Fraunhofer
ILT

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR LASERTECHNIK ILT

JAHRESBERICHT 2012

JAHRESBERICHT DES FRAUNHOFER-INSTITUTS FÜR LASERTECHNIK ILT 2012

Selbst hervorragend inszinierte Siegerehrungen und Preisverleihungen verblassen gegen das Gefühl, als Erster über die Ziellinie gekommen zu sein. So wie im sportlichen Umfeld verhält es sich auch im Wettbewerb um neueste Innovationen. Wenn nach jahrelanger Forschungs- und Entwicklungstätigkeit die Früchte zum Tragen kommen und die ersten Rekordergebnisse vorliegen, ist das Erfolgserlebnis der beteiligten Ingenieure und Wissenschaftler am intensivsten. Die Auszeichnungen und Preise, die gegebenenfalls danach folgen, sind dann noch das i-Tüpfelchen – in der Regel mit großer Breitenwirkung.

Auch die Mitarbeiter des Fraunhofer ILT durften sich in diesem Jahr gleich dreimal über Auszeichnungen erfreuen. Mit dem Wissenschaftspreis des Stifterverbandes 2012 wurde ein Team des Fraunhofer ILT, des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik, der RWTH Aachen, der EdgeWave GmbH, der JENOPTIK Laser GmbH und der AMPHOS GmbH für die Entwicklung ultrakurzer Laserpulse ausgezeichnet. Der Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2012 ging an ein Team des Fraunhofer ILT, IOF und IWS für die Entwicklung und Optimierung der Strahlungsquellen und der Kollektor-, Beleuchtungs- und Projektionsoptiken für das extrem kurzwellige EUV-Licht. Schließlich liefen dreizehn Mitarbeiter des Fraunhofer ILT und der Ausgründungen EdgeWave und Amphos im September als Projektgruppe »InnoSlab Laser« in die Zielgerade des Berthold Leibinger Innovationspreises für angewandte Lasertechnologie ein.

Alle Beteiligten haben die Anerkennung der Photonik-Community genossen. Aber das lässt uns nicht ruhen. Denn wir wissen, dass der eigentliche Ansporn in der ständigen Erneuerung steckt. Und hier haben wir in den kommenden Jahren noch viel vor. Unsere Visionen haben wir in einem intensiven Strategieaudit mit externen Vertretern aus Wirtschaft und Wissenschaft diskutiert. Das Ergebnis war bereichernd.

Einer unserer Schwerpunkte ist »Digital Photonic Production« – also die intelligente Verknüpfung von photonbasierten Fertigungsprozessen mit vorgelagerten Planungsprozessen inklusive Design und Konstruktion und nachgelagerten Produktions- und Logistikprozessen zur flexiblen Fertigung individualisierter oder komplexer Produkte. Dass wir mit diesem Thema über den RWTH Lehrstuhl als eines von 10 Gewinnern aus der BMBF Förderinitiative »Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen« hervorgegangen sind, gibt uns den richtigen Rückenwind. Mit bis zu 2 Mio €/Jahr Unterstützung werden wir langfristig am Standort Aachen zusammen mit unseren Industriepartnern auf allen Ebenen der grundlegenden und angewandten Forschung Digital Photonic Production systematisch vorantreiben. In dieser Disziplin wird es allerdings keine ersten Plätze geben. Alle sind Gewinner. Wir glauben an die Möglichkeit und den Beginn der Ära der »Stimulierten Innovation«. Sie sind herzlich willkommen, dabei zu sein!

Mit besten Wünschen

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 Excellenzcluster »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer«
34 RWTH Aachen Campus
36 Digital Photonic Production

Ausgewählte Forschungsergebnisse

39 Laser und Optik
61 Lasermaterialbearbeitung
115 Medizintechnik und Biophotonik
123 Lasermesstechnik und EUV-Technologie

130 Patente
131 Dissertationen
132 Diplomarbeiten
133 Bachelorarbeiten
133 Masterarbeiten
134 Wissenschaftliche Veröffentlichungen
141 Vorträge
148 Kongresse und Seminare
154 Messebeteiligungen
156 Auszeichnungen und Preise
158 European Laser Institute ELI
159 Arbeitskreis Lasertechnik AKL e.V.
160 Fachbücher
161 Informations-Service
162 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 Garanten 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 400 Mitarbeitern und 11.000 m^2 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, Löten, 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 wirtschafliche 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 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.

