

Partikeldichteverteilung verschiedener Ebenen eines Pulvergasstrahls.



Ergebnis

Das Messprinzip konnte an unterschiedlichen Pulverdüsen erfolgreich getestet werden. Ein Prüfstand zur automatisierten Pulvergasstrahlvermessung steht zur Verfügung, um die Kalibrierung einzelner Pulverdüsen und deren Partikeldichteverteilung zu dokumentieren. Das Messverfahren eröffnet erstmalig die Möglichkeit, einen Pulvergasstrahl vollständig zu charakterisieren.

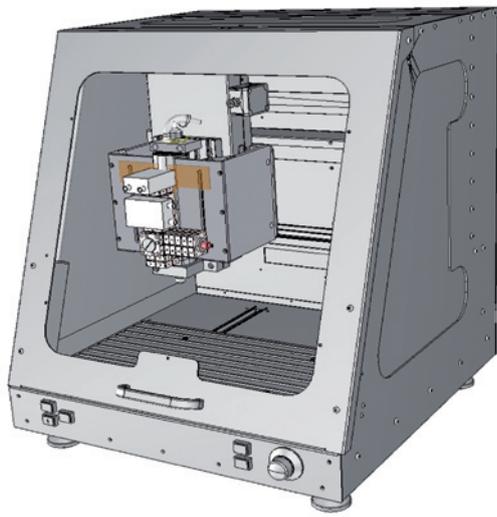
Anwendungsfelder

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. Das Verfahren kann aber auch bei allen Anwendungen eingesetzt werden, bei denen die räumliche Partikeldichteverteilung oder die Partikelrate gemessen werden soll. Hierbei spielt es keine Rolle, ob sich die Partikel im festen oder flüssigen Zustand befinden.

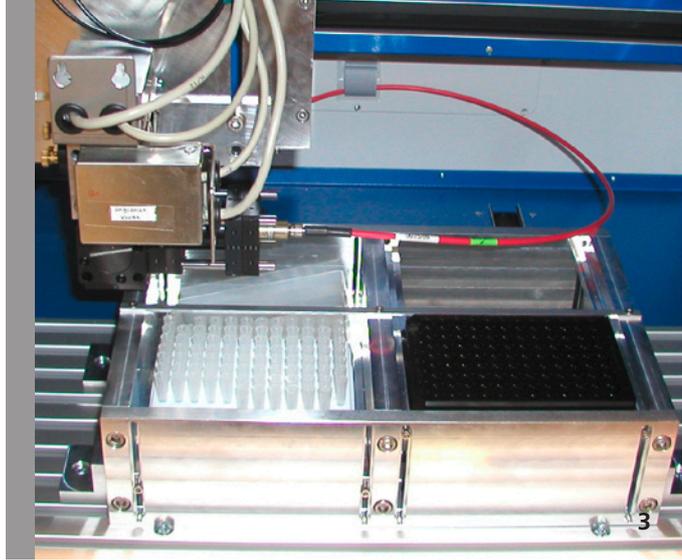
Ansprechpartner

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



2



3

TOXINANALYTIK MIT FLUORESZENZPOLARISATION

Aufgabenstellung

Getreideprodukte können mit Schimmelpilzgiften (Mykotoxinen) verunreinigt sein, daher müssen sie während der Lagerung und Verarbeitung kontinuierlich überwacht werden. Die Fluoreszenzpolarisation ist ein antikörperbasiertes analytisches Verfahren, mit dem verschiedene Toxine hochspezifisch und sensitiv nachgewiesen werden können. Zusammen mit Partnern aus Industrie und Forschung wird am Fraunhofer ILT an der Weiterentwicklung dieses Verfahrens für eine Multitoxinanalytik gearbeitet.

Vorgehensweise

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Demonstrators für eine quantitative und hochempfindliche Mykotoxinanalytik, der in Mühlen- und Silobetrieben auch außerhalb einer Laborumgebung eingesetzt werden kann. Die Analysen sollen in Mikrotiterplatten durchgeführt werden. Um Fehlbedienungen durch ungelernetes Personal auszuschließen, soll eine weitgehende Automatisierung von Probenpräparation und Messung erreicht werden.

Ergebnis

Am Fraunhofer ILT wurde gemeinsam mit Verbundpartnern aus Industrie und Wissenschaft ein Demonstrator für eine automatisierte Multitoxinanalytik aufgebaut. Sowohl die Probenpräparation als auch die Messung der Fluoreszenzpolarisation können automatisch erfolgen. In einer Mikrotiterplatte werden biochemische Assay-Komponenten sowie ein aus dem Getreide gewonnener Extrakt vorgelegt; eine softwaregesteuerte Pipette appliziert mit hoher Genauigkeit die für die Analyse benötigten Mengen. Die optische Messung erfolgt anschließend.

Anwendungsfelder

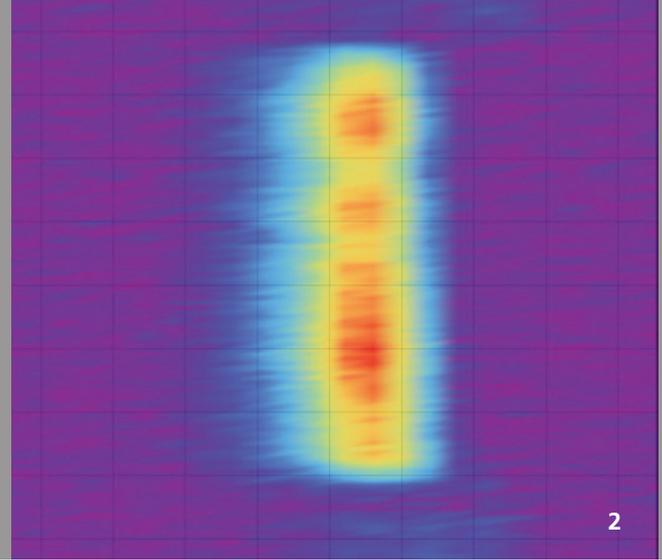
Vorrangiges Einsatzgebiet ist die Lebensmittelanalytik, insbesondere die Mykotoxinanalytik für Getreideprodukte. Weitere verwandte Anwendungsfelder liegen im Bereich von ölhaltigen Samen und Nüssen (Pistazien, Mandeln, Erdnüsse, Paranüsse etc.), in denen ebenfalls häufig Schimmelpilzgifte vorkommen. Prinzipiell lässt sich mit dem entwickelten Demonstrator jeder Analyt, gegen den ein spezifisch bindender Antikörper verfügbar ist, nachweisen.

Ansprechpartner

Christoph Janzen
 Telefon +49 241 8906-124
 christoph.janzen@ilt.fraunhofer.de

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

- 2 Konstruktionszeichnung des Demonstrators für die Mykotoxinanalytik.
 3 Detailansicht der Analyseeinheit, über einer Mikrotiterplatte positioniert.



NAHFELDMIKROSKOPIE: INFRAROTSPEKTROSKOPIE MIT SUB-MIKROMETER- ORTSAUFLÖSUNG

Aufgabenstellung

Nanostrukturen und Nanokompositmaterialien werden in zunehmendem Maße zur Verbesserung von Materialeigenschaften eingesetzt. Um diese Stoffe charakterisieren zu können, sind Messverfahren mit hoher Ortsauflösung erforderlich. Die Nahfeldmikroskopie bietet die Möglichkeit, Infrarotspektren mit einer Ortsauflösung von wenigen 10 nm aufzunehmen. Messungen im Fingerprint-Bereich (mittleres Infrarot) erlauben eine chemische Charakterisierung unterschiedlicher Probenysteme sowie die Unterscheidung von Kristallstrukturen. Beispiele sind die Untersuchung von Nano-Rissen und Verspannungen in Kristallen.

Vorgehensweise

Für die Aufnahme der hochortsaufgelösten Spektren wird ein Streulicht-Nahfeldmikroskop (SNOM) verwendet. Es kann sowohl mit schmalbandigen Lasern bei jeweils festen Wellenlängen verwendet werden als auch mit breitbandigen Lasern. Die Messungen sind zerstörungsfrei. Für die sequenzielle Spektroskopie steht ein zwischen 9,2 μm und 10,8 μm abstimmbarer CO₂-Laser zur Verfügung. Er wird insbesondere für die Aufnahme von Übersichtsbildern bei einer festen

Wellenlänge verwendet. Für die Breitband-Nahfeldmikroskopie wurde am Fraunhofer ILT ein breitbandig abstimmbares Lasersystem entwickelt, das einen Spektralbereich von etwa 8,9 μm bis 13,8 μm umfasst. Mit diesem Breitbandlaser können Spektren mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 20 nm aufgenommen werden. Aufgrund des größeren Wellenlängenbereichs sind darüber hinaus weitere Materialien bestimmbar.

Ergebnis

Mit dem Breitband-Nahfeldmikroskop wurden erste Messungen an polaren Kristallen durchgeführt. Die Spektren zeigen deutlich die für das Material charakteristischen Bande. Die einzelnen Probenbereiche sind deutlich unterscheidbar.

Anwendungsfelder

Zu den Anwendungsfeldern der Breitband-Nahfeldmikroskopie gehören die Charakterisierung von Nanokompositmaterialien, wie z. B. Textilfasern, und Halbleiterstrukturen sowie deren Dotierung. Die Detektion nanoskopischer Einschlüsse ist ebenfalls möglich.

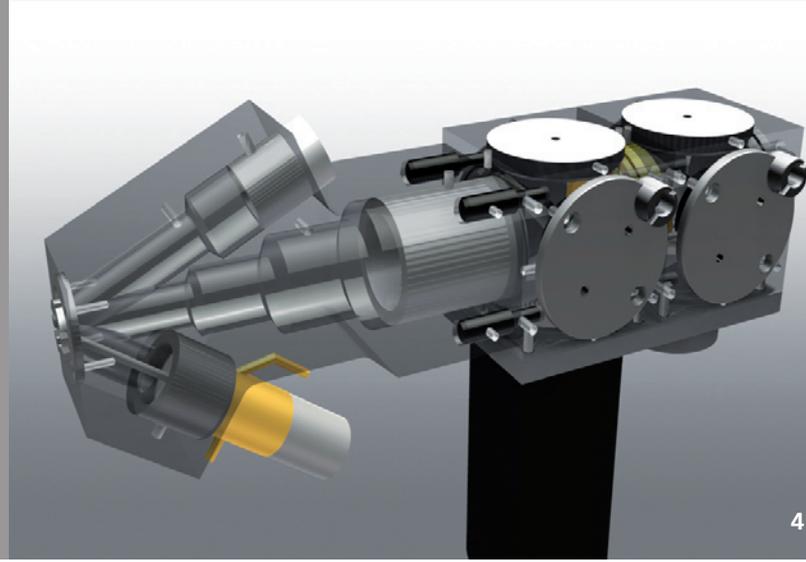
Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Stefanie Bensmann
Telefon +49 241 8906-489
stefanie.bensmann@ilt.fraunhofer.de

Dr. Christoph Janzen
Telefon +49 241 8906-124
christoph.janzen@ilt.fraunhofer.de

1 SNOM-Messung einer Silikatstruktur.

2 Linienscan über eine Gold-Siliziumkarbid-Gold-Struktur.



MOBILE MIKROWELLENVERSTÄRKT LASER-EMISSIONS-SPEKTROSKOPIE

Aufgabenstellung

Aufgrund der Verknappung metallischer und energetischer Ressourcen kommt dem werkstofflichen Recycling von Metallen eine steigende Bedeutung zu. Hohe Ansprüche an Qualität und Reinheit machen eine direkte Wareneingangs- sowie -ausgangskontrolle unerlässlich. Aktuelle mobile Systeme können nicht alle Elemente und Probenarten abdecken und benötigen eine aufwendige Probenvorbereitung. Analysensysteme basierend auf der Laser-Emissionsspektroskopie (engl. LIBS) mit ausreichender Präzision erfordern bislang noch ein großes Bauvolumen und sind zu schwer für den mobilen Einsatz. Ziel des aktuellen Vorhabens ist eine Kombination von Laser- und Mikrowellenanregung zur Verringerung der Laserstrahlleistung bei Steigerung der analytischen Leistungsfähigkeit zur Realisierung eines mobilen Analysegeräts für Aluminium- und hochlegierte Stahlproben.

Vorgehensweise

In einem kompakten Messkopf wird das laserinduzierte Plasma eines Faserlasers mit einem mikrowellenangeregten Argonplasma räumlich überlagert. Dieses Argonplasma wird mit einem hohlen Innenleiter erzeugt. Gegenüber der herkömmlichen Mikrowellenanregung kann ein leichter und kompakter Aufbau realisiert werden. Die Überlagerung verstärkt das Plasma, sodass Dauer und Intensität der spektralen Linienemission erhöht werden.

Ergebnis

Ein erster Prototyp der handgeführten Sonde wurde aufgebaut und auf seine Eignung getestet. Dafür wurden in Vorversuchen geometrische Einflussgrößen charakterisiert. Für die Mikrowellenerzeugung wurden zwei Verfahren erprobt und die Analysefähigkeit mit bereits am Markt befindlichen konventionellen Verfahren verglichen. Im Vergleich zu reiner Laseranregung konnte eine Erhöhung der Linienintensität sowie eine Verlängerung der Emissionsdauer beobachtet werden.

Anwendungsfelder

Das Verfahren ermöglicht die chemische Analyse metallischer Messobjekte. Durch die kleine Wechselwirkungsfläche sowie die Handführung kann nahezu jedes Teil selbst großer, zusammengesetzter Objekte untersucht werden. Dies macht das Verfahren interessant für die Charakterisierung von z. B. Teilen ausrangierter Flugzeuge oder Großanlagen.

Ansprechpartner

M. Sc. Michael Scharun
Telefon +49 241 8906-196
michael.scharun@ilt.fraunhofer.de

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

3 Zu sortierendes Aluminium-Sekundärmaterial.

4 3-D-CAD-Modell des Handmesskopfs.

Änderungen bei Spezifikationen und anderen technischen Angaben bleiben vorbehalten. 03/2012.



KOMPAKTE QUELLE FÜR EXTREM ULTRAVIOLETTE STRAHLUNG

Aufgabenstellung

Neuartige entladungsbasierte Strahlungsquellen stellen eine kompakte und kostengünstige Lösung für künftige Anwendungen mit extrem ultravioletter Strahlung (XUV) dar. Diese eröffnen vielfältige innovative Anwendungsmöglichkeiten in Materialanalytik, Messtechnik, Lebenswissenschaften und Mikroskopie. Insbesondere für die Chipherstellung der nächsten Generation gibt es einen Bedarf an Quellen für die Messtechnik, die bei der Einsatzwellenlänge von 13,5 nm emittieren. So erfordert beispielsweise die Inspektion von Masken hochbrillante Quellen mit einer Emission um $30 \text{ W}/(\text{mm}^2 \text{ sr})$ in einer spektralen Bandbreite von 2 Prozent um die Zentralwellenlänge. Solche Quellen sind derzeit am Markt nicht verfügbar.

Vorgehensweise

Auf der technologischen Basis der in der Vergangenheit in Kooperation mit Philips EUV entwickelten Technologie für eine Entladungsquelle wurde eine neue Strahlquelle aufgebaut, die insbesondere hinsichtlich der erreichbaren Brillanz Verbesserungen aufweist. Das Prinzip beruht auf einer Entladung elektrisch gespeicherter Energie, bei der mit einem hohen gepulsten Strom Xenon so weit aufgeheizt und verdichtet wird, dass es charakteristische Strahlung bei 13,5 nm emittiert.

Ergebnis

In ersten Versuchen konnte eine Brillanz von $20 \text{ W}/(\text{mm}^2 \text{ sr})$ in einer Bandbreite von 2 Prozent bei der Zentralwellenlänge von 13,5 nm nachgewiesen werden. Damit wird eine um mehr als einen Faktor zwei höhere Brillanz im Vergleich zu am Markt verfügbaren Quellen erzielt. Weitere Experimente belegen das Potenzial, mehr als $50 \text{ W}/(\text{mm}^2 \text{ sr})$ mit dieser Technologie zu erreichen.

Anwendungsfelder

Neben dem Einsatz in der Metrologie im Umfeld der extremen Ultraviolett-Lithographie sind als weitere Anwendungsfelder zu nennen:

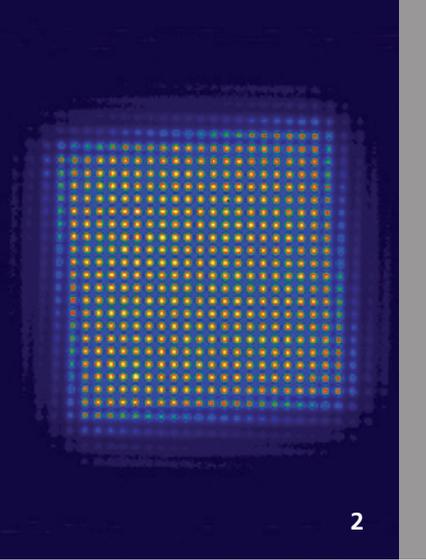
- Mikroskopie mit weicher Röntgenstrahlung
- Maskeninspektion für die EUV-Lithographie
- Technologieentwicklung im EUVL-Umfeld, z. B. Resistentwicklung, Charakterisierung von Optiken
- XUV-basierte Metrologie für die Nanowissenschaften

Ansprechpartner

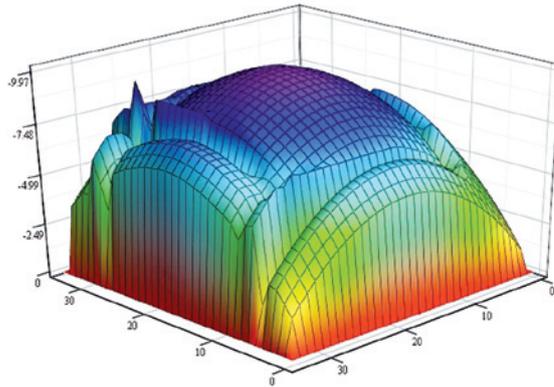
Dr. Markus Benk
 Telefon +49 241 8906-302
 markus.benk@ilt.fraunhofer.de

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

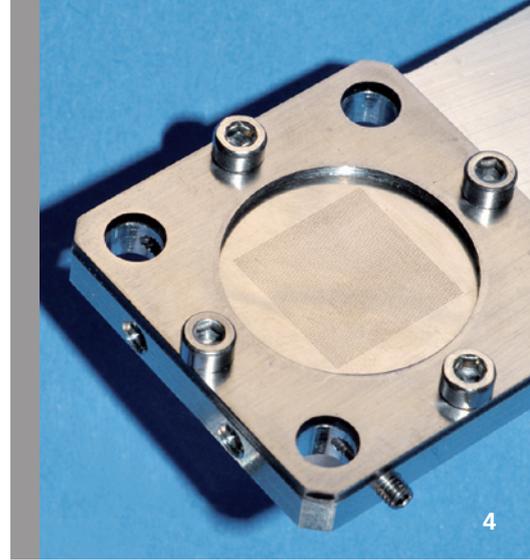
1 Strahlungsquelle für extrem ultraviolettes Licht.



2



3



4

EUV-HARTMANN- WELLENFRONTSENSOR

Aufgabenstellung

Das Vermessen von Wellenfrontprofilen im kurzwelligen Spektralbereich bietet eine einzigartige Möglichkeit, simultan flächig die Amplituden- und Phasenverteilung einer einfallenden oder reflektierten Wellenfront aufzunehmen. Dies ermöglicht ein breites Anwendungsspektrum wie die Charakterisierung von Strahlungsquellen im kurzwelligen Spektralbereich oder die Qualitätskontrolle von auf Mehrschichtsystemen basierenden Masken und Spiegeln hinsichtlich deren Ebenheit. Das Ziel dieser Arbeit war es, einen Vergleich der Wellenfronten von laserproduzierten Plasmaquellen (LPP) und Entladungsplasmaquellen (DPP) herzustellen.

Vorgehensweise

Im Vergleich zu interferometrischen Verfahren benötigt ein Hartmann-Wellenfrontsensor (HWS) keine kohärente Strahlung. Beim HWS sind außerdem keine scannenden Komponenten nötig und er ist preisgünstiger und einfacher aufzubauen. Dennoch erreicht ein HWS eine hohe Sensitivität und Auflösung.

Bei einem HWS wird die einfallende Strahlung durch ein spezielles Maskenarray mit Löchern in eine bestimmte Anzahl von Strahlen aufgeteilt, die dann auf dem Detektor abgebildet werden. Trifft nun eine unbekannte Wellenfront auf das Array, so verschieben sich die Bilder der Löcher auf dem Detektor abhängig von der Phasenfront der einfallenden unbekanntes Wellenfront. Aus dem Versatz der Lichtpunkte auf dem Detektor kann die Phasenfront zurückgerechnet werden.

Ergebnis

Im HWS wird eine Charge-Coupled-Device-Kamera verwendet sowie ein Array, das aus 65 mal 65 Löchern (Durchmesser 80 μm , Abstand 225 μm) besteht. Die diskretisierten Einzelstrahlen bei der Vermessung der LPP-Quelle zeigen im Vergleich zur DPP-Quelle eine Verbreiterung in einer Achse in der Bildebene. Außerdem ist deren Amplitudenverteilung verrauschter und inhomogener. Der Sensor kann Wellenfrontabweichungen im Bereich zwischen dem fünften Teil der verwendeten Wellenlänge und ca. 7,5 μm detektieren.

Anwendungsfelder

Der HWS kann zur Charakterisierung und Justage von optischen Komponenten oder Systemen im kurzwelligen Spektralbereich verwendet werden. Bei der Charakterisierung liegt der Fokus auf der Oberflächengenauigkeit hinsichtlich Form und Rauigkeit und kann in der Qualitätskontrolle eingesetzt werden.

Ansprechpartner

M. Sc. Aleksey Maryasov
Telefon +49 241 8906-644
aleksey.maryasov@ilt.fraunhofer.de

Dr. Serhiy Danylyuk
Telefon +49 241 8906-313
serhiy.danylyuk@ilt.fraunhofer.de

- 2 Hartmann-Intensitätsverteilung.
- 3 Rekonstruierte Phasenfront.
- 4 Hartmann-Array, hergestellt durch Laserschneidverfahren.

PATENTE

Patenterteilungen Deutschland

60 2005 028 164,9
Verfahren und Vorrichtung für den Betrieb einer elektrischen Entladungsvorrichtung

DE 10 2005 023 060 B4
Gasentladungsquelle, insbesondere für EUV-Strahlung

DE 10 2006 008 776 B4
Verfahren zum Fügen von wenigstens zwei aus thermoplastischem Material bestehenden Fügepartnern mittels Laserstrahlung

50 2008 004 868,5
Gütegeschalteter Laser mit Seed und aktiver Frequenzstabilisierung

DE 10 2008 030 529 B4
Verfahren und Anordnung zur nichtlinearen Frequenzkonversion von Laserstrahlung

Patenterteilungen USA

US 7,989,730 B2
Verfahren und Vorrichtung zur Vermessung der lateralen Relativbewegung zwischen Bearbeitungskopf und Werkstück bei der Bearbeitung mit einem Bearbeitungsstrahl

Patenterteilungen Europa

EP 1 907 163 B1
Vorrichtung zum Bohren und für den Materialabtrag mittels Laserstrahl

EP 2 109 921 B1
Gütegeschalteter Laser mit Seed und aktiver Frequenzstabilisierung

EP 2 223 574 B1
Gasentladungsquelle, insbesondere für EUV-Strahlung

Patentanmeldungen National

10 2011 009 345.1-52
Verfahren und Vorrichtung zur Erfassung einer Partikeldichteverteilung im Strahl einer Düse

10 2011 008 225.5-51
Optischer Resonator mit direktem geometrischem Zugang auf der optischen Achse

10 2011 013 514,6
Verfahren zur Herstellung optischer Komponenten durch Bearbeitung mit energetischer Strahlung

10 2011 103 793,8
Verfahren zur Fertigung optischer Elemente durch Bearbeitung mit energetischer Strahlung

10 2011 117 227,4
Optisches Strahlungselement zur selektiven Strahlformung

10 2011 105 045,4
Verfahren zur Herstellung eines Bauteils mittels selektivem Laserschmelzen

10 2011 012 592.2-44
Verfahren und Vorrichtung zum automatischen Identifizieren, Abtrennen, Vereinzeln

und Sortieren von Komponenten elektronischer Baugruppen und Geräte

10 2011 111 998,5
Laserunterstütztes Verfahren zur Erzeugung einer reflexionsvermindernden Struktur auf Oberflächen

10 2011 100 456,8
EHLA Extremes Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen

10 2011 113 497,6
Vorrichtung zur Laserbearbeitung mit einer speziell ausgestalteten Prozesskammer

10 2011 107 416,7
Verfahren zum Glätten und Polieren von Oberflächen mittels überlagerter energetischer Strahlung

10 2011 113 807,6
Verfahren zur Herstellung einer funktionalen Schicht durch nasschemische Beschichtung

10 2011 118 540,6
Verfahren und Vorrichtung zum Abtrag und Trennen von Feststoffen mit Laserstrahlung

DISSERTATIONEN

Patentanmeldungen International

PCT/EP2011/100376

Verfahren zum formgebenden Umschmelzen von Werkstücken

11 006 474,8

Method and device for generating optical radiation by means of electrically operated pulsed discharges

PCT/EP2011/002821

Vorrichtung und Verfahren zum prozessgasbegleiteten Bearbeiten von Werkstücken mit energetischer Strahlung

PCT/EP2011/993467

Method of improving the operation efficiency of a EUV plasma discharge lamp

PCT/EP2011/00285

Verfahren zum Bestimmen des Schneidergebnisses eines Laserschneidprozesses

PCT/EP2011/001875

Verfahren zur Modeneinflussung von optischer Strahlung in einem Medium

11 162 049,8

Stable and switchable beam-profiles for VCSEL arrays

61,529,442

Laserunterstütztes Verfahren zur Erzeugung einer reflexionsvermindernden Struktur auf Oberflächen

Dissertationen

09.02.2011 - Benk, Markus

Pinchplasma für die Mikroskopie mit weicher Röntgenstrahlung

11.02.2011 - Pfeiffer, Stefan

Hybrides Prozessmodell für das Tiefschweißen mit Laserstrahlung

08.04.2011 - Gedicke, Jens

Robuste Prozessführung beim Laserstrahl-Mikroschweißen mit hochbrillianten Strahlquellen

03.05.2011 - Banyay, Matus

Surface and Thin Film Analysis by Spectroscopic Reflectometry with Extreme Ultraviolet Laboratory Sources

17.05.2011 - Sari, Fahri

Mikrostrukturelle Charakterisierung des Laserstrahl-Transmissionsbündels von Silizium/Glas und Silizium/Silizium

11.07.2011 -

Schleifenbaum, Henrich

High Power Selective Laser Melting (HP SLM)
Ein Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für die individualisierte Produktion

07.10.2011 - Dolkemeyer, Jan
Aufbau- und Löttechniken für die Montage von Festkörperlaseren

08.11.2011 - Ostholt, Roman

Laserpolieren metallischer Freiformflächen

23.11.2011 - Vrenegor, Jens

Abtrag und Analyse verzunderter Strahlproben mit Laserstrahlung

23.11.2011 -

Beckmann, Dennis

Spannungsinduzierte Volumenwellenreiter in Kristallen mittels Femtosekunden-Laserstrahlung

21.12.2011 - Loehring, Jens

Laserstrahlquellen auf Basis eines neuartigen Neodym-dotierten Mischgranats für Wasserdampf-DIAL-Systeme bei 935 nm

22.12.2011 -

Funck, Max Christian

Design and Analysis of Combinatorially Assembled Optical Systems

DIPLOMARBEITEN

Antonopoulos, Georgios

Effiziente Parameterfindung für das Laserpolieren von Freiformflächen

Bette, Sebastian

Entwicklung eines optischen Systems für die simultane Detektion verschiedener Biomarker in Mikrofluidiken

Bröring, Wiebke

Mikrostrukturierung von Glasfaserrohlingen

Faley, Olga

Deposition von Graphen mit fs-Laserstrahlung

Fiotakis, Pantazis

Entstehung und Verkleinerung der Rauheit von SLM-Bauteilen aus AISi10Mg

Fricke, Friedrich

Vergrößerung der Aufbaurate beim Selective Laser Melting von Werkzeugstahl x38CrMoV5-l

Gebhardt, Philipp

Minimierung des Verzugs bei der lokalen Laserstrahl-Wärmebehandlung von pressgehärteten B-Säulen aus hochfestem Stahl

Geller, Boris

3D-Druck von Biomaterialien mittels Laser-Induced-Forward-Transfer (LIFT)

Hauck, Johannes

Charakterisierung eines Mikrokanalplattendetektors für extrem ultraviolette Strahlung mit sub-ns Zeitauflösung

Hulverscheid, Conny

Nanostrukturierung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

Havermann, Dirk

Analyse des Laserschweißprozesses mit örtlicher Leistungsmodulation

Heinen, Paul

Laserstrahl-Mikroschweißen von Kupferbauteilen mit brillanten Strahlquellen

Katzy, Veronika

Verstärkung von ps-Laserpulsen niedriger Repetitionsrate

Kiemann, Ferdi

Entwicklung und Bewertung eines Maschinenkonzepts für die generative Serienfertigung mittels High Power Selective Laser Melting (HP SLM)

Merz, Michael

Messmittelfähigkeitsanalyse - Qualifizierung eines Positions- und Geschwindigkeitsmesssystems in der Lasermaterialbearbeitung

Möller, Martin

Modulare Konstruktion einer Optikfassung mit definierter Zentrierung

Nippgen, Sebastian

Modelltheoretische Untersuchungen wellenfrontangepasster und apodisierter holographischer Gitter zur spektralen Stabilisierung und Überlagerung von Diodenlaserstrahlung

Pi, Xi

Verarbeitung des Warmarbeitsstahls 1.2365 mit nano-partikulären Zusätzen durch Laserstrahl-Auftragsschweißen

Popel, Sebastian

Hochgeschwindigkeits-Videoanalyse des Laserhybridschweißens von Schiffbaustählen mit einem 10 kW Scheibenlaser

Riedel, Johannes

Auslegung und Inbetriebnahme eines table-top Moduls zur Multiphotonenpolymerisation

Risse, Jeroen

Machbarkeitsstudie zum Hochtemperatur-SLM von MAR-M-247

Schiffer, Anna

Untersuchung der laserinduzierten Linse durch Modifikation von Glas mit fs-Laserstrahlung

Schrage, Johannes

Endkonturnahe Herstellung einer Blade Integrated Disk (BLISK) durch Laserstrahl-Auftragsschweißen

Tiesmeyer, Stefan

Anwendung wellenoptischer Strahlungspropagationsmethoden bei Laserfertigungsverfahren

Weirauch, Fabian

Untersuchung der Prozessgrenzen beim Schweißen von transparenten und optischen Kunststoffen mit Laserstrahlung bei einer Wellenlänge von $\lambda = 2 \mu\text{m}$

BACHELORARBEITEN

Bongard, Yvonne

Funktionalisierung von Poly- ϵ -Caprolactone mit UV-Laserstrahlung und Einfluss auf das Zellwachstum

Bonhoff, Tobias

Experimentelle Untersuchungen zur laserbasierten Herstellung von Volumenbeugungsgittern mittels Zweistrahlinterferenz

Brosda, Maximilian

Integration einer Temperaturregelung mittels Pyrometrie beim Laserpolieren von Quarzglas

Bui, Duc Anh

Flexible lokale Laserstrahl-Wärmebehandlung mit einer Zoomoptik

Dörpinghaus, Tobias

Konstruktion einer Schutzgasabschirmung für das Laserstrahl-Auftragsschweißen

Göller, Nicole

Entwicklung von Scanstrategien zum Glasabtrag mit CO₂-Laserstrahlung

Gottowik, Jacqueline

Auswerteprogramm für Daten der Laser-Emissionsspektroskopie

Hannusch, Lisa

Physikalisch-chemische Charakterisierung des Proteins BSA nach der Behandlung durch Laserstrahlung