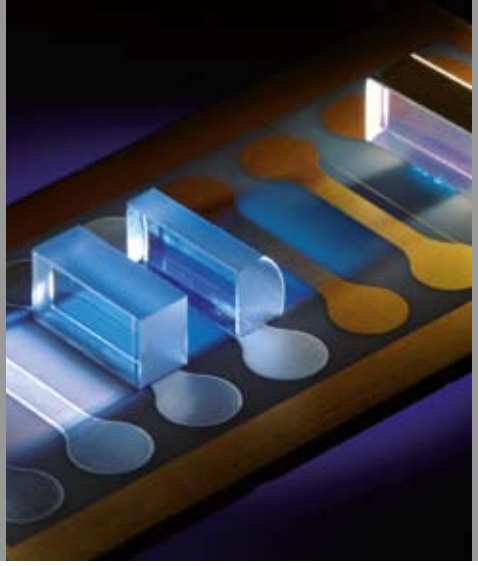
Darüber hinaus bietet das Technologiefeld hohe Kompetenz bei Strahlformung und Strahlführung, dem Packaging optischer Hochleistungskomponenten und dem Design optischer Komponenten. Auch die Auslegung hocheffizienter Freiformoptiken zählt zu den Spezialitäten der Experten.
Die Anwendungsgebiete der entwickelten Laser und Optiken reichen von der Lasermaterialbearbeitung und der Messtechnik über Beleuchtungsapplikationen und Medizintechnik bis hin zum Einsatz in der Grundlagenforschung.

LASERMATERIAL-BEARBEITUNG

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

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

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



MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK

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

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

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

LASERMESSTECHNIK UND EUV-TECHNOLOGIE

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

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

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

LEISTUNGSANGEBOTE

	Ansprechpartner	*E-Mail-Adresse*	*Tel.-Durchwahl*
LASER UND OPTIK			
Optikdesign	Dipl.-Ing. M. Traub Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	martin.traub@ilt.fraunhofer.de hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -342 Tel. -206
Diodenlaser	Dipl.-Ing. M. Traub Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	martin.traub@ilt.fraunhofer.de hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -342 Tel. -206
Festkörperlaser	Dipl.-Phys. M. Höfer Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	marco.hoefer@ilt.fraunhofer.de hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -128 Tel. -206
Ultrakurzpulslaser	Dr. P. Rußbüldt Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	peter.russbueldt@ilt.fraunhofer.de hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -303 Tel. -206
Faserlaser	Dipl.-Phys. O. Fitzau Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	oliver.fitzau@ilt.fraunhofer.de hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -442 Tel. -206
UV-, VIS- und abstimmbare Laser	Dr. B. Jungbluth Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	bernd.jungbluth@ilt.fraunhofer.de hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -414 Tel. -206
Packaging	Dipl.-Ing. M. Leers Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	michael.leers@ilt.fraunhofer.de hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -343 Tel. -206
Freiformoptiken	A. Bäuerle M.Sc. Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	axel.baeuerle@ilt.fraunhofer.de hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -597 Tel. -206
Modellierung und Simulationstools	Dr. R. Wester Dipl.-Ing. H.-D. Hoffmann	rolf.wester@ilt.fraunhofer.de hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de	Tel. -401 Tel. -206
LASERMATERIALBEARBEITUNG			
Laserschneiden	Dr. F. Schneider Dr. D. Petring	frank.schneider@ilt.fraunhofer.de dirk.petring@ilt.fraunhofer.de	Tel. -426 Tel. -210
Laserschweißen	Dipl.-Ing. M. Dahmen Dr. D. Petring	martin.dahmen@ilt.fraunhofer.de dirk.petring@ilt.fraunhofer.de	Tel. -307 Tel. -210

Löten	Dr. A. Olowinsky Dr. A. Gillner	alexander.olowinsky@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -491 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
Prozess- und Strahlüberwachung	Dipl.-Ing. P. Abels Dr. A. Gillner	peter.abels@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -428 Tel. -148
Maschinen- und Steuerungstechnik	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.uchtmann@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	Dr. I. Kelbassa Dr. A. Gillner	ingomar.kelbassa@ilt.fraunhofer.de arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de	Tel. -143 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. W. Schulz	jens.schuettler@ilt.fraunhofer.de wolfgang.schulz@ilt.fraunhofer.de	Tel. -680 Tel. -204

MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK

Bioanalytik	Dr. C. Janzen Priv.-Doz. Dr. R. Noll	christoph.janzen@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -124 Tel. -138
Lasermikroskopie	Dr. C. Janzen Priv.-Doz. Dr. R. Noll	christoph.janzen@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -124 Tel. -138
Klinische Diagnostik	Dr. A. Lenenbach Priv.-Doz. Dr. R. Noll	achim.lenenbach@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -124 Tel. -138
Mikrochirurgische Systeme	Dr. A. Lenenbach Priv.-Doz. 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 Priv.-Doz. Dr. R. Noll	volker.sturm@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -154 Tel. -138
Materialanalytik	Dr. C. Fricke-Begemann Priv.-Doz. 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 Priv.-Doz. Dr. R. Noll	patrick.werheit@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -308 Tel. -138
Umwelt und Sicherheit	Dr. C. Fricke-Begemann Priv.-Doz. Dr. R. Noll	cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -196 Tel. -138
EUV-Technologie	Dr. K. Bergmann Priv.-Doz. Dr. R. Noll	klaus.bergmann@ilt.fraunhofer.de reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de	Tel. -302 Tel. -138