Hoche, Burkhard

Intelligente Fugenfolge für das Laserstrahlschweißen

Kalupka, Christian

Analyse von Wellenleitern mittels fs-Laserdoppelpulsen in Gläsern

Kirch, Manuel

Grundlegende Untersuchungen des Inversen Glasbohrprozesses

Kirfel, Sebastian

Experimentelle Untersuchungen zum Polieren von Aluminiumwerkstoffen mit gepulster Laserstrahlung

Koch, Dennis

Generative Fertigung von Bauteilen aus Kupfer mit SLM

Ludwig, Fabian

Konstruktion eines Lötwerkzeugs zum Widerstandslöten optischer Komponenten

Mertens, Andreas

Untersuchungen zur Laser-induzierten Freisetzung biologisch aktiver Verbindungen

Muhsin, Dzhoshkun

Verfahrensanalyse zum Einstechvorgang für das scannerbasierte Schneiden von Dünnschichten mit Laserstrahlung

Nolte, Frank

Experimentelle Ermittlung von Verfahrensparametern zum Laserpolieren von Linsen aus BK7

Peychal-Heiling, Adriane

Design eines optischen Systems unter Anwendung von Tolerance Matching

Rehra, Jan

Untersuchung der Temperaturverteilung in SLM Bauteilen bei Verwendung einer Vorwärmtemperatur

Roderburg, Ralf

Integration aktiver Komponenten in optische Systeme am Beispiel des Systemverhaltens eines elektrooptischen Zoomteleskops

Roth, Sebastian

Lokale Laserstrahl-Wärmebehandlung mit flexibler Strahlgeometrie für große Flächenraten

Sändker, Hendrik

Verfahrensuntersuchungen zum Feinstabtrag von Quarzglas mit Laserstrahlung

Smeets, Michael

Parameterstudie zur schädigungsarmen Laserablation der SiN-Schicht bei Solarzellen

Thielmann, Michael

Bestimmung der mechanischen Kennwerte von Aluminiumbauteilen beim SLM mit 1 kW Laserleistung

Wahab, Hud

Experimentelle Untersuchung der Abtrageeffizienz von biologischem Hartgewebe mit ps-Lasern

Wasselowski, Johannes

Entwicklung einer Schnittstellensoftware zur Simulation thermo-optischer Effekte

Weber, Robert

Laserpolieren von titanbasierten Legierungen

MASTERARBEITEN

Alkhoury, Samer

Temperature Control of Laser
Tissue Soldering

Büsing, Lasse

Laserbasierte Herstellung
und Analyse von Verschleiß-
schutzschichten auf Basis
nanopartikulärer Werkstoffe

Knorr, Fabian

Überprüfung numerischer
Verfahren zur Modellierung
von Dreiwellen-Mischpro-
zessen von Ultrakurzpuls-
Laserstrahlung

Liebeck, Bernd

Erzeugung metallischer
Schichten auf Basis von
Dispersionen mittels
kontaktloser Druck- und
Laserverfahren

Sun, Zhen

Laserstrahlschweißen
höchstfester Chromstähle mit
martensitischem Gefüge

**Tharmakulasingam,
Sadagopan**

Laserauftragschweißen poren-
und rissfreier Schichten aus
der Eisenbasislegierung
CPM420V auf dem Werkstoff
1.6722

WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN

Bäuerle, A., Schnitzler, C., Wester, R., Kirsten, M., Schlüter, H., Tewes, M., Laschefski, H., Loosen, P.: Optical system design for a reflector-based LED food lighting module. *Proc. SPIE 8123, 812306 (7 S.), 2011*

Beckemper, S., Huang, J., Gillner, A., Wang, K.: Generation of periodic micro- and nano-structures by parameter-controlled three-beam laser interference technique. *J. Laser Micro/Nanoeng. 6, Nr. 1, 49-53, 2011*

Beckmann, D., Esser, D., Gottmann, J.: Characterization of channel waveguides in Pr:YLiF₄ crystals fabricated by direct femtosecond laser writing. *Appl. Phys. B – Lasers Optics, Online first (6 S.), DOI: 10.1007/s00340-011-4406-6, 2011*

Beckmann, D., Schnitzler, D., Schaefer, D., Gottmann, J., Kelbassa, I.: Beam shaping of laser diode radiation by waveguides with arbitrary cladding geometry written with fs-laser radiation. *Opt. Expr. 19, Nr. 25, 25418-25425, 2011*

Binetruy, C., Clement, S., Deleglise, M., Franz, C., Knapp, W., Oumarou, M., Renard, J., Roesner, A.: Glue-free assembly of glass fiber reinforced thermoplastics using laser light. *Proc. SPIE 8065, 80650U (7 S.), 2011*

Bobzin, K., Bagcivan, N., Gillner, A., Hartmann, C., Holtkamp, J., Michaeli, W., Klaiber, F., Schöngart, M., TheiB, S.: Injection molding of products with functional surfaces by micro-structured, PVD coated injection molds. *Prod. Eng. 5, Nr. 4, 415-422, 2011*

Bobzin, K., Bagcivan, N., TheiB, S., Hartmann, C., Holtkamp, J., Gillner, A., Michaeli, W., Hopmann, C., Eilbracht, S., Schöngart, M., Scharf, M.: Manufacturing of micro-structured parts for mass production purposes. *Proc. of the Int. Symp. on Assembly and Manufacturing ISAM 2011, 25.5.-27.5. 2011, Tampere, Finland. 8 S. ISBN 978-1-61284-343-8 (digital)*

Bobzin, K., Bagcivan, N., Ewering, M., Gillner, A., Beckemper, S., Hartmann, C., TheiB, S.: Nano structured physical vapor deposited coatings by means of picosecond laser radiation. *J. Nanosci. Nano-technol. 11, 1-7, 2011*

- Bobzin, K., Bührig-Polaczek, A., Michaeli, W., Poprawe, R., Bagcivan, N., Beckemper, S., Eilbracht, S., Gillner, A., Hartmann, C., Holtkamp, J., Ivanov, T., Klaiber, F., Scharf, M., Schöngart, M., Theiß, S.:** Verkürzung von Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen mit funktionalen Oberflächen mit Mikro- und Nanostrukturen. In: Brecher, C. (Hrsg.): *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. pp 672-734
- Brecher, C., Kampker, A., Klocke, F. [u.a.]:** Business and technology cases. In: Brecher, C. (Hrsg.): *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. pp. 1059-1156
- Bremen, S., Buchbinder, D., Meiners, W., Wissenbach, K.:** Mit Selective Laser Melting auf dem Weg zur Serienproduktion? *Laser Technik J*, Nr. 6, 24-28, 2011
- Bruneton, A., Bäuerle, A., Loosen, P., Wester, R.:** Freeform lens for an efficient wall washer. *Proc. SPIE 8167*, 816707 (9 S.), 2011
- Buchbinder, D., Meiners, W.:** Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion. Abschlussbericht AluGenerativ, Fkz.: 01RIO639A-D. Aachen: Fraunhofer Institut f. Lasertechnik 2011. 148 S.
- Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Mainers, W., Bültmann, J.:** High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of aluminium parts. *Phys. Proced.* 12, 271-278, 2011
- Buchbinder, D., Schilling, G., Meiners, W., Pirch, N., Wissenbach, K.:** Untersuchung zur Reduzierung des Verzugs durch Vorwärmung bei der Herstellung von Aluminiumbauteilen mittels SLM. *RT ejournal - Forum für Rapid Technologie* 8, 1-15, 2011
- Diatlov, A., Schleifenbaum, H., Meiners, W., Wissenbach, K., Bültmann, J.:** Towards surface topography: Quantification of Selective Laser Melting (SLM) built parts. In: *Innovative developments in virtual and physical prototyping*. Boca Raton: CRC Pr. 2011. pp .595-607. ISBN 978-0415684187
- Dong, C., Zhong, M., Huang, T., Ma, M., Wortmann, D., Brajdic, M., Kelbassa, I.:** Photodegradation of methyl orange under visible light by micro-nano hierarchical Cu₂O structure fabricated by hybrid laser processing and chemical dealloying. *Appl. Mater. Interfaces* 3, 4332-4338, 2011
- Engelhardt, S., Hu, Y., Seiler, N., Riester, D., Meyer, W., Krüger, H., Wehner, M., Bremus-Köbberling, E., Gillner, A.:** 3D-microfabrication of polymer-protein hybrid structures with a q-switched microlaser. *J. Laser Micro/Nanoeng.* 6, Nr.1, 54-58, 2011
- Engelhardt, S., Hoch, E., Borchers, K., Meyer, W., Krüger, H., Tovar, G. E. M., Gillner, A.:** Fabrication of 2D protein microstructures and 3D polymer-protein hybrid microstructures by two-photon polymerization. *Biofabrication* 3, 025003 (9 S.), 2011
- Esser, D., Rezaei, S., Li, J., Herman, P. R., Gottmann, J.:** Time dynamics of burst-train filamentation assisted femtosecond laser machining in glasses. *Opt. Expr.* 19, Nr. 25, 25632-25642, 2011
- Farahzadi, A., Lebert, R., Benk, M., Juschkin, L., Herbert, S., Maryasov, A.:** Contributions to EUV mask metrology infrastructure. *Proc. SPIE 7545*, 754505 (5 S.), 2011
- Flemmer, J., Pirch, N., Wissenbach, K., Gasser, A.:** Auftragen nach Ist-Daten. *Werkzeug & Formenbau* Nr. 5, 42-45, 2011
- Fletcher, J.:** 3D-Geometrien laserpolieren. *Maschine + Werkzeug* 9, 1-2, 2011
- Frank, S., Ungers, M., Rolser, R.:** Coaxial control of aluminium and steel laser brazing processes. *Phys. Proced.* 12, Part A, 752-760, 2011
- Franz, C., Abels, P., Rolsner, R., Becker, M.:** Energy input per unit length - high accuracy kinematic metrology in laser material processing. *Phys. Proced.* 12, Part B, 411-420, 2011

- Franz, C., Abels, P., Merz, M., Singpiel, H., Trein, J.:** Real-time process control by machine vision. ICALEO 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics, October 23-27, 2011. Paper 205 (6 S.), 2011
- Franz, C., Singpiel, H., Trein, J.:** Tracking the contour. Laser Technik J. 8, Nr. 5, 41-44, 2011
- Freiberger, R., Hauck, J., Reininghaus, M., Wortmann, D., Juschkin, L.:** Time resolved EUV pump-probe microscopy of fs-LASER induced nanostructure formation. Proc. SPIE 8076, 80760K (7 S.), 2011
- Fricke-Begemann, C., Noll, R., Monteith, A., Maddison, A., Dürr, M.:** Feasibility-study on laser-induced breakdown spectroscopy for pre-screening of environmental samples. Proc. 33rd ESARDA Annual Meeting, Budapest, 16. - 20. Mai 2011. 7 S., 2011
- Fricke-Begemann, C., Graf, N.:** Impiego del laser nel riciclaggio dei metalli. Applicazioni Laser Nov/Dic, 44-47, 2011
- Fricke-Begemann, C., Strauß, N., Noll, R.:** Laser-based methods for chemical composition analysis of particulate emissions from steelmaking processes. Proc. of the CETAS 2011, Luxembourg, 17. - 19. Mai 2011. OC19. pp. 131-138, 2011
- Fricke-Begemann, C., Graf, N.:** Lasereinsatz im Recycling. Optik & Photonik 6, Nr. 3, 47-50, 2011
- Funck, M. C., Loosen, P.:** Reducing asymmetric imaging errors through selective assembly and tolerance desensitization. Proc. SPIE 8131, 8 S., 2011
- Gatej, A., Thombansen, U., Loosen, P.:** Kombinierte thermo-optische Simulation für optische Systeme. DGaO-Proc. 112, 2 S., 2011
- Gatej, A., Pyschny, N., Morasch, V., Loosen, P., Brecher, C.:** Self-optimization of robot-based resistance soldering for the assembly of optical elements in solid-state laser systems. Conf. on Lasers and Electro-Optics, CLEO/Europe EQEC, Munich, May 22 - 26, 2011. 1 S.
- Gatej, A., Thombansen, U., Loosen, P.:** Simulation des thermischen Linseneffekts in hochbelasteten Lasersystemen. Photonik 5, 54-56, 2011
- Gatej, A., Dolkemeyer, J., Loosen, P.:** Stress analysis of extensively and partially soldered optical components. Optics Lasers Eng. 49, Nr. 7, 758-763, 2011
- Genov, S., Riester, D., Hirth, T., Tovar, G., Borchers, K., Weber, A.:** Preparation and characterisation of dry thin native protein trehalose films on titanium-coated cycloolefin polymer (COP) foil generated by spin-coating/drying process and applied for protein transfer by Laser-Induced-Forward-Transfer (LIFT). Chem. Eng. Process. 50, Nr. 5-6, 556-564, 2011
- Göttmann, A., Diettrich, J., Bergweiler, G., Bambach, M., Hirt, G., Loosen, P., Poprawe, R.:** Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts. Prod. Eng. 5, Nr. 3, 263-271, 2011
- Gu, DD., Hagedorn, Y. C., Meiners, W., Wissenbach, K., Poprawe, R.:** Selective Laser Melting of in-situ TiC/Ti5Si3 composites with novel reinforcement architecture and elevated performance. Surf. Coat. Technol. 205, Nr. 10, 3285-3292, 2011
- Hambach, N., Hartmann, C., Holtkamp, J., Gillner, A.:** Stability limits of laser drilled hole arrays on large areas. ICALEO. 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics, October 23-27, 2011. M50, pp. 895-899, 2011
- Hauck, J., Freiberger, R., Juschkin, L.:** Performance benchmark of a gateable microchannel plate detector for extreme ultraviolet radiation with high temporal resolution. Proc. SPIE 8076, 80760R (7 S.), 2011
- Hawelka, D., Stollenwerk, J., Pirch, N., Büsing, L., Wissenbach, K.:** Laser based inline production of wear protection coating on temperature sensitive substrates. Phys. Proced. 12, Part A, 490-498, 2011
- Heidrich, S., Willenborg, E., Richmann, A.:** Development of a laser based process chain for manufacturing freeform optics. Phys. Proced. 12, 519-528, 2011