INSTITUTSSTRUKTUR

INSTITUTSLEITUNG

Prof. Dr. Reinhart Poprawe M.A.
Institutsleiter

Prof. Dr. Peter Loosen
stellvertretender Institutsleiter

VERWALTUNG UND STABSSTELLEN

Dr. Vasvija Alagic MBA
Verwaltung und Infrastruktur

Dipl.-Phys. Axel Bauer
Marketing und Kommunikation

Dr. Alexander Drenker
Qualitätsmanagement

Dr. Bruno Weikl
IT-Management

KOMPETENZFELDER

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

Dr. Arnold Gillner
Abtragen und Fügen

Dr. Konrad Wissenbach
Generative Verfahren
und funktionale Schichten

Priv.-Doz. Dr. Reinhard Noll
Messtechnik und EUV-Strahlquellen

KURATORIUM UND GREMIEN

Kuratorium

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

- Dr. Norbert Arndt, Rolls-Royce plc
- C. Baasel (Vorsitzender), Carl Baasel Lasertechnik GmbH
- Dr. Hans Eggers, Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
- Dr. Thomas Fehn, Jenoptik AG
- Dr. Ulrich Hefter, Rofin-Sinar Laser GmbH
- Dr. U. Jaroni, ThyssenKrupp Stahl AG
- Dipl.-Ing. Volker Krause, Laserline GmbH
- Prof. 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 27. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 12. September 2012 im Fraunhofer ILT in Aachen statt.

Institutsleitungsausschuss ILA

Der Institutsleitungsausschuss ILA berät die Institutsleitung und wirkt bei der Entscheidungsfindung über die Grundzüge der Forschungs- und Geschäftspolitik des Instituts mit.

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

Arbeitsschutzausschuss ASA

Der Arbeitsschutzausschuss ASA ist für die Lasersicherheit und alle anderen sicherheitstechnischen Fragen im Fraunhofer ILT zuständig. Mitglieder des Ausschusses sind:
Dr. Vasvija Alagic MBA, K. Bongard, M. Brankers, A. Hilgers, A. Lennertz, Dr. W. Neff, E. Neuroth, Dipl.-Ing. H.-D. Plum, Prof. R. Poprawe, B. Theisen, F. Voigt, Dipl.-Ing. N. Wolf, Dr. R. Keul (Berufsgenossenschaftlicher Arbeitsmedizinischer Dienst BAD).

Wissenschaftlich-Technischer Rat WTR

Der Wissenschaftlich-Technische Rat WTR der Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt und berät die Organe der Gesellschaft in wissenschaftlich-technischen Fragen von grundsätzlicher Bedeutung. Ihm gehören die Mitglieder der Institutsleitungen und je Institut ein gewählter Vertreter der wissenschaftlich-technischen Mitarbeiter an.

Mitglieder im Wissenschaftlich-Technischen Rat sind:
Prof. R. Poprawe, Dr. A. Olowinsky, Dipl.-Ing. H-D. Plum.

Betriebsrat

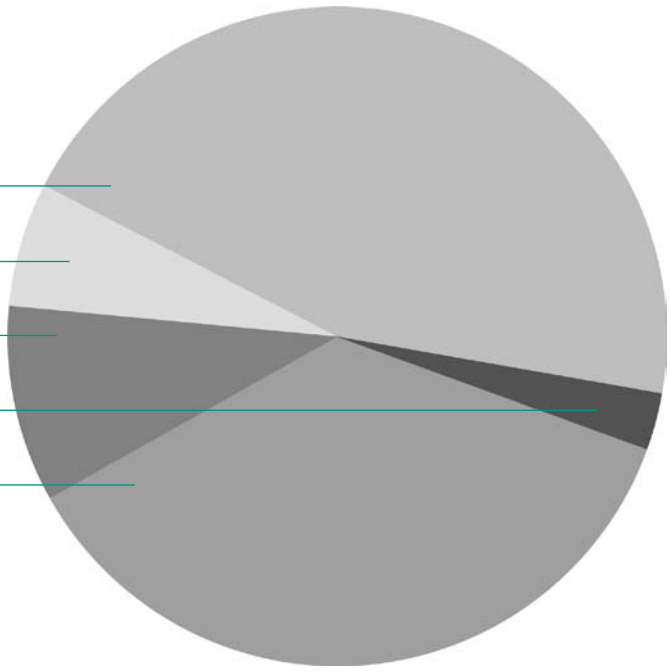
Der Betriebsrat wurde im März 2003 von den Mitarbeitern des Fraunhofer ILT und des Lehrstuhls für Lasertechnik LLT gegründet. Mitglieder sind:
Dipl.-Ing. P. Abels, M. Brankers, Dipl.-Ing. A. Dohrn, C. Hannemann, M. Janssen, Dipl.-Phys. A. Temmler, B. Theisen (Vorsitz), Dr. A. Weisheit, Dipl.-Ing. N. Wolf.

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

MITARBEITER

Mitarbeiter am Fraunhofer ILT 2012	Anzahl
Stammpersonal	**205**
- Wissenschaftler und Ingenieure	143
- Mitarbeiter der technischen Infrastruktur	38
- Verwaltungsangestellte	24
Weitere Mitarbeiter	**189**
- wissenschaftliche Hilfskräfte	178
- externe Mitarbeiter	5
- Auszubildende	6
Mitarbeiter am Fraunhofer ILT, gesamt	**394**

- 10 Mitarbeiter haben ihre Promotion abgeschlossen.
- 46 Studenten haben ihre Diplom-, Master- oder Bachelorarbeit am Fraunhofer ILT durchgeführt.



AUFWENDUNGEN UND ERTRÄGE

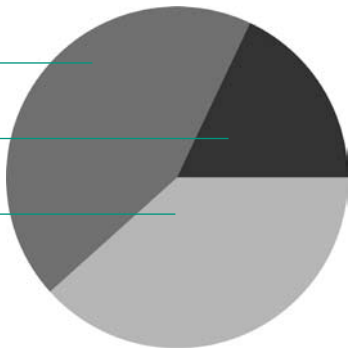
Aufwendungen 2012	**Mio €**
- Personalaufwendungen	14,0
- Sachaufwendungen	16,3
Aufwendungen Betriebshaushalt	**30,3**
Investitionen	**6,7**

Erträge 2012	**Mio €**
- Erträge aus der Industrie	14,1
- Zusatzfinanzierung durch Bund, Länder und EU	12,0
- Grundfinanzierung durch die Fraunhofer-Gesellschaft	4,2
Erträge Betriebshaushalt	**30,3**
Investitionserträge aus der Industrie	**0,4**
Fraunhofer Industrie ρ_{Ind}	**47,9 %**

44 % Sachaufwendungen

18 % Investitionen

38 % Personalaufwendungen

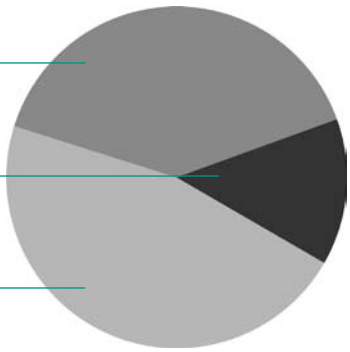


(100 % Betriebshaushalt und Investitionen)

40 % Zusatzfinanzierung durch Bund, Länder und EU

14 % Grundfinanzierung durch die Fraunhofer-Gesellschaft

46 % Erträge aus der Industrie (ohne Investitionen)