- Heinemann, S., Lewis, B., Regaard, B., Schmidt, T.:** Single emitter based diode lasers with high brightness, high power and narrow linewidth. *Proc. SPIE 7918, 79180M (6 S.), 2011*
- Hengesbach, S., Witte, U., Traub, M., Hoffmann, D.:** Simulation and analysis of volume holographic gratings integrated in collimation optics for wavelength stabilization. *Proc. SPIE 7918, 79180A (13 S.), 2011*
- Hoerstmann-Jungemann, M., Dobrzanski, D., Schaefer, D., Kelbassa, I.:** Functionalization of sapphire surfaces using fs-laser radiation and selective etching. *ICALEO. 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics, October 23-27, 2011. M 1203. pp. 1105-1110, 2011*
- Holtkamp, J., Hartmann, C., Gillner, A., Beckemper, S., Dohrn, A., Eifel, S.:** Mikrostrukturieren mit Zukunft. *Laser Technik J. 8, Nr 2, 37-40, 2011*
- Ivanov, D. S., Shultz (Schulz), W.:** MD-based modeling of swift heavy ion beam nanostructuring of dielectrics. *8th EBSA European Biophysics Congress, August 23rd-27th 2011, Budapest, Hungary. Eur. Biophys. J. 40 (Suppl. 1), P-266, p.107, 2011*
- Ivanov, T., Bührig-Polaczek, A., Vroomen, U., Hartmann, C., Holtkamp, J., Gillner, A., Bobzin, K., Bagcivan, N., Theiss, S.:** Investment casting of surfaces with microholes and their possible applications. *Light Metals 2011. Proc. of the technical sessions presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2011 Annual Meeting & Exhibition. Warrendale, Pe.: TMS, Minerals, Metals & Materials Society. Chichester: Wiley 2011. pp. 705-709,*
- Ivanov, T., Bührig-Polaczek, A., Vroomen, U., Hartmann, C., Holtkamp, J., Gillner, A., Bobzin, K., Bagcivan, N., Theiss, S.:** Replication of specially microstructured surfaces in A356-alloy via lost wax investment casting. *J. Micromech. Microeng. 21, 85026-85026, 2011*
- Jahnke, J., Mahlmann, D. M., Jacobs, P., Priefer, U. B.:** The influence of growth conditions on the cell dry weight per unit biovolume of *Klebsormidium flaccidum* (Charophyta), a typical ubiquitous soil alga. *J. Appl. Phycol. 23, 655-664, 2011*
- Jungbluth, B., Nyga, S., Pawlowski, E., Fink, T. Wüppen, J.:** Efficient frequency conversion of pulsed microchip and fiber laser radiation in PPSLT. *Proc. SPIE 7912, 79120K (8 S.), 2011*
- Juschkin, L., Maryasov, A., Herbert, S., Aretz, A., Bergmann, K., Lebert, R.:** EUV dark-field microscopy for defect inspection. *AIP Conf. Proc. 1365, 265-268, 2011*
- Kaierle, S., Dahmen, M., Güdükurt, O.:** Eco-efficiency of laser welding applications. *Proc. SPIE 8065, 80650T (10 S.), 2011*
- Kind, H., Olowinsky, A., Gehlen, E.:** Laserprozess statt Ofenlötung. *Laser + Produktion 2011, 30-32, 2011*
- Lebert, R., Farahzadi, A., Diete, W., Schäfer, D., Phiesel, C., Wilhein, T., Herbert, S., Maryasov, A., Juschkin, L., Esser, D., Hofer, M., Hoffmann, D.:** Actinic EUV-Mask metrology: tools, concepts, components. *Proc. SPIE 7985, 79850B (6 S.), 2011*
- Letsche, S., Jacobs, P., Pluntke, M., Tränkle, S., Gong, H., Marti, O., Mahlmann, D.-M., Loosen, P., Volkmer, D.:** 3D characterization of microstructured poly(methacrylic acid) thin films via Mach-Zehnder interference microscopy. *Thin Solid Films 519, Nr. 22, 8100-8108, 2011*
- Li, C., Gu, D., Shen, Y., Meng, G., Li, Y.:** In situ synthesis of Ti5Si3 matrix nanocomposites reinforced with nanoparticles by high-energy mechanical alloying. *Adv. Eng. Mat. 13, Nr. 5, 418-425, 2011*
- Lindner, M., Hoeges, S., Meiners, W., Wissenbach, K., Smeets, R., Telle, R., Poprawe, R., Fischer, H.:** Manufacturing of individual bio-degradable bone substitute implants using selective laser melting technique. *J. Biomed. Mat. Res. A 97 A, Nr. 4, 466-472, 2011*

- Löhring, J., Schlösser, M., Hoffmann, H.-D.:** Compositionally tuned Nd:(YxLu1-x)3Ga5O12-laser at 935 nm for H2O-dial systems. *Proc. SPIE 7912, 79121N (10 S.), 2011*
- Löhring, J., Meissner, A., Hoffmann, D., Fix, A., Ehret, G., Alpers, M.:** Diode-pumped single-frequency-Nd:YGG-MOPA for water-vapor DIAL measurements: design, setup and performance. *Appl. Phys. B 102, 917-935, 2011*
- Loosen, P., Funck, M. C., Gatej, A., Morasch, V., Stollenwerk, J.:** Integrative Produktion von Mikro-Lasern. In: Brecher, C. (Hrsg.): *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. pp. 1068-1114
- Loosen, P., Schmitt, R., Brecher, C., Müller, R., Funck, M., Gatej, A., Morasch, V., Pavim, A., Pyschny, N.:** Self-optimizing assembly of laser systems. *Prod. Eng. 5, Nr. 4, 443-451, 2011*
- Lott, P., Schleifenbaum, H., Meiners, W., Wissenbach, K., Hinke, C., Bültmann, J.:** Design of an optical system for the in situ process monitoring of Selective Laser Melting (SLM). *Phys. Proc. 12, 683-690, 2011*
- Lubna, N., Auner, G., Patwa, R., Herfurth, H., Newaz, G.:** Role of cleaning methods on bond quality of Ti coated glass/lidex system. *Appl. Surf. Sci. 257, Nr. 10, 4749-4753, 2011*
- Mans, T., Dolkemeyer, J., Russbüldt, P., Schnitzler, C.:** Highly flexible ultrafast laser system with 260 W average power. *Proc. SPIE 7912, 79120M (6 S.), 2011*
- Maryasov, N., Maryasova, T., Maryasov, A.:** Estimation of quality of 3D holographic images by means of stereogrammetry. *Proc. SPIE 8075, 8 S., 2011*
- Maryasov, A., Herbert, S., Juschkin, L., Lebert, R., Bergmann, R.:** EUV actinic mask blank defect inspection: results and status of concept realization. *Proc. SPIE 7985, 79850C (8 S.), 2011*
- Merkt, S., Hinke, C., Schleifenbaum, H., Voswinckel, H.:** Integrative Technology Evaluation Model (ITEM) for Selective Laser Melting (SLM). *Adv. Mat. Res. 337, 274-280, 2011*
- Michaeli, W., Schöngart, M., Klaiber, F., Beckemper, S.:** Production of superhydrophobic surfaces using a one-step variothermal injection moulding process. *Micro Nanosystems 3, 222-225, 2011*
- Mikhaylovskaya, A. S., Mikhailovskaya, L. V.:** Diffraction of light in intermediate regime of acoustooptical interaction at oblique incidence. *Opt. Spectrosc. 110, Nr. 2, 287-293, 2011*
- Mingareev, I., Berlich, R., Eichelkraut, T. J., Herfurth, H., Heinemann, S., Richardson, M. C.:** Diffractive optical elements utilized for efficiency enhancement of photovoltaic modules. *Opt. Expr. 19, Nr. 12, 11397-11404, 2011*
- Morsbach, C., Höges, S., Meiners, W.:** Modeling the selective laser melting of polylactide composite materials. *J. Laser Appl. 23, Nr. 1, pp. 012005-1-012005-8, 2011*
- Nastasi, G., Wester, R., Colla, V., Noll, R.:** Determining inclusion size distributions from OES/PDA data. *Proc. of the CETAS 2011, Luxembourg, 17. - 19. Mai 2011. pp. 495-501, 2011*
- Nüsser, C., Wehrmann, I., Willenborg, E.:** Influence of intensity distribution and pulse duration on laser micro polishing. *Phys. Proced. 12, 462-471, 2011*
- Ocylok, S., Weisheit, A., Kelbassa, I.:** Increased wear and oxidation resistance of titanium aluminide alloys by laser cladding. *Adv. Mat. Res. 278, 515-520, 2011*
- Olowinsky, A., Boglea, A.:** Extending the process limits of laser polymer welding with high-brilliance beam sources (recent status and prospects of POLYBRIGHT). *Proc. SPIE 7921, 792107 (15 S.), 2011*
- Petring, D., Schneider, F., Dickler, H.:** *Drei in einem Kopf*. *Laser Technik J. 8, Nr. 4, 28-32, 2011*

Petring, D.: Laser cutting. *LIA Today* 19, Nr. 1, 6-7, 2011

Petring, D., Nazery Goneghany, V.: Parameter dependencies of copper welding with multi-kW lasers at 1micron wavelength. *Phys. Proced.* 12, 95-104, 2011

Petring, D.: Schneller schneiden auf Maschinen mit fasergekoppelten Lasern. *MM Maschinenmarkt* Nr. 13, 32-34, 2011

Petring, D.: Un'applicazione »matura« che ha ancora qualcosa da dire. *Lamiera* 9 (Settembre), 86-88, 2011

Poprawe, R.: Catalyzing innovation: The Fraunhofer Society and Institute for Laser Technology ILT. *OPN Optics & Photonics News* 21, Nr. 2, 10-11, 2011

Pütsch, O., Morasch, V., Funck, M., Loosen, P.: Echtzeitfähige Laserstrahlregelung zur Kompensation thermischer Effekte. *DGAO-Proc.* 112, 2 S., 2011

Pütsch, O., Morasch, V., Loosen, P.: Kompensation thermischer Effekte im Laserresonator durch aktive Regelung der Spotgröße in Echtzeit. *Internationales Forum Mechatronik. Tagungsband Cham* 21. - 22. September 2011. pp. 331-340 ISBN 978-3-00-035785-5

Queudeville, Y., Ivanov, T., Vroomen, U., Bührig-Polaczek, A., Elgeti, S., Probst, M., Behr, M., Windeck, C., Michaeli, W., Nussbaum, C., Hinke, C.: Design methodology for modular tools. *Prod. Eng.* 5, 351-358, 2011

Reininghaus, M., Finger, J., Faley, O., Wortmann, D., Stampfer, C.: Non-thermal ablation of graphite by ultrashort pulsed fs-laser radiation. *ICALEO. 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics, October 23-27, 2011. N 102 (8 S.), 2011*

Richmann, A., Willenborg, E., Wissenbach, K.: Laser polishing of spherical quartz lenses. *2nd EOS Conference on Manufacturing of Optical Components (EOSMOC 2011), Munich, Germany: 23 May 2011 - 25 May 2011. 2 S., 2011*

Richmann, A., Heidrich, S.: Polieren und Abtragen von Quarzglas mit CO₂-Laserstrahlung. *2. Workshop Glasbearbeitung mit Laserstrahlung, 12. April 2011, Erlangen. 21 S., 2011*

Roesner, A., Scheik, S., Olowinsky, A., Gillner, A., Poprawe, R., Schleser, M., Reisgen, U.: Innovative approach of joining hybrid components. *J. Laser Appl.* 23, Nr. 3, 32007 (6 S.), 2011

Roesner, A., Scheik, S., Olowinsky, A., Gillner, A., Reisgen, U., Schleser, M.: Laser assisted joining of plastic metal hybrids. *Phys. Proced.* 12, 373-380, 2011

Russbueldt, P., Hoffmann, H.-D., Mans, T., Poprawe, R.: 1100 W Yb:YAG femtosecond Innoslab amplifier. *Proc. SPIE* 7912, 79120R (9 S.), 2011

Schaefer, D., Beckmann, D., Hoerstmann-Jungemann, M., Kelbassa, I.: Waveguides and markings inside transparent materials by fs-laser radiation. *ICALEO 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics, October 23-27, 2011. M1004 (5 S.), 2011*

Schaefer, M., Holtkamp, J., Gillner, A.: Ablation of PEDOT/PSS with excimer lasers for micro structuring of organic electronic devices. *Synth. Met.* 161, 1051-1057, 2011

Schaefer, M., Esser, A., Holtkamp, J., Gillner, A.: Laser ablation of transparent conducting materials for organic electronics. *Proc. of Large-Area, Organic and Polymer Electronics Convention 2011 (LOPE-C 11), June 2011, Frankfurt/IM: Organics Electronics Association 2011. pp. 159-163*

Schaeffer, R. D., Schaefer, D.: New method for structuring brittle materials. *Micromanufacturing* 4, Nr. 4, 14-15, 2011

Schleifenbaum, H., Diatlov, A., Hinke, C., Bültmann, J., Voswinkel, H.: Direct photonic production: towards high speed additive manufacturing of individualized goods. *Prod. Eng.* 5, 359-371, 2011

- Schmitt, R., Loosen, P., Brecher, C., Pavim, A., Funck, M., Morasch, V., Gatej, A., Pyschny, N., Haag, S.:** Self-optimizing flexible assembly systems. *Comp. Technol. Appl.* 2, Nr. 5, 333-343, 2011
- Schmitz, G. J., Benke, S., Laschet, G., Apel, M., Prah, U., Fayek, P., Kononov, S., Rudnizki, J., Quade, H., Freyberger, S., Henke, T., Bambach, M., Rossiter, E. A., Jansen, U., Eppelt, U.:** Towards integrative computational materials engineering of steel components. *Prod. Eng.* 5, Nr. 4, 373-382, 2011
- Schuh, G., Aghassi, S., Orilski, S., Schubert, J., Bambach, M., Freudenberg, R., Hinke, C., Schiffer, M.:** Technology roadmapping for the production in high-wage countries. *Prod. Eng.* 5, Nr. 4, 463-473, 2011
- Schulz, M., Riedel, R., Willner, A., Mans, T., Schnitzler, C., Russbueldt, P., Dolkemeyer, J., Seise, E., Gottschall, T., Hädrich, S., Duesterer, S., Schlarb, H., Feldhaus, J., Limpert, J., Faatz, B., Tünnermann, A., Rossbach, J., Drescher, M., Tavella, F.:** Yb:YAG Innoslab amplifier: efficient high repetition rate subpicosecond pumping system for optical parametric chirped pulse amplification. *Opt. Lett.* 36, Nr. 13, 2456-2458, 2011
- Schulz-Ruhtenberg, M., Trusheim, D., Das, J., Krantz, S., Wieduwilt, J.:** Influence of pulse duration in picosecond laser ablation of silicon nitride layers. *Energy Proced.* 8, 614-619, 2011
- Schulz-Ruhtenberg, M., Häberle, A., Russell, A., Hernández, J. L., Krantz, S.:** Influence of the pulse width for visible pulsed laser doping for crystalline solar cells using phosphosilicate glass. *J. Laser Micro/Nanoeng.* 6, Nr. 1, 64-68, 2011
- Sedao, X., Sarnet, T., Hernandez, J. L., Schulz-Ruhtenberg, M., Krantz, S.:** Edge isolation using ultra-short pulse laser materials with a top-hat beam profile. *Adv. Mat. Res.* 321, 234-239, 2011
- Sturm, V., Eilers, D., Werheit, P., Noll, R., Chiarotti, U., Volponi, V., Moroli, V., DeMiranda, U., Zanforlin, M., Zani, M., Makowe, J., Vestin, F., Bengtson, A.:** Elemental monitoring of steel scrap loading an electrical arc furnace. *Proc. of the CETAS 2011, Luxembourg*, 17. - 19. Mai 2011. pp. 55-61, 2011
- Taleb Araghi, B., Göttmann, A., Bergweiler, G., Saeed-Akbari, A., Bültmann, J., Zettler, J., Bambach, M., Hirt, G.:** Investigation on incremental sheet forming combined with laser heating and stretch forming for the production of lightweight structures. *Key Eng. Mat.* 473, 919-928, 2011
- Taleb Araghi, B., Göttmann, A., Bambach, M., Hirt, G., Bergweiler, G., Dietrich, J., Steiners, M., Saeed-Akbari, A.:** Review on the development of a hybrid incremental sheet forming system for small batch sizes and individualized production. *Prod. Eng.* 5, Nr. 4, 393-404, 2011
- Temmler, A., Willenborg, E., Wissenbach, K.:** Design surfaces by laser remelting. *Phys. Proced.* 12, 419-430, 2011
- Thombansen, U., Schüttler, J., Auerbach, T. [u.a.]:** Model-based self-optimization for manufacturing systems. *Proc. of the 2011 Int. Conf. on Concurrent Enterprising (ICE 2011)*. Eds.: K.-D. Thoben [u.a.] Piscataway, NJ : IEEE 2011. 9 S.
- Thombansen, U., Auerbach, T.:** Der Weg zu Selbstoptimierenden Fertigungstechnologien. In: Brecher, C. (Hrsg.): *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. pp. 849-909
- Trusheim, D., Schulz-Ruhtenberg, M., Smeets, M., Das, J., Wieduwilt, J.:** Influence of ultra-short pulse laser ablation of silicon nitride passivation layers on electrical cell properties. *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)*, Hamburg, Germany, 05.09.2011 - 08.09.2011.