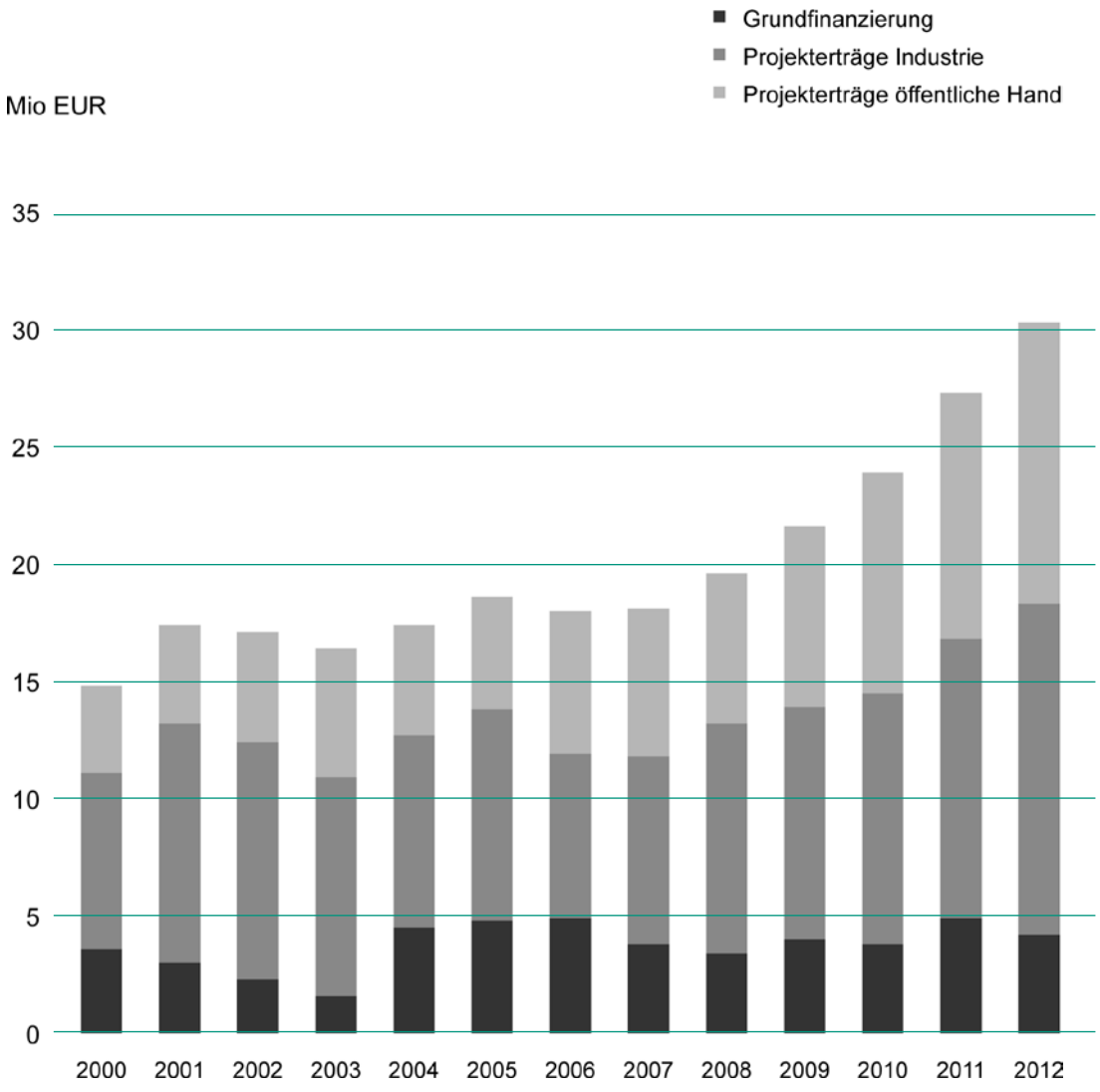


(100 % Betriebshaushalt)

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

BETRIEBSHAUSHALT

Die Graphik verdeutlicht die Entwicklung des Betriebshaushalts in den letzten 13 Jahren.



KUNDENREFERENZEN

ZWIESEL KRISTALLGLAS

***Stand Februar 2013**. 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 Anlaufrisikos (Werkvertrag)
- Firmen mit Gaststatus und eigenen Labors und Büros am Fraunhofer ILT (spezielle Kooperationsverträge)
- Firmen mit Niederlassungen im Campus der RWTH Aachen und Kooperation mit dem Fraunhofer ILT über den Cluster »Digital Photonic Production«

Durch Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen und spezialisierten Unternehmen bietet das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT auch bei fachübergreifenden 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 Metallographielabor, 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:

- CO_2-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
- Fünfachsige Portalanlagen
- Dreiachsige 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 Strahldiagnose 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 m^2.

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 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 Festkörperlasern vergleichbar machen. Die kontinuierlichen Arbeiten der letzten 10 Jahre auf diesem Gebiet haben zu innovativen Designs und neuen Aufbautechniken geführt, die eine dreifache Steigerung der Strahlintensität und damit eine deutliche Erweiterung des Einsatzfelds von Diodenlasern in der Materialbearbeitung ermöglichen. Die patentierte Technologie wurde an Direct Photonics Industries Berlin lizensiert, die die weitere Kommerzialisierung der Hochleistungsdiodenlaser übernimmt.

Kostengünstige Fertigungsverfahren für alternative Energieerzeugung und -speicherung werden in Kooperation mit der University of Michigan entwickelt. Der Schwerpunkt liegt auf Solarzellen und auf Lithium-Ionen Batterien. Laserinduzierte Trenn- und Fügeverfahren, auch für artungleiche Werkstoffe und Werkstoffverbünde, 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. Im Bereich generativer Fertigung bilden neue Bearbeitungsköpfe mit Mehrstrahltechnik und Diodenlasereinsatz einen Entwicklungsschwerpunkt. Ziel ist es, schwer schweißbare Legierungen durch optimierte Temparturführung mit hoher Qualität aufzutragen.

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 fünf Projekte ausgewählt,

zu denen neuartige Energie- und Leistungsspeicher, deren kostengünstige Herstellung, Redox-Batterien sowie dynamische 3D-Diagnostik von Verbrennungsprozessen gehörten. Im Laufe des Projekts wurden von den Partnern mehr als $ 500.000 Drittmittel eingeworben und Projektanträge von mehr als $ 20 Mio 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 Energie- 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- und CO_2-Laser sowie Diodenlaser stehen für Prozessentwicklungen in der Mikrotechnik zur Verfügung.

Aufwendungen 2012

	Mio US $
Betriebshaushalt	**1,8**
- Personalaufwendungen	1,1
- Sachaufwendungen	0,7

Kundenreferenzen

- DARPA
- Department of Energy
- U.S. Air Force Research Laboratories
- U.S. Army Research Laboratory
- State of Michigan
- Dow
- Ford
- General Motors
- Magna
- Federal Mogul
- Medtronic
- SolarWorld
- Procter & Gamble
- Roche

Ansprechpartner

Hans J. Herfurth
Direktor (ab 01.12.2012)

Telefon +1 734-738-0503
Fax +1 734 354-3335
hherfurth@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 CARNOT 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 war die CLFA 2012 am Fraunhofer-Gemeinschaftsstand der JEC Composites in Paris vertreten sowie auf der MICRONORA in Besancon und der nationalen Laserkonferenz JNPLI in Mulhouse.