- Trusheim, D., Schulz-Ruhtenberg, M., Baier, T., Krantz, S., Bauer, D., Das, J.:** Investigation of the influence of pulse duration in laser processes for solar cells. *Phys. Proc.* 12, 278-285, 2011
- Vedder, C., Stollenwerk, J., Pirch, N., Wissenbach, K.:** Laser-based manufacturing of metallic conducting paths. *ICALEO 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics, October 23-27, 2011. M804 (5 S.), 2011*
- Vedder, C., Stollenwerk, J., Wissenbach, K., Pirch, N.:** Laser-based production of metallic conducting paths. *Phys. Proced.* 12, 252-260, 2011
- Vernaleken, A., Weitenberg, J., Sartorius, T., Russbuehldt, P., Schneider, W., Stebbings, S. L., Kling, M. F., Hommelhoff, P., Hoffmann, H.-D., Poprawe, R., Krausz, F., Hänsch, T. W., Udem, T.:** Single-pass high-harmonic generation at 20.8 MHz repetition rate. *Opt. Lett.* 36, Nr. 17, 3428-3430, 2011
- Vossen, G., Schüttler, J.:** Mathematical modelling and stability analysis for laser cutting. *Math. Comp. Model. Dyn. Syst. ifirst*, 1-25, 2011
- Voswinkel, H., Schleifenbaum, H., Bambach, M., Hirt, G.:** Design for manufacture based on an integrated product process design model. *14th Int. Conference Sheet Metal, SheMet 2011: April 18 - 20, 2011, Leuven. pp. 799-806, 2011. ISBN 978-3-03785-083-1*
- Weisheit, A., Jambor, T., Belting, M.:** Automatisiertes Mikro-Laser-auftragschweißen mit dem Faserlaser. *Thermisches Beschichten mit laserbasierten Fertigungsverfahren, Dresden, 24. März 2011. 39 S., 2011*
- Weisheit, A., Bergweiler, G., Gebhardt, P., Wissenbach, K.:** Lokale Laserwärmebehandlung von hochfesten Stählen zur Verbesserung der Kaltumformigenschaften. *31. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung: Hochfeste und hybride Materialien, schnelle Umform- und Fügeverfahren. Bad Boll, 29. und 30.3.2011. Hannover: EFB 2011. ISBN 978-3-86776-363-9*
- Weisheit, A.:** Neue Werkstoffkonzepte für erhöhte Standzeiten und verbesserte Funktionalität von Werkzeugen und Formen. *Werkstoffe in der Fertigung Nr. 6, 4-5, 2011*
- Weitenberg, J., Rußbüldt, P., Eidam, T., Pupeza, I.:** Transverse mode tailoring in a quasi-imaging high-finesse femtosecond enhancement cavity. *Opt. Expr.* 19, Nr. 10, 9551-9561, 2011
- Werheit, P., Fricke-Begemann, C., Gesing, M., Noll, R.:** Fast single piece identification with a 3D scanning LIBS for aluminium cast and wrought alloys recycling. *J. Anal. At. Spectrom.* 26, 2166-2174, 2011
- Witzel, J., Schrage, J., Gasser, A., Kelbassa, I.:** Additive manufacturing of a blade-integrated disk by laser metal deposition. *ICALEO 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics, October 23-27, 2011. Paper 502 (7 S.), 2011*
- Witzel, J., Stannard, S., Gasser, A., Kelbassa, I.:** Characterization of micro/macrostructure of laser clad Inconel 718 with increased deposition rates as related to the mechanical properties. *ICALEO 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics, October 23-27, 2011. Paper 1401 (7 S.), 2011*
- Witzel, J., Schopphoven, T., Gasser, A., Kelbassa, I.:** Development of a model for prediction of material properties of laser clad Inconel 718 as related to porosity in the bulk material. *ICALEO 30. Int. Congr. on Applications of Lasers and Electro-Optics, October 23-27, 2011. Paper 505, (8 S.), 2011*
- Wortmann, D., Reinighaus, M., Finger, J., Dold, C., Russbuehldt, P., Poprawe, R.:** The physics in applications of ultrafast lasers. *Proc. SPIE 8306, 830603 (6 S.), 2011*
- Wueppen, J., Jungbluth, B., Taubner, T., Loosen, P.:** Ultrafast tunable mid IR source. *36th Ann. Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Houston, TX, USA, October 2-7, 2011. (2 S.), 2011*

VORTRÄGE

- 17.01.2011 - A. Bäuerle:** Freeform optics for low-coherence beam shaping applications. Optisches Kolloquium Philips Eindhoven, Eindhoven, Niederlande
- 18.01.2011 - O. Maryasov:** EUV actinic mask blank defect inspection: results and status of concept realization. EMLC2011, Dresden
- 23.01.2011 - S. Hengesbach:** Simulation and analysis of volume holographic gratings integrated in collimation optics for wavelength stabilization. Photonics West 2011, San Francisco, CA, USA
- 24.01.2011 - B. Jungbluth:** Efficient frequency conversion of pulsed microchip and fiber laser radiation in PPSLT. Photonics West 2011, San Francisco, CA, USA
- 24.01.2011 - H.-D. Hoffmann:** 250 W single stage Nd:YV04 picosecond INNOSLAB MOPA. Photonics West 2011, San Francisco, CA, USA
- 25.01.2011 - R. Poprawe:** High power diode lasers - The ultimate source for economic photons in the next decade. Laser Market Place, Photonics West 2011, San Francisco, CA, USA
- 25.01.2011 - H.-D. Hoffmann:** 1100W Yb:YAG fs INNOSLAB amplifier. Photonics West 2011, San Francisco, CA, USA
- 25.01.2011 - S. Hoeges:** Laser based additive processing of bioceramics. ICACC 2011, Daytona Beach, FL, USA
- 26.01.2011 - A. Boglea:** Extending the process limits of laser polymer welding with high-brilliance beam sources (recent status and prospects of POLYBRIGHT). Photonics West 2011, San Francisco, CA, USA
- 27.01.2011 - J. Löhring:** Compositionally tuned Nd:YxLu3-xGa5O12-laser at 935 nm for H2O-dial systems. Photonics West 2011, San Francisco, CA, USA
- 01.02.2011 - W. Meiners:** Selective Laser Melting - Rapid manufacturing for series production of the future. Euromat, Luxemburg, Luxemburg
- 01.02.2011 - D. Ivanov:** MD based modeling on nanostructuring processes. 31st International Hirschegg Workshop on Physics of High Energy Density in Matter, Hirschegg, Österreich
- 16.02.2011 - I. Kelbassa:** Additive BLISK manufacture. LAM 2011, Houston, TX, USA
- 24.02.2011 - A. Gillner:** Micro-usinage par laser et ses applications. Seminar Technifutur, Ougree-Seraing, Belgien
- 28.02.2011 - R. Poprawe:** KW-fs laser technology opening a new dimension of materials processing. ETH Zürich, Zürich, Schweiz
- 10.03.2011 - A. Olowinsky:** Extending the limits of polymer welding - POLYBRIGHT. 3rd European Networking Event, Düsseldorf
- 15.03.2011 - C. Hulverscheidt:** Generation and characterization of femtosecond-laser induced nanostructures on thin gold films. DPG-Frühjahrstagung, Dresden
- 15.03.2011 - D. Petring:** Searching the way to innovation: 25 years of success and failure in developing laser processes as simple as cutting. ILAS 2011, Warrington, Großbritannien
- 15.03.2011 - A. Gillner:** Laserverbindungstechnik für Batteriesysteme in der Elektromobilität. Workshop Batteriesystemtechnik, Forum Elektromobilität, Berlin
- 16.03.2011 - A. Olowinsky:** Laser microjoining - an introduction to a variety of processes. ILAS 2011, Warrington, Großbritannien
- 24.03.2011 - A. Weisheit:** Automatisiertes Mikro-Laserauftrag-schweißen mit dem Faserlaser. TAW-Symposium Thermisches Beschichten, Dresden

24.03.2011 - W. Meiners: Generative Fertigung für die Produktion der Zukunft. TAW-Symposium Thermisches Beschichten, Dresden

29.03.2011 - S. Kaierle: Eco efficiency of laser welding applications. SPIE Eco-Photonics, Straßburg, Frankreich

30.03.2011 - A. Weisheit: Lokale Laserwärmebehandlung von hochfesten Stählen zur Verbesserung der Kaltumformeigenschaften. EFB Kolloquium Blechverarbeitung 2011, Bad Boll

31.03.2011 - K. Wissenbach: Presentation of EU Project FANTASIA. 6th European Aeronautics Days, Madrid, Spanien

05.04.2011 - A. Olowinsky: Laser application for light weight structures: Cutting and joining of composite materials. Hannover Messe 2011, Hannover

06.04.2011 - A. Gillner: Laser microjoining - Innovative processes and applications for welding, soldering, bonding and polymer welding. Hannover Messe 2011, Hannover

06.04.2011 - I. Kelbassa: Additive BLISK manufacture. AeroDef2011, Anaheim, CA, USA

07.04.2011 - P. Loosen: EUV sources, the path for future nanostructuring. Innovative Laserbearbeitung im Mikro- und Nanometerbereich. EMPA, Thun, Schweiz

12.04.2011 - A. Richmann: Polieren und Abtragen von Quarzglas mit CO₂-Laserstrahlung. Glasworkshop Erlangen, Erlangen

13.04.2011 - M. Wehner: Optische Ferndetektion von Biosensoren zum Nachweis von Gefahrstoffen. Seminar INT, Euskirchen

13.04.2011 - I. Kelbassa: Additive BLISK manufacture. SALA 2011, Hartford, CT, USA

13.04.2011 - R. Poprawe: Aufbau und Funktion unterschiedlicher UKP-Systeme. 1. Aachener Ultrakurzpuls-Laser-Workshop, Vaals, Niederlande

13.04.2011 - A. Gillner: Ultrakurzpuls-Laser - Das Werkzeug der Zukunft? 1. Aachener Ultrakurzpuls-Laser-Workshop, Vaals, Niederlande

13.04.2011 - H.-D. Hoffmann: Aufbau und Funktion unterschiedlicher UKP Systeme. 1. Aachener Ultrakurzpuls-Laser-Workshop, Vaals, Niederlande

14.04.2011 - R. Poprawe: Generative manufacturing. National Laser Center, Pretoria, Republik Südafrika

19.04.2011 - R. Poprawe: KW fs lasers and their potential for opening a new aera of materials processing. University of Stellenbosch, Stellenbosch, Republik Südafrika

23.04.2011 - R. Poprawe: Global socioeconomic development and higher education. Tsinghua University Peking, Peking, Volksrepublik China

21.04.2011 - R. Freiburger: Time resolved EUV pump-probe microscopy of fs-laser induced nanostructure formation. SPIE Tagung, Prag, Tschechische Republik

30.04.2011 - P. Loosen: From fundamental to applied research. 1st leadership meeting of the EPS Young Minds Project. Cern, Genf, Schweiz

06.05.2011 - A. Gasser: Additive manufacturing in turbo-engine applications. Turbine Forum 2011, Nizza, Frankreich

10.05.2011 - M. Wehner: Artifizielle Seide in der Biomedizin: Anwendung in der Wundheilung. Compamed Frühjahrs-Forum, Frankfurt a. M.

10.05.2011 - P. Werheit: 3-D scannende Laser-Direktanalyse für das Leichtmetallrecycling. Innovationsforum, Goslar

12.05.2011 - C. Fricke-Begemann: Dem ultrafeinen Staub auf der Spur. Fachausschuss Immissionsschutz der Wirtschaftsvereinigung Stahl, Düsseldorf

17.05.2011 - G. Vossen: Optimal control of a melt flow in laser cutting. SIAM Conference on Optimization (OP11), Darmstadt

17.05.2011 - V. Sturm: Elemental monitoring of steel scrap loading an electrical arc furnace. CETAS 2011, Luxemburg, Luxemburg

18.05.2011 - C. Fricke-Begemann: Laser-based methods for chemical composition analysis of particulate emissions from steelmaking processes. CETAS 2011, Luxemburg, Luxemburg

19.05.2011 - R. Wester: Determining inclusion size distributions from OES/ICP-MS Data. CETAS 2011, Luxemburg, Luxemburg

23.05.2011 - A. Gillner: Werkstoffe, Funktionalisierungen und laserbasierte Fertigungsverfahren. Otti Seminar Implantate, Bayreuth

23.05.2011 - R. Poprawe: KW-fs laser technology - Enabler of a new dimension of materials processing? LiM2011, München

23.05.2011 - J. Weitenberg: High power ultrafast laser based on the INNOSLAB amplifier concept. Cleo Europe 2011, München

24.05.2011 - D. Trusheim: Investigation of the influence of pulse duration in laser processes for solar cells. LiM2011, München

24.05.2011 - D. Buchbinder: High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of aluminium parts. LiM2011, München

24.05.2011 - A. Richmann: Laserpolieren von sphärischen Quarzglaslinsen mit Laserstrahlung. EOSMOC 2011, München

24.05.2011 - H.-D. Hoffmann: High power ultrafast laser with average power up to KW range. Laser 2011 Application Panel, München

25.05.2011 - J. Stollenwerk: Laser-based production of metallic conducting paths. LiM2011, München

25.05.2011 - A. Roesner: Laser assisted joining of plastic metal hybrids. LiM2011, München

25.05.2011 - C. Franz: Energy input per unit length - High accuracy kinematic metrology in laser material processing. LiM2011, München

25.05.2011 - C. Nüsser: Influence of intensity distribution and pulse duration on laser micro polishing. LiM2011, München

25.05.2011 - D. Petring: Parameter dependencies of copper welding with multi-kW lasers at 1 micron wavelength. LiM2011, München

25.05.2011 - A. Gillner: System- und process technology for high throughput and high quality laser processing of solar cells and module. Laser 2011 Application Panel, München

25.05.2011 - J. Holtkamp: Mikro- und Nanostrukturierung mit Ultrakurzpulslasern. Laser 2011 Application Panel, München

25.05.2011 - A. Diatlov: Investigation of methods for surface topography quantification of Selective Laser Melting (SLM) built parts. Rapid 2011, Minneapolis, MN, USA

25.05.2011 - A. Temmler: Design surfaces by laser remelting. LiM2011, München

26.05.2011 - P. Lott: Design of an optical system for the in situ process monitoring of Selective Laser Melting (SLM). LiM2011, München

26.05.2011 - S. Heidrich: Development of a laser based process chain for manufacturing freeform optics. LiM2011, München

26.05.2011 - D. Hawelka: Laser based inline production of wear protection coatings on temperature sensitive substrates. LiM2011, München

31.05.2011 - O. Maryasov: Investigation and comparison of XUV wavefronts produced by LPP and DPP sources. COST MP0601 Meeting, Dublin, Irland

07.06.2011 - I. Kelbassa: Laser Additive Manufacturing. Pacific Additive Manufacturing Forum PAMF 2011, Melbourne, Adelaide, Sydney, Brisbane, Australien

08.06.2011 - R. Noll: Inline elemental characterization of scrap charging for improved EAF charging control and internal scrap recycling. RFCS meeting, TGS9, Budapest, Ungarn

09.06.2011 - M. Schulz-Ruhtenberg: Industrietaugliche Laserprozesse zur Erzeugung selektiver Emittter auf kristallinen Solarzellen. SPECTARIS-Forum, München

16.06.2011 - A. Gatej: Kombinierte thermo-optische Simulation für optische Systeme. DGAO-Jahrestagung, Ilmenau

17.06.2011 - V. Morasch: Generierung dynamischer Intensitätsverteilungen für die Oberflächenstrukturierung durch Umschmelzen mittels Laserstrahlung. DGAO-Jahrestagung, Ilmenau

23.06.2011 - Y.-C. Hagedorn: Additive manufacturing of alumina (Al₂O₃) zirconia (ZrO₂) ceramic compounds by Selective Laser Melting. ECERs XII, Stockholm, Schweden

27.06.2011 - Y.-C. Hagedorn: SLM of ceramics: New opportunities for the dental industry. 4th Additive Manufacturing Forum: Novel materials & new business models in the creative industries, Barcelona, Spanien

29.06.2011 - M. Schaefer: Laser ablation of transparent conducting materials for organic electronics. LOPE-C, Frankfurt a. M.

29.06.2011 - A. Roesner: Laser transmission welding of FRP using the example of a rear seat back. AWL, CE Harderwijk, Niederlande

30.06.2011 - A. Bäuerle: Auslegung abbildender und nicht-abbildender optischer Systeme. Seminar »Optische Kunststoff-Formteile in Design und Technik«, Würzburg

01.07.2011 - L. Jauer: RESOBONE - Ersatzknochen aus Laserschmelze. Woche der Gesundheitswirtschaft, Aachen

01.07.2011 - J. Holtkamp: Micro and nano structuring with ultra short pulsed lasers. JENOPTIK Laser GmbH - Customer Day, Jena

05.07.2011 - A. Weisheit: Lokale Wärmebehandlung von Platinen und Bauteilen aus hochfesten Stählen zur Verbesserung der Umform- und Funktionseigenschaften. 5. Märkischer Werkstofftag, Hagen

12.07.2011 - S. Kaierle: Eco efficiency of laser materials processing. ICFL, Changchun, Volksrepublik China

12.07.2011 - I. Kelbassa: Additive BLISK manufacture. ICFL, Changchun, Volksrepublik China

12.07.2011 - Y.-C. Hagedorn: Generative Fertigung von 3D-Oxid-Keramiken mittels Selective Laser Melting. Tagung Arbeitskreis Keramik, Rheinbach

15.07.2011 - M.-C. Funck: Toleranzen - Analyse, Budgetierung und Toleranzoptimierung optischer Systeme. TU Ilmenau, Ilmenau

10.08.2011 - Y.-C. Hagedorn: Additive manufacturing of alumina/zirconia ceramics via Selective Laser Melting. 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA

21.08.2011 - M.-C. Funck: Reducing asymmetric imaging errors through selective assembly and tolerance desensitization. SPIE Optics+Photonics 2011, San Diego, CA, USA

22.08.2011 - A. Bäuerle: Optical system design for a reflector-based LED food lighting module. SPIE Optics+Photonics 2011, San Diego, CA, USA

24.08.2011 - R. Poprawe: The physics in applications of ultrafast laser. Photonics Prag, Prag, Tschechische Republik

25.08.2011 - D. Ivanov: MD-based modeling of swift heavy ion beam nanostructuring of dielectrics. 2011 Bio-Physics Congress Budapest, Budapest, Ungarn

30.08.2011 - R. Poprawe: KW-fs laser technology - enabling a new dimension of materials processing. CLEO Pacific RIM, Sydney, Australien

06.09.2011 - A. Bäuerle: Freeform lens for an efficient wall washer. SPIE Optical System Design, Marseille, Frankreich

07.09.2011 - M. Schulz-Ruhtenberg: Laser processes for the production of solar cells. EU PVSEC, Hamburg

12.09.2011 - R. Noll: Plasmas as light sources from IR to extreme-UV - from LIBS to next generation lithography: an overview. EMSLIBS 2011, Cesme, Izmir, Türkei

12.09.2011 - S. Hölters: Low coherence interferometry for the inline measurement of translucent multilayer structures. IMEKO-Symposium 2011, Braunschweig

14.09.2011 - A. Olowinsky: EU-Project POLYBRIGHT, laser plastic welding. JNPLI 2011, Paris, Frankreich

14.09.2011 - R. Poprawe: KW fs lasers and their potential for opening a new aera of materials processing. 2nd International Symposium on Functional Surfaces, Aachen

14.09.2011 - S. Engelhardt: Tool integrated photonic induced functionalization of polymer parts (TOPAS). 2nd International Symposium on Functional Surfaces, Aachen

14.09.2011 - A. Temmler: Structuring by laser remelting. 2nd International Symposium on Functional Surfaces, Aachen

14.09.2011 - P. Werheit: Automated LIBS sorting system for single piece analysis in metal recycling. EMSLIBS 2011, Cesme, Izmir, Türkei

15.09.2011 - G. Vossen: On a new inexact gradient descent method for parabolic optimal control problems. IFIP TC 7 Conference on System Modeling and Optimization, Berlin

15.09.2011 - M. Hörstmann-Jungemann: Processing of transparent materials using femtosecond laser radiation. JNPLI 2011, Paris, Frankreich

15.09.2011 - C. Franz: Advances in quality monitoring in laser processing. JNPLI 2011, Paris, Frankreich

16.09.2011 - C.-A. Hartmann: Ultra short pulse laser structuring for automotive and tool applications. JNPLI 2011, Paris, Frankreich

19.09.2011 - J. Stollenwerk: Thin film laser processing. E-MRS 2011 Fall Meeting, Warschau, Polen

20.09.2011 - D. Riester: Single cell transfer for in vitro assays (presentation award). Summer School on Biomaterials and Regenerative Medicine, Riva del Garda, Italien

21.09.2011 - S. Engelhardt: Fabrication of three-dimensional polymer-protein hybrid scaffolds by two-photon induced crosslinking (presentation award). Summer School on Biomaterials and Regenerative Medicine, Riva del Garda, Italien

27.09.2011 - M. Dahmen: Knocking on Africa's door - Scouting for laser application in South Africa. AFRIMOLD 2011, Sandton Convention Centre, Johannesburg, Republik Südafrika

27.09.2011 - M. Dahmen: Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection. AFRIMOLD 2011, Sandton Convention Centre, Johannesburg, Republik Südafrika

28.09.2011 - J. Holtkamp: Micro- and nano-structuring of tools with ultra short pulsed lasers. AFRIMOLD 2011, Sandton Convention Centre, Johannesburg, Republik Südafrika

28.09.2011 - A. Gasser: Laser applications in tool and mould making. AFRIMOLD 2011, Sandton Convention Centre, Johannesburg, Republik Südafrika

29.09.2011 - R. Poprawe: Yb: Innoslab femtosecond amplifier with 1.1 kW average power. 2011 Ultrafast Optics Conference, Monterey, CA, USA

29.09.2011 - J. Miesner: Soldering by lasers and packaging by soldering - activities at Fraunhofer ILT. 8. »User Meetings micro assembly«, Berlin

01.10.2011 - A. Diatlov: Towards surface topography: Quantification of Selective Laser Melting (SLM) built parts. VRAP 2011, Leiria, Portugal

03.10.2011 - A. Bäuerle: Freeform optics at Fraunhofer ILT and RWTH Aachen University. OSA Freeform Optics Incubator Meeting, Washington, DC, USA

06.10.2011 - P. Abels: Produktivität und Qualität durch Lasereinsatz in der Fertigung. Laser Herbstforum »Laser in der Automation«, Hannover

06.10.2011 - D. Petring: Simulation and optimization of CO₂ fiber and disk laser cutting by using CALCut. BLECH Nordic, Stockholm, Schweden

06.10.2011 - M. Schulz-Ruhtenberg: Laser processing of semiconductors. EPIC Workshop »Manufacturing Processes for Photonics«, Berlin

06.10.2011 - J. Wüppen: Ultrafast tunable mid IR source. IRMMWTHZ 2011, Houston, TX, USA

11.10.2011 - G. Vossen: H₂, α -norm model reduction for optimal control of PDEs with applications in laser processing. International Workshop on Control and Optimization of PDEs, Graz, Österreich

12.10.2011 - A. Gasser: Laserpulverauftragschweißen aus der Praxis. Reis Lasertage, Obernburg

14.10.2011 - R. Poprawe: The common master degree program of Tsinghua and RWTH-Aachen – A success story since 10 years. 5th Sino-German University Presidents Meeting, Wuhan, Volksrepublik China

18.10.2011 - K. Bergmann: Brilliance scaling of discharge based EUV sources. EUV Lithography Symposium, Miami, FL, USA

20.10.2011 - A. Gillner: Robuste und werkstoffangepasste Laserprozesse für die Batteriefertigung. 1. Materials for Batteries Kongress, München

21.10.2011 - S. Danylyuk: EUV interference lithography with laboratory gas-discharge plasma source. EUV Lithography Symposium, Miami, FL, USA

24.10.2011 - A. Olowinsky: Laser polymer welding: From research to high volume industrial applications. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

24.10.2011 - M. Reininghaus: Non-thermal ablation of graphite by ultrashort pulsed fs-laser radiation. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

25.10.2011 - J. Witzel: Additive manufacturing of a blade-integrated disk by laser metal deposition. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

25.10.2011 - J. Witzel: Development of a model for prediction of material properties of laser cladmed inconel 718 AS related to porosity in the bulk material. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

25.10.2011 - N. Hambach: Stability limits of laser drilled holes on large areas. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

25.10.2011 - H.-D. Hoffmann: Festkörperlaser und Diodenlaser für das Schweißen von Kunststoffen. Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg

27.10.2011 - J. Holtkamp: Micro and nano structuring with high power ultra short pulsed laser – current applications and perspectives. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

27.10.2011 - M. Hörstmann-Jungemann: Surface functionalization with fs-laser radiation. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

25.10.2011 - C. Hong: Advantages of laser metal deposition by using zoom optics and MWO (Modular Welding Optics). ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

26.10.2011 - C. Franz: Real-time process control by machine vision. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

26.10.2011 - D. Schaefer: Waveguides and markings inside transparent materials by fs-laser radiation, ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

26.10.2011 - C. Vedder: Laser-based manufacturing of metallic conducting paths. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

26.10.2011 - J. Dietrich: Drilling with fiber lasers. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

26.10.2011 - Y.-C. Hagedorn: Additive manufacturing of AlSi10Mg-CNT composites via Selective Laser Melting. BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T, Dalian, Volksrepublik China

27.10.2011 - S. Kaierle: Strategies of R&D and international networking towards the evolution of future laser materials processing. ICALEO® 2011, Orlando, FL, USA

29.10.2011 - S.-J. Merkt: Integrative technology model for SLM. ICMPMT 2011, Chengdu, Volksrepublik China

29.10.2011 - D. Hawelka: Physical and mechanical properties of ceramic wear protection coatings produced using a laser process. European Symposium on friction wear and wear protection, Karlsruhe

02.11.2011 - S. Engelhardt: Additive manufacturing of an artificial blood vessel system by the combination of inkjet-printing and two-photon polymerization. World Conference on Regenerative Medicine 2011, Leipzig

03.11.2011 - S.-J. Merkt: Complexity analysis in an integrative technology evaluation model for SLM. RAPDASA 2011, Vanderbijlpark, Johannesburg, Republik Südafrika

08.11.2011 - A. Gasser: Laser metal deposition for cladding, repair and additive manufacturing. Technologie Show bei TRUMPF, Ditzingen

15.11.2011 - P. Russbuehdt: Ytterbium INNOSLAB amplifiers - the high average power approach of ultrafast lasers. LEI2011, Szeged, Ungarn

15.11.2011 - A. Richmann: Polieren optischer Präzisionsoberflächen mit CO₂-Laserstrahlung. POLILAS Abschlusskolloquium, Aachen

15.11.2011 - D. Schaefer: 3D - Volumenstrukturierung von transparenten Materialien mittels fs-Laserstrahlung. POLILAS Abschlusskolloquium, Aachen

15.11.2011 - S. Heidrich: Herstellung von optischen Komponenten aus Quarzglas mit Laserstrahlung. POLILAS Abschlusskolloquium, Aachen

16.11.2011 - R. Poprawe: Laser additive manufacturing - The key to the next generation of economic custom production. MCPC 2011, San Francisco, CA, USA

17.11.2011 - D. Wortmann: Ultrafast ablation dynamics of graphite and deposition of graphene using FS-laser radiation. COLA 2011, Playa del Carmen, Mexico

18.11.2011 - J. Hauck: Characterization and optimization of an imaging micro-channel plate EUV detector with high temporal resolution. COST MP0601 Meeting, Paris, Frankreich

18.11.2011 - S. Herbert: Novel CMOS detector design for fast imaging applications in the extreme ultraviolet. COST MP0601 Meeting, Paris, Frankreich

19.11.2011 - R. Poprawe: Latest developments in additive manufacturing. MCPC 2011, San Francisco, CA, USA

28.11.2011 - P. Russbuedt: Kohärente Röntgenquelle zur Erzeugung und Analyse von Nanostrukturen. Fraunhofer Symposium »Netzwerk«, München

28.11.2011 - R. Noll: Antibiotischer Resistenzschnelltest für die molekulare klinische Analyse - AESKULAP. Fraunhofer Symposium »Netzwerk«, München

01.12.2011 - M. Leers: Wärmemanagement von Hochleistungslaserdioden auf wassergekühlten Wärmesenken. Bayrisches Laserzentrum, Nürnberg

14.12.2011 - J. Witzel: Generative Fertigung am Fraunhofer ILT. Optikseminar am ITO, Universität Stuttgart, Stuttgart

14.12.2011 - K. Wissenbach: Laserbasiertes Beschichten und Funktionalisieren von Oberflächen. MST Kooperationsforum »Trends der Oberflächentechnik«, Köln

KONGRESSE UND SEMINARE

23.2. - 24.2.2011, Aachen

International Conference on Turbomachinery Manufacturing – ICTM

Mit der ersten International Conference on Turbomachinery Manufacturing – ICTM hat das Fraunhofer ILT gemeinsam mit dem Fraunhofer IPT eine Plattform zum Austausch über neue Technologien zur Herstellung und Instandsetzung von Turbomaschinen geschaffen. 213 Experten aus 11 Nationen aus dem Flugzeug- und Energiebereich sowie aus der Laser- und Produktionstechnik nahmen an der Konferenz teil. Ein besonderes Highlight waren neben den 19 Vorträgen die 25 Live-Vorführungen in den beiden Fraunhofer-Instituten. Anhand von Beispielen zur Reparatur und Fertigung zeigten die Aachener Forscher, wie sie technologische Innovationen umsetzen und in durchgängigen Prozessketten anwendungsnah zusammenführen. Auf der konferenzbegleitenden Ausstellung waren elf industrielle Partner vertreten. Weitere Informationen zur ICTM unter www.ictm-aachen.com.

13.4. - 14.4.2011, Aachen

1. Aachener Ultrakurzpuls-Laser-Workshop

Am 13. und 14. April 2011 fand zum ersten Mal der vom Fraunhofer ILT initiierte Aachener Ultrakurzpuls-Laser-Workshop statt. Über 150 Teilnehmer und 20 Referenten aus Wissenschaft und Industrie diskutierten über Grundlagen, Laserstrahlquellen und Anwendungen für die Präzisionsbearbeitung mit Pikosekunden- und Femtosekundenlasern. In Podiumsdiskussionen wurden technologische Entwicklungen und deren Marktpotenzial beleuchtet sowie grundlegende Fragestellungen zum Einsatz dieser neuen Strahlquellen aufgegriffen. Am 17. und 18. April 2013 findet der 2. Aachener Ultrakurzpuls-Laser-Workshop statt. Zusätzlich wird es zu diesem Thema auf dem AKL'12 (www.lasercongress.org) ein spezielles Seminar am 9. Mai 2012 in Aachen geben. Weitere Informationen zum UKP-Workshop unter www.ultrakurzpuls-laser.de.

14.9. - 15.9.2011, Aachen

2nd International Symposium on Functional Surfaces

Am 14. und 15. September 2011 fand das zweite »International Symposium on Functional Surfaces« statt. Dieses Symposium wurde im Rahmen der im November 2003 gestarteten Förderinitiative »Innovative Methods for Manufacturing of Multifunctional Surfaces« der Volkswagen Stiftung durchgeführt. Von 2004 bis 2009 wurden insgesamt 24 Projekte, an denen mehr als 60 Forschungsteams beteiligt waren, mit einem Volumen von fast 19 Millionen Euro durch die Volkswagenstiftung gefördert. Den ca. 100 Teilnehmern des Symposiums in Aachen wurden die neuesten Forschungsergebnisse der geförderten Projekte präsentiert.

15.11.2011, Aachen

Abschlusskolloquium des BMWi-Verbundprojekts »PoliLas«

Im Rahmen des Abschlusskolloquiums des Projekts »PoliLas« präsentierten die Projektpartner ihre Ergebnisse und gaben einen Ausblick zur Weiterentwicklung der Technologien. Der Fokus lag auf der Herstellung und Charakterisierung von optischen Komponenten. Darüber hinaus wurden auch andere Tätigkeiten im Bereich der Glasbearbeitung und Charakterisierung optischer Komponenten mit Laserstrahlung vorgestellt.