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 von MINES ParisTech 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

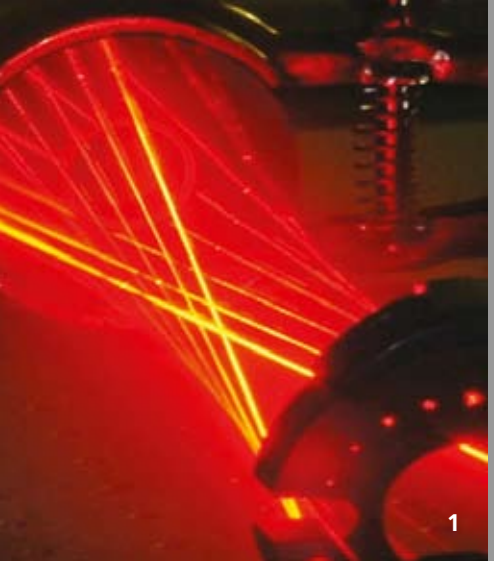
- Paris – im Zentrum von Paris in der École Nationale Supérieure des Mines de Paris, MINES ParisTech.
- Evry – ca. 40 km südlich von Paris in den Räumen des Centre des Matériaux Pierre-Marie Fourt.

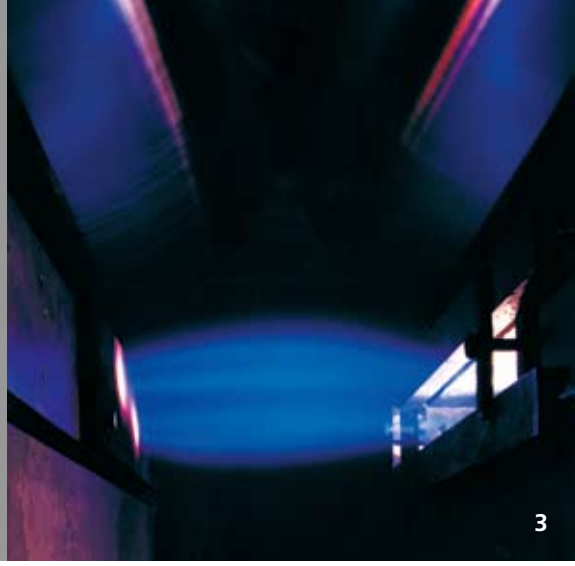
Ansprechpartner

Dr. Wolfgang Knapp
Direktor

Telefon +33 1 4051-9476
Fax +33 1 4634-2305
wolfgang.knapp@ilt.fraunhofer.de

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





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

4

5

6

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 laserbasierten 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 66 Institute und selbstständige Forschungseinrichtungen. Rund 22 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,9 Milliarden Euro. Davon fallen 1,6 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 entwickeln 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 aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

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

Die Forschungsgebiete

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

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

Die Zielgruppen

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

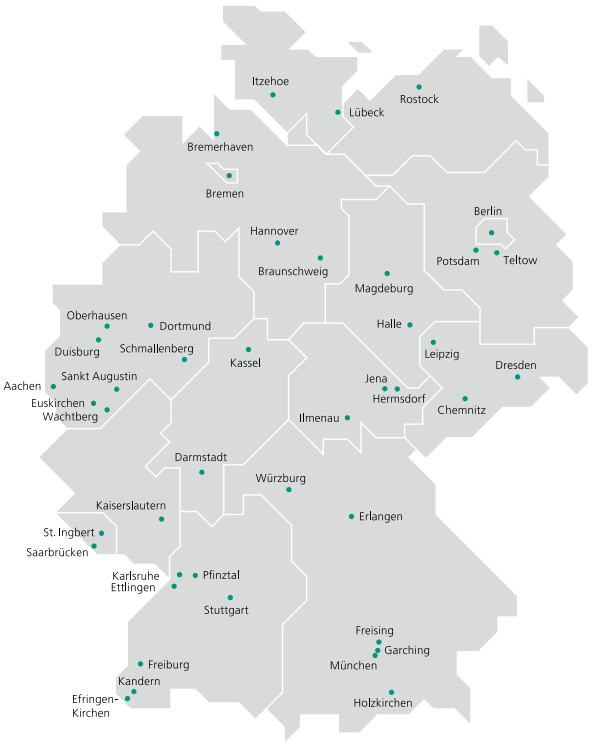
- Die Wirtschaft: Kleine, mittlere und große Unternehmen in der Industrie und im Dienstleistungssektor profitieren durch Auftragsforschung. Die Fraunhofer-Gesellschaft entwickelt konkret umsetzbare, innovative Lösungen und trägt zur breiten Anwendung neuer Technologien bei. Für kleine und mittlere Unternehmen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

Das Leistungsangebot

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

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

Die Standorte der Forschungseinrichtungen



LASERTECHNIK AN DER RWTH AACHEN

GEMEINSAM ZUKUNFT GESTALTEN

Die RWTH Aachen bietet mit den Lehrstühlen für Lasertechnik LLT und für Technologie Optischer Systeme TOS sowie den Lehr- und Forschungsgebieten Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD, Experimentalphysik Nano-Optik und Metamaterialien sowie Experimentalphysik des Extrem-Ultraviolett EUV ein herausragendes Kompetenzcluster im Bereich der Optischen Technologien. Dies ermöglicht eine überkritische Bearbeitung grundlegender und anwendungsbezogener Forschungsthemen. Die enge Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT erlaubt nicht nur industrielle Auftragsforschung auf der Basis solider Grundlagenkenntnisse sondern führt vielmehr zu neuen Impulsen in der Weiterentwicklung von optischen Verfahren, Komponenten und Systemen. Unter einem Dach werden die Synergien von Infrastruktur und Know-how aktiv genutzt.