Weitere Themen:

- Herstellung und Polieren von optischen Komponenten aus Quarzglas mit Laserstrahlung
- Charakterisierung thermischer Linsen in Lasersystemen
- 3D-Volumenstrukturierung von transparenten Materialien mittels Laserstrahlung
- Inverses Glasbohren



KOLLOQUIUM LASERTECHNIK AN DER RWTH AACHEN

20.1.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Prof. Dr. Michael Schmidt, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Photonische Technologien, Erlangen: »Macro and micro processing with lasers - processes and system technology«

10.2.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Prof. Dr. Günther Tränkle, Ferdinand-Braun-Institut, Berlin:
»High power diodes«

22.2.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Prof. Dr. Milan Brandt, Royal Melbourne Institute of Technology - RMIT, Chair for Advanced Manufacturing, Melbourne, Australien: »In-situ repair of gas and steam turbine components by laser metal deposition«

21.4.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Prof. Dr. Lin Li, The University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, Manchester, England: »Laser activities at the University of Manchester«

28.4.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Prof. Dr. Johannes Wilden, TU Berlin, Fachgebiet Füge- und Beschichtungstechnik, Berlin: »Laser processes and metallurgy as key to new applications«

5.5.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Prof. Dr. Wolfgang Osten, Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart: »Making, testing, applying – new approaches in the field of micro optics«

19.5.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Dr. Robert Scudamore, The Welding Institute, Cambridge, England: »Laser activities at The Welding Institute – TWI«

30.6.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Prof. Dr. Ralf Bergmann, BIAS – Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH: »Optical metrology and non destructive testing at BIAS«

1 Vortragssession beim 1. Aachener Ultrakurzpulslaser-Workshop.

2 ICTM-Teilnehmer bei Live-Vorfürungen im Fraunhofer ILT.



7.7.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Prof. Dr. Wolfgang Sandner, Max-Born-Institut (MBI), Berlin:
»European Projects for Extreme Light (EL) and Laser Fusion
(HiPER): Challenges and opportunities for basic laser research
and application«

24.11.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Dr. Rüdiger Grunwald, Max-Born-Institut (MBI), Berlin:
»Programmable ultrashort-pulsed nondiffracting patterns«

15.12.2011, Aachen

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Kolloquium Lasertechnik

Prof. Jeremy Witzens, RWTH Aachen, Fakultät für
Elektrotechnik, Aachen: »Optische Kommunikation
mit Silizium Photonik«

1 *Vortragssession beim 2nd International
Symposium on Functional Surfaces in Aachen.*

2 *Aix-Laser-People-Veranstaltung bei der
Philips Technologie GmbH in Aachen.*

3 *Aix-Laser-People-Veranstaltung bei Jenoptik in Jena.*

AIX-LASER-PEOPLE

11.2.2011, Jena

39. Seminar des Ehemaligenclubs »Aix-Laser-People«
des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT
bei der JENOPTIK in Jena mit Vorstellung der JENOPTIK
durch Dr. Michael Mertin, CEO, Besichtigung der JENOPTIK
Polymer Systems GmbH und der JENOPTIK Optical Systems
GmbH, Überblick über die Aktivitäten der Lasers & Materials
Processing Division durch Dr. Thomas Fehn, President of Lasers
& Materials Processing Division, und Vortrag zu den aktuellen
Entwicklungen im Bereich der Festkörper- und Diodenlaser bei
Jenoptik durch Dr. Guido Bonati, President Business Unit Laser/
Vice President Lasers & Materials Processing Division.

25.5.2011, München

40. Seminar des Ehemaligenclubs »Aix-Laser-People«
des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT
während der LASER 2011 in München. Nach dem großen
Erfolg des Business Speed Dating auf dem Aix-Laser-People
Treffen im Rahmen der LASER 2009 wurde Ehemaligen und
aktuellen ILT-Mitarbeitern diesmal wieder die Gelegenheit
geboten, sich innerhalb einer Stunde im 10-Minuten-Takt
miteinander auszutauschen.

29.9.2011, Berlin

41. Seminar des Ehemaligenclubs »Aix-Laser-People«
des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT
bei Rolls-Royce in Blankenfelde-Mahlow (Dahlewitz) mit
Unternehmenspräsentation von Mieke Dichter-Van Hamburg,
Präsentation zum Thema F&E bei Rolls-Royce durch Dr. Metin
Taban sowie Fachvorträgen zum Thema Laseranwendungen
im Turbinenbau von Joachim Rautenberg, Elke Weiss und
Susanne Gebhard mit anschließender Besichtigung des
Flugzeugtriebwerksbaus.



22.12.2011, Aachen

42. Seminar des Ehemaligenclubs »Aix-Laser-People« des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT bei der Philips Technologie GmbH in Aachen mit Besichtigung der LED-Fertigung, Lumiblade Creative Lab Tour und Einführung in die OLED-Technologie durch Gerlinde Haberl, Business Creation Manager bei Philips, Vortrag zur Laserbearbeitung in der OLED-Fertigung von Dr. Holger Schwab, Senior Project Manager bei Philips, sowie Vortrag zum Einsatz von Ultrakurzpulslasern zur Materialbearbeitung von Dr. Arnold Gillner, Kompetenzfeldleiter Abtragen und Fügen des Fraunhofer ILT.

14.4.2011, 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 und Politik kennen. Das Fraunhofer ILT hat zusammen mit dem Fraunhofer IPT und dem Fraunhofer IME an diesem bundesweiten Berufsorientierungstag für Mädchen zwischen 10 und 15 Jahren teilgenommen. Insgesamt 50 Mädchen wurden an diesem Tag durch die Institute geführt.

VERANSTALTUNGEN FÜR SCHÜLER UND STUDENTEN

08.2.2011

Führung für Studenten der RWTH Aachen

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für Studenten der Vorlesung Lasertechnik der RWTH Aachen.

1.4.2011, Aachen

Führung für Teilnehmer des Deutschen Jungforschernetzwerks JuFORUM e.V.

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für Teilnehmer des Deutschen Jungforschernetzwerks JuFORUM e.V.

5.4.2011, Aachen

Schülerführung

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für Schüler im Rahmen des europäischen Umwelt- und Medienprojekts »Umwelt baut Brücken«.

26.7.2011, Aachen

Schüleruniversität

Die RWTH Aachen bietet in den Sommerferien kostenlose Schüleruniversitäten zu den MINT-Fächern (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik) für Schülerinnen und Schüler ab Jahrgangsstufe 9 an. Das Fraunhofer ILT hat sich daran gemeinsam mit dem Institut für Luft- und Raumfahrt und dem Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik im Fach Maschinenbau A mit Vorlesungen und Laborübungen zum Thema Lasertechnik beteiligt.

28.7.2011

Führung für Studenten der RWTH Aachen

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für Studenten der Vorlesung Lasertechnik der RWTH Aachen.

3.8.2010, Aachen

Studentenführung

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für Studenten der Universität Bielefeld.

7.10.2011

Führung für Studenten der RWTH Aachen

Informationsveranstaltung des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT und des Fraunhofer ILT für Studenten des Erstsemesters Maschinenbau der RWTH Aachen.



1



2

MESSEBETEILIGUNGEN

25.1. - 27.1.2011

San Francisco, USA

Photonics West 2011

Internationale Fachmesse für Optik und Photonik
Das Fraunhofer ILT war auf der internationalen Fachkonferenz Photonics West durch mehrere Vorträge aus den Bereichen Laser und Laseroptik vertreten. Gemeinsam mit 51 deutschen Ausstellern, davon sechs Fraunhofer-Institute, nahmen das Fraunhofer ILT und der Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University am »Deutschen Pavillon«, Stand 4601, teil. Themen: Neue Hochleistungslaser, präzise Montagetechniken für optische Komponenten sowie neue Wärmesenken von Hochleistungsdiolenlasern.

4.4. - 8.4.2011

Hannover

HANNOVER Messe / MicroNanoTec 2011

Internationale Industriemesse
Teilnahme des Fraunhofer ILT an zwei Fraunhofer-Gemeinschaftsständen sowie am IVAM-Gemeinschaftsstand. ILT-Themen: Laserverfahren für die Elektromobilität, Laserverfahren für die Oberflächentechnik und Mikrobearbeitung.

23.5. - 26.5.2011

München

LASER 2011

LASER 2011 World of Photonics and World of Photonics Congress 2011

Das Fraunhofer ILT präsentierte den Besuchern auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand in Halle C2.330 auf rund 120 m² aktuelle FuE-Ergebnisse. Die über 60 Exponate beleuchteten das gesamte Spektrum der Laserstrahlquellen und der Laserfertigungsverfahren im Mikro- und Makrobereich. Zu den Themenschwerpunkten zählten Laseranwendungen für Leichtbau und E-Mobilität sowie Hochleistungsfemtosekundenlaser.

5.9. - 9.9.2011

Hamburg

EU PVSEC 2011

26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition

Auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand stellte das Fraunhofer ILT die Ergebnisse des EU-Projekts SOLASYS vor und präsentierte einen Polygonscanner zur Hochgeschwindigkeitsstrahlableitung für UKP-Laser. Zudem wurde ein in Kooperation mit der Firma EdgeWave GmbH entwickeltes System zur Glasbearbeitung live vorgeführt.

27.9. - 28.9.2011

Chicago, IL USA

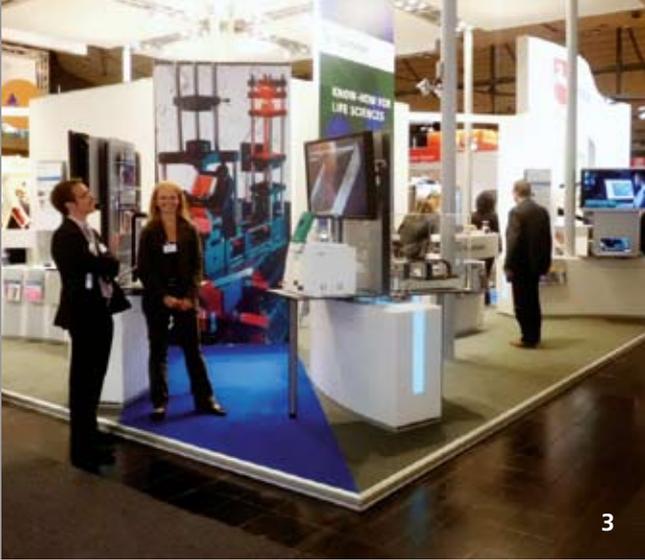
LME 2011

LIA'S Lasers for Manufacturing Event

Gemeinsam mit dem amerikanischen Partner Joining Technologies Inc. präsentierte das Fraunhofer ILT Bearbeitungsköpfe für das Laserauftragschweißen.

1 Fraunhofer-Gemeinschaftsstand auf der LASER 2011 in München.

2 Dr. Andres Gasser im Gespräch mit einem Besucher auf der LASER 2011.



11.10. - 13.10.2011

Hannover

Biotechnica 2011

Messe und Kongress für Biotechnologie und Life Sciences
Das Fraunhofer ILT präsentierte auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand D10 in Halle 9 unter anderem den »Protoprinter«, ein laserbasiertes Desktop-System zur Herstellung von Protein-Microarray-Chips.

24.10. - 27.10.2011

Orlando, Florida, USA

ICALEO 2011

30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics

Teilnahme des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University an den Vortragssessions und an dem Vendor Ausstellungs-Programm der ICALEO.

15.11. - 18.11.2011

München

Productronica 2011

19th International Trade Fair for Innovative Electronics Production

Im Mittelpunkt standen Prozesse für die innovative Elektronikfertigung. Als Highlights führten die Experten des Fraunhofer ILT das Laserschweißen von Batteriemodulen und das Kunststoffschweißen von Antennengehäusen auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand in Halle B2.135 live vor.

16.11. - 19.11.2011

Düsseldorf

MEDICA / COMPAMED 2011

Weltforum der Medizin und Internationale Fachmesse
Mit breit gefächerten Themen war das Fraunhofer ILT diesmal auf dem IVAM-Gemeinschaftsstand F19 in Halle 8a vertreten: mit dem TWISTER XS zum Kunststoffschweißen für die Mikrofluidik, einem Laserkatheter zur Behandlung von Vorhofflimmern sowie mit SLM-gefertigten metallischen und resorbierbaren Implantaten. Zudem zeigte ein weiteres Fraunhofer ILT-Team auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand F05 in Halle 10 neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Laserchirurgie und der Neuroendoskopie.

29.11. - 2.12.2011

Frankfurt/Main

EuroMold 2011

18. Weltmesse für Werkzeug- und Formenbau, Design und Produktentwicklung

Erstmals präsentierten die Forscher des Fraunhofer ILT der Öffentlichkeit auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand C66 in Halle 11 eine Werkzeugmaschine zum Laserpolieren für den Werkzeug- und Formenbau, die zusammen mit der Maschinenfabrik Arnold GmbH & Co KG, Ravensburg, und der Firma S&F, Aachen, entwickelt wurde. Experten führten mit der ausgestellten Anlage das Laserpolieren am Beispiel von Formen für die Glasherstellung live vor. Die positive Resonanz auf die Polieranlage äußerte sich auch in einer Vielzahl von Anfragen. Im Rahmen der »Allianz Generativ« war das Fraunhofer ILT mit den Themen Generatives Laserauftragschweißen und SLM gut vertreten.

3 Fraunhofer-Gemeinschaftsstand auf der Biotechnica 2011 in Hannover.

4 Fraunhofer ILT-Team auf der Photonics West 2011 in San Francisco, USA.



AUSZEICHNUNGEN UND PREISE

Ferchau-Innovationspreis 2011

Am 4. April gewann das Team um Dr. Ingomar Kelbassa den zweiten Platz des Ferchau-Innovationspreises 2011. Unter dem Motto »Das GUTE sparen - Energie, Material, Rohstoffe« zeichnete die Jury das ressourceneffiziente Laserverfahren zur Herstellung von Flugzeugturbinen aus. Mit Hilfe des generativen Laserstrahl-Auftragschweißens (Laser Metal Deposition LMD) kann der Herstellungsprozess für BLISKS und andere Turbinenbauteile erheblich beschleunigt und der Materialverlust wesentlich reduziert werden. Das Verfahren ist nun 15 Mal schneller als der Standard vor zwei oder drei Jahren. Zum anderen lassen sich jetzt auch unterschiedliche Materialdicken auf einfache Weise durch Einsatz einer neuen Zoom-Optik realisieren. Zum Projektteam »Generative Fertigung von BLISKS für Flugtriebwerke« gehören Dr. Konrad Wissenbach, Dr. Andres Gasser, Stefanie Linnenbrink, Franz Mentzel und Patrick Albus vom Fraunhofer ILT sowie Dr. Ingomar Kelbassa, Gerhard Backes, Dr. Bernd Burbaum, Johannes Witzel und Marco Goebel vom Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University. Aufseiten der Industrie sind Dr. Thomas Haubold, Dr. Andreas Kohns und Dr. Carsten Loof von Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG Mitglieder im Team.

1 Verleihung des Ferchau-Innovationspreises 2011, v.l.n.r.: Dr. Andres Gasser, Johannes Witzel, Dr. Andreas Kohns, Dr. Ingomar Kelbassa und Dr. Thomas Haubold.

NRW-Innovationspreis 2011

»Generative Fertigung metallischer Bauteile mit Selective Laser Melting SLM und Laser Metal Deposition LMD« - für diese Verfahrensentwicklungen wurden Prof. Poprawe und sein Team bestehend aus Dr. Andres Gasser, Akad. Oberrat Dr. Ingomar Kelbassa, Dr. Wilhelm Meiners und Dr. Konrad Wissenbach mit dem Innovationspreis 2011 des Landes Nordrhein-Westfalen in der Kategorie »Innovation« ausgezeichnet. Der mit 100.000 Euro dotierte Preis zählt zu den bedeutendsten deutschen Forschungspreisen und wurde am 14. November 2011 von der NRW Ministerin für Innovation, Wissenschaft und Forschung, Svenja Schulze, verliehen. Rund 500 Gäste aus Wissenschaft und Wirtschaft feierten gemeinsam mit den Preisträgern im K21 Ständehaus, Kunstsammlung Nordrhein-Westfalen, dem ehemaligen NRW-Landtag in Düsseldorf.