Dies kommt insbesondere dem wissenschaftlichen und technischen Nachwuchs zugute. Die Kenntniss der aktuellen industriellen und wissenschaftlichen Anforderungen in den Optischen Technologien fließt unmittelbar in die Gestaltung der Lehrinhalte ein. Darüber hinaus können Studenten und Promovierende über die Projektarbeit in den 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 fünf Lehrstühle und das Fraunhofer ILT Zukunft gestalten.

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT

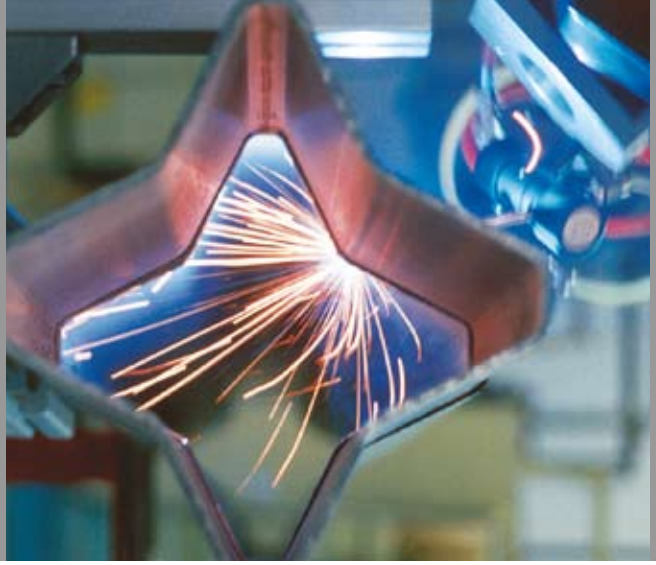
Der Lehrstuhl für Lasertechnik ist seit 1985 an der RWTH Aachen in der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung in den Bereichen Ultrakurzpulsbearbeitung, 3D-Volumenstrukturierung, Bohren, generative Verfahren und integrative Produktion tätig.

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

Kontakt

Prof. Reinhart Poprawe M. A. (Leiter des Lehrstuhls)
Telefon +49 241 8906-109
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 Festkörperlasern wird beipielsweise durch Koppeloptiken und Homogenisatoren für das Pumplicht bestimmt. Ein weiteres Forschungsthema sind Freiformoptiken für die innovative Strahformung.
Im Bereich Hochleistungsdiodenlaser werden mikro- und makrooptische Komponenten entwickelt und zu Systemen kombiniert. Weiterhin werden Montagetechniken optimiert.

Kontakt

Prof. Peter Loosen (Leiter des Lehrstuhls)
Telefon +49 241 8906-162
peter.loosen@tos.rwth-aachen.de

Lehr- und Forschungsgebiet für Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD

Das 2005 gegründete Lehr- und Forschungsgebiet für Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD erforscht die Grundlagen der optischen Technologien mit Schwerpunkt auf Modellbildung und Simulation für die Anwendungsbereiche Makroschweißen und -schneiden, Präzisionsbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern und PDT in der Zahnmedizin sowie Dermatologie.

Technische Systeme werden durch Anwendung und Erweiterung mathematisch-physikalischer und experimenteller Methoden untersucht. Mit der Analyse mathematischer Modelle werden ein besseres Verständnis dynamischer Zusammenhänge erreicht und neue Konzepte für die Verfahrensführung gewonnen. In Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT werden die Ergebnisse für Partner aus der Industrie umgesetzt.

Im Vordergrund der Ausbildungsziele steht die Vermittlung einer wissenschaftlichen Methodik zur Modellbildung anhand praxisnaher Beispiele. Die Modellbildung wird durch die experimentelle Diagnose der Laser-Fertigungsverfahren und die numerische Berechnung von ausgewählten Modellaufgaben geleitet. Mit den Hinweisen aus der Diagnose und der numerischen Berechnung wird eine mathematisch begründete Reduktion der Modellgleichungen durchgeführt. Die Lösungseigenschaften der reduzierten Gleichungen sind vollständig in den Lösungen der Ausgangsgleichungen enthalten und weisen keine unnötige Komplexität auf.