Das Team des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University treibt seit über 20 Jahren die Generativen Fertigungsverfahren, die für eine energie- und ressourceneffiziente Produktion stehen, voran. In diesem Bereich haben die Wissenschaftler Laserverfahren für verschiedene Werkstoffe und Anwendungen systematisch zur industriellen Reife geführt. Mit dem Selective Laser Melting können maßgeschneiderte Bauteile wie Implantate oder Funktionsbauteile für den Werkzeugbau in kleinen Stückzahlen just-in-time und wirtschaftlich in kürzester Zeit auf der Basis von 3D-Computerdatensätzen gefertigt werden.

Erst die Entwicklung des SLM am Fraunhofer ILT in Aachen erweiterte den Horizont für das Rapid Prototyping. Durch den schichtweisen Aufbau von Bauteilen ergeben sich hinsichtlich Geometriefreiheit und Funktionsintegration vollkommen neue Möglichkeiten in der Produktentwicklung. 3D-CAD-Daten lassen sich direkt in ein physisches Bauteil umsetzen. In der industriellen Fertigung werden zukünftig ganz neue



Geschäftsmodelle wie Mass Customization, Open-Innovation oder Co-Creation, bei denen der Endkunde sein gewünschtes Produkt weitgehend selbst oder mitgestalten kann, Einzug halten.

Neben dem SLM, das die Aachener Laserexperten von Beginn an entwickelt haben, treibt das Team am Fraunhofer ILT auch das Laserauftragschweißen zur Instandsetzung, Modifikation und Neuteilfertigung konsequent voran. Hauptanwendungen sind zurzeit die Instandsetzung von Flugzeugtriebwerkskomponenten oder Werkzeugen für verschiedene Branchen. Beim SLM werden komplexe und filigrane Bauteile aus einem Pulverbett heraus schichtweise durch gezielte Laserbestrahlung jener Stellen erzeugt, die später als festes Material übrig bleiben sollen. Im Gegensatz dazu entstehen Bauteile beim Laserauftragschweißen durch einen Pulverstrahl aus einer Düse, der punktuell mit einem Laserstrahl aufgeschweißt wird. Dieses Verfahren eignet sich besonders für die Herstellung großer Bauteile oder für die Instandsetzung.

Für den konsequenten Einsatz seiner Mitarbeiter bedankte sich Prof. Poprawe am 02. Dezember 2011 bei einer internen Feier. Er würdigte mit der Verleihung einer persönlichen Urkunde die Verdienste all jener Wissenschaftler, die im Bereich Generative Verfahren einen relevanten Beitrag geleistet haben.

Das Team: Patrick Albus, Gerd Backes, David Becker, Matthias Belting, Tim Biermann, Sebastian Bremen, Damien Buchbinder, André Diatlov, Dominik Dobrzanski, Ratmar Froemberg, Dr. Andres Gasser, Marco Göbel, Yves-Christian Hagedorn, Christian Hinke, Chen Hong, Lucas Jauer, Stefan Jung, Akad. Oberrat Dr. Ingomar Kelbassa, Jochen Kittel, Wolfgang Kueppers, Stefanie Linnenbrink, Dora Maischner, Dr. Wilhelm Meiners, Frank Mentzel, Sörn Ocylok, Dr. Norbert Pirch, Prof. Dr. Reinhart Poprawe M.A., Jeroen Risse, Gesa Rolink, Rui João Santos Batista, Johannes Schrage, Dr. Andreas Weisheit, Dr. Konrad Wissenbach, Johannes Witzel.

Ideenwettbewerb »Der Laserpoppnieter«

Fabian Weirauch gewann den 2. Platz des Ideenwettbewerbs »Der Laserpoppnieter«. Im Rahmen des Fraunhofer-Symposiums »Netzwerk« 2011 in München, das die Vernetzung der Fraunhofer-Institute untereinander fördert, durften an zwei Tagen jeweils 10 von 42 Bewerbern ihre Ideen präsentieren. Genau 90 Sekunden hatten sie Zeit, den 400 Teilnehmern ihr Vorhaben zu vermitteln. 20,9 Prozent stimmten für Weirauch, der damit nur knapp unter der Wertung des Erstplatzierten lag. Doch die 25.000 € Fördergeld zur Weiterführung des Projekts zeigen deutlich, dass die Teilnehmer von der Realisierbarkeit seiner Idee überzeugt sind.

Der zündende Funke kam Fabian Weirauch während seiner Diplomarbeit in den USA: Mit Hilfe maßgeschneiderter Laserstrahlquellen will er unterschiedliche Kunststoffe miteinander verbinden. Dabei entstehen Strukturen an den aneinander liegenden Flächen, die zu einer formschlüssigen Verbindung von hoher Festigkeit führen.

2 Verleihung des NRW-Innovationspreises 2011, v.l.n.r.: Prof. R. Poprawe M.A., Fraunhofer ILT; Laudator Dr. N. Arndt, Rolls-Royce plc; Akad. Oberrat Dr. I. Kelbassa, Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University; S. Schulze, NRW-Wissenschaftsministerin; Dr. A. Gasser, Fraunhofer ILT; Dr. W. Meiners, Fraunhofer ILT; Dr. K. Wissenbach, Fraunhofer ILT; Hannelore Kraft, NRW-Ministerpräsidentin.

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. Stefan Kaierle (Vorsitzender)
LZH Laser Zentrum Hannover e.V., Deutschland
- Dr. Paul Hilton
TWI, Großbritannien
- Dr. Wolfgang Knapp
CLFA, Frankreich
- Prof. Dr. Veli Kujanpää
Lappeenranta University of Technology, Finnland
- Dr. Filip Motmans
Lasercentrum Vlaanderen, Belgien
- Prof. Dr. José Luis Ocaña
Centro Láser U.P.M., Spanien
- Prof. Dr. Andreas Ostendorf
Ruhr-Universität Bochum, Deutschland

Kontakt im Fraunhofer ILT

Dr. Alexander Olowinsky
Telefon +49 241 8906-491
Fax +49 241 8906-121
contact@europeanlaserinstitute.org
www.europeanlaserinstitute.org

PHOTONAIX E.V.

KOMPETENZNETZ OPTISCHE TECHNOLOGIEN



Kurzportrait

PhotonAix, das Kompetenznetz für Optische Technologien und Systeme, wurde im Jahr 2002 auf Initiative des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT, des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT und des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen gegründet. Das Aachener Kompetenznetzwerk PhotonAix und weitere acht regionale Kompetenznetze im Bereich der Optischen Technologien verknüpfen in ihren Regionen die Kompetenzen der über 400 Mitglieder aus Forschung und Industrie mit dem gemeinsamen Ziel, die Optischen Technologien zu fördern.

Von der Lasermaterialbearbeitung über die Biophotonik bis hin zu Anwendungen in Verkehr und Raumfahrt repräsentieren die Netze die vollständige Bandbreite der Optischen Technologien »made in Germany«. Die Hauptaktivitäten und Dienstleistungsangebote der Kompetenznetze umfassen Technologiemanagement, Beratung von Start-Up-Unternehmen, regionales Technologie- und Branchenmarketing, Aus- und Weiterbildungsinitiativen sowie die intensive Förderung der Kommunikation innerhalb der Netzwerke. Durch die enge Verzahnung des Know-hows in den Regionen gelingen praxis- und zeitnahe Problemlösungen und ein schnellerer Transfer von Forschungsergebnissen in marktreife Produkte.

Aktuelle Highlights

Neben den Gemeinschaftsständen der Kompetenznetze Optische Technologien auf der Photonics West 2011 in San Jose, USA und der LASER 2011 in München standen im vergangenen Jahr die europäische Technologieplattform Photonics21 und die Mitarbeit an der NRW Clusterstrategie im Mittelpunkt.

Ziel der Technologieplattform Photonics21 ist es, die führende Rolle Europas im Bereich der Optischen Technologien weiter auszubauen und gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu koordinieren.

Die Clusterpolitik der Landesregierung Nordrhein-Westfalen fördert die Kooperation von Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Öffentlicher Hand entlang von Wertschöpfungsketten in insgesamt 16 Branchen- und Technologiefeldern.

Gemeinsam mit sieben weiteren Netzwerken wurde PhotonAix von der Landesregierung beauftragt, das Clustermanagement für das Technologiefeld »NanoMikro+Werkstoffe« aufzubauen.

Kontakt

PhotonAix e.V.
Dipl.-Phys. Christian Hinke
Geschäftsführer
Steinbachstraße 15
52074 Aachen

Telefon +49 241 8906-352
Fax +49 241 8906-121
hinke@photonaix.de
www.photonaix.de

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 rund 100 Mitglieder an.

Das Aufgabenspektrum des AKL e.V. umfasst:

- 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. Dr. Reinhart Poprawe M. A.

(stellvertr. Vorsitzender)

Dr. Bernd Schmidt (Kassenwart ab 1.1.2012)

Dipl.-Phys. Axel Bauer (Geschäftsführer)

Kontakt

Dipl.-Phys. Axel Bauer

Steinbachstraße 15

52074 Aachen

Telefon +49 241 8906-109

Fax +49 241 8906-112

info@akl-ev.de

www.akl-ev.de

FACHBÜCHER

»Lasertechnik für die Fertigung« von Reinhart Poprawe

Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur.

Inhalt

Einleitung, Das Verhalten elektromagnetischer Strahlung an Grenzflächen, Absorption von Laserstrahlung, Energietransport und Wärmeleitung, Thermomechanik, Phasenumwandlungen, Schmelzbadströmung, Laserinduziertes Verdampfen, Plasmaphysik, Laserstrahlquellen, Oberflächentechnik, Umformen, Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Fügen, Abtragen und Bohren, Schneiden, Systemtechnik, Lasermesstechnik, Ergänzungen A: Optik, B: Kontinuumsmechanik, C: Laserinduziertes Verdampfen, D: Plasmaphysik, E: Bedeutung der verwendeten Symbole und Konstanten, F: Farbbildteil, Sachverzeichnis.

2005. XVII, 526 S. 353 Abb. (VDI-Buch)

ISBN 3-540-21406-2

»Tailored Light 2« by Reinhart Poprawe

Laser Application Technology

Contents

Preface.- Introduction.- Radiation at interfaces.- Absorption of Laser Radiation.- Energy Transport and Heat Conduction.- Thermo Mechanics.- Phase Transformations.- Melt Flow.- Laser Induced Vaporization.- Plasma Physics. - Laser Beam Sources. - Surface Treatment.- Forming.- Rapid Prototyping & Rapid Tooling.- Joining.- Ablation.- Drilling.- Cutting.- System Technology.- Laser Measurement Technology.- Appendix.- Subject index. 2011.

2011. 1st Edition. XVI, 605 p. 350 illus. in color. Hard cover (RWTH edition)

ISBN: 978-3-642-01236-5

Bestelladresse

Springer Kundenservice

Haberstraße 7

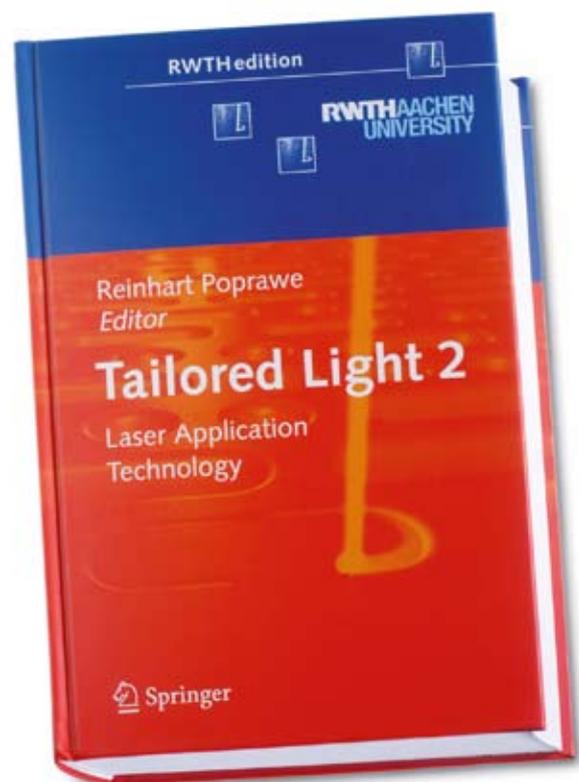
69126 Heidelberg

Telefon +49 6221 345-0

Fax +49 6221 345-4229

SDC-bookorder@springer-sbm.com

www.springer.de



INFORMATIONSSERVICE

Wenn Sie mehr Informationen über die Forschungs- und Entwicklungsleistungen des Fraunhofer ILT wünschen, nutzen Sie unseren Internet-Service unter www.ilt.fraunhofer.de. Sie können das Informationsmaterial ebenfalls mithilfe des vorliegenden ausgefüllten Abschnitts anfordern.

Imagebroschüre
»Partner der Innovatoren« deutsch englisch

Jahresbericht 2011 **JB 2010** **JB 2009**
(englische Versionen online unter www.ilt.fraunhofer.de)

Tagungsband des International Laser Technology Congress AKL'12
 Informationsbroschüre »European Laser Institute ELI« (englisch)
 Informationsflyer »Arbeitskreis Lasertechnik AKL e.V.«
 Fachbuch »Lasertechnik für die Fertigung«
 Fachbuch »Tailored Light 2«

Themenbroschüren

Biofabrication (englisch)
 Faserlaser deutsch englisch
 Festkörperlaser deutsch englisch
 In-Volume Micro Structuring of Transparent Materials (englisch)
 In-Volume Micro Structuring with Femtosecond Lasers (englisch)
 Laserbearbeitungsverfahren für Faserverbundkunststoffe
 deutsch englisch
 Laser Cleaning (englisch)
 Laser in Biotechnik und Medizin deutsch englisch
 Laser in der Kunststofftechnik deutsch englisch
 Laser in der Photovoltaik deutsch englisch
 Laserstrahlschneiden deutsch englisch
 Laserstrahlschweißen metallischer Werkstoffe
 deutsch englisch
 Lasertechnik für Instandsetzung und Funktionalisierung
 deutsch englisch
 Mikrofügen mit Laserstrahlung deutsch englisch
 Mikro- und Nanostrukturierung mit Laserstrahlung
 deutsch englisch

Modellierung und Simulation deutsch englisch
 Nichtlineare Optik und abstimmbare Laser
 deutsch englisch
 Optik-Design und Diodenlaser deutsch englisch
 Packaging deutsch englisch
 Polieren mit Laserstrahlung deutsch englisch
 Qualitätssicherung in der Lasermaterialbearbeitung
 deutsch englisch
 Prozesssensorik in der Lasermaterialbearbeitung
 deutsch englisch
 Rapid Manufacturing deutsch englisch
 Selektives Laserätzen von Glas und Saphir
 deutsch englisch
 Systemtechnik für das pulverbasierte Laserauftragschweißen
 deutsch englisch
 Systemtechnik für die Lasermaterialbearbeitung
 deutsch englisch
 Thin Film Laser Processing (englisch)
 Ultrakurzpulslaser deutsch englisch
 Varioclad - Laserauftragschweißen mit variabler Spurbreite
 deutsch englisch
 Wärmebehandlung mit Laserstrahlung deutsch englisch

Absender

Name, Vorname _____
Firma _____
Abteilung _____
Straße _____
PLZ/Ort _____
Telefon _____
Fax _____
E-Mail _____

bitte faxen an:
Fraunhofer ILT, Stefanie Flock
Fax +49 241 8906-121

IMPRESSUM

Redaktion

Dipl.-Phys. Axel Bauer (verantw.)
Stefanie Flock

Gestaltung und Produktion

Dipl.-Des. Andrea Croll
www.andrea-croll.de

Druck

Druckspektrum
Hirche-Kurth GbR, Aachen
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

Änderungen bei Spezifikationen und anderen technischen
Angaben bleiben vorbehalten.

Alle Rechte vorbehalten.
Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung der Redaktion.

© Fraunhofer-Institut
für Lasertechnik ILT, Aachen 2012

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

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

info@ilt.fraunhofer.de
www.ilt.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

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

info@ilt.fraunhofer.de
www.ilt.fraunhofer.de