Kontakt

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

LASERTECHNIK AN DER RWTH AACHEN

Lehr- und Forschungsgebiet Experimentalphysik Nano-Optik und Metamaterialien

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

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

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

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

Kontakt

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

Lehr- und Forschungsgebiet Experimentalphysik des Extrem-Ultraviolett EUV

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

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

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

Kontakt

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

EXZELLENZCLUSTER

Exzellenzcluster
»Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer«

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

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

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

Produktion in Hochlohnländern

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

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

1

Cluster

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

Mehr als 100 Unternehmen, davon 18 internationale Key-Player, haben sich zusammen mit 30 Lehrstühlen der RWTH Aachen University zu einer langfristigen Kooperation auf dem RWTH-Campus in Melaten verpflichtet. In der ersten Phase sollen bis 2015 acht bis zehn Gebäudekomplexe mit insgesamt 60.000 m² Bruttogrundfläche in den folgenden sechs Clustern entstehen:

- Cluster Integrative Produktionstechnik
- Cluster Logistik
- Cluster Schwerlastantriebstechnik
- Cluster Digital Photonic Production
- Cluster Bio-Medizintechnik
- Cluster Nachhaltige, umweltfreundliche Energietechnik

Leiter des Clusters Digital Photonic Production ist Prof. Reinhart Poprawe M.A. vom Fraunhofer ILT bzw. vom Lehrstuhl für Lasertechnik LLT.

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

Ansprechpartner

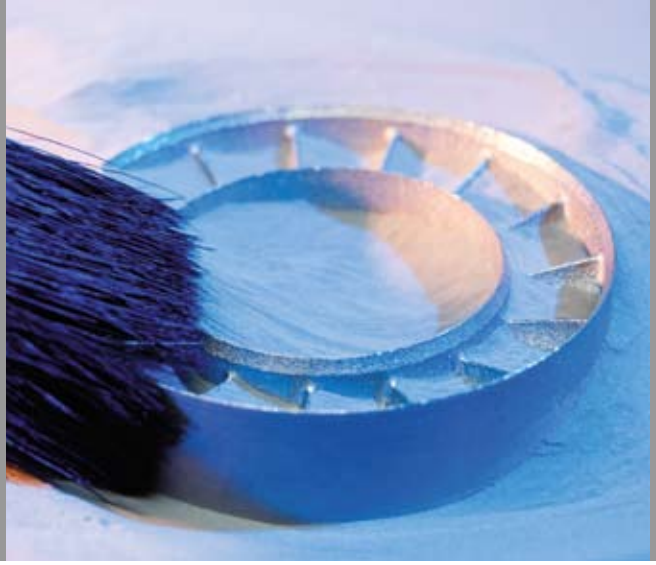
Cluster Digital Photonic Production
Dipl.-Phys. Christian Hinke
Telefon +49 241 8906-352
christian.hinke@ilt.fraunhofer.de

2

1 RWTH Aachen Campus I - Westbahnhof, Skizze: RKW Rhode Kellermann Wawrowsky, Düsseldorf.

2 RWTH Aachen Campus II - Melaten, Skizze: rha reicher haase + associierte, Aachen.

DIGITAL PHOTONIC PRODUCTION



Digital Photonic Production – die Zukunft der Produktion

Mit dem Thema Digital Photonic Production hat sich das Fraunhofer ILT eine zentrale Fragestellung der Produktionstechnik von morgen auf die Fahne geschrieben. Digital Photonic Production erlaubt die direkte Herstellung von nahezu beliebigen Bauteilen oder Produkten aus digitalen Daten. Verfahren, die vor über zehn Jahren für das Rapid Prototyping erfunden wurden, entwickeln sich zu Rapid Manufacturing Verfahren zur direkten Produktion von Funktionsbauteilen. Aktuell werden Rapid Manufacturing Verfahren in ersten Pilotanlagen im Automobilbau und in der Luftfahrtindustrie für die industrielle Serienfertigung erprobt. Das Werkzeug Laser nimmt dabei wegen seiner einzigartigen Eigenschaften eine zentrale Rolle ein. Kein anderes Werkzeug kann annähernd so präzise dosiert und gesteuert werden.

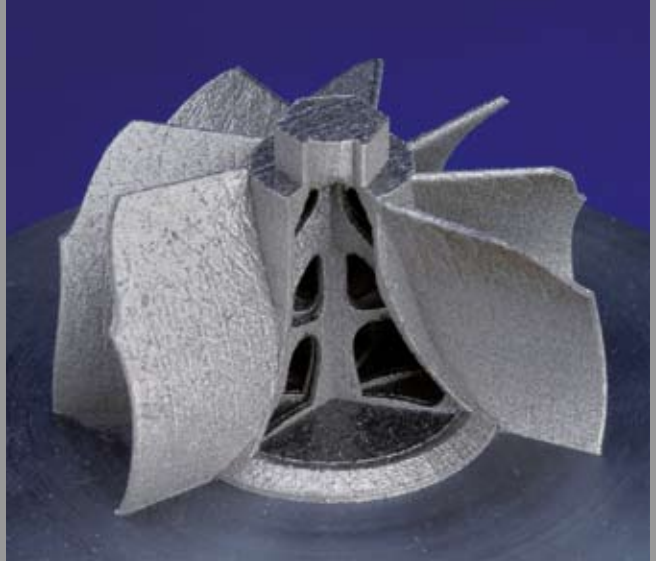
Mass-Customization

Digital Photonic Production geht dabei weit über laserbasierte generative Fertigungsverfahren hinaus. Neue Hochleistungs-Ultrakurzpulslaser ermöglichen zum Beispiel einen sehr schnellen und nahezu materialunabhängigen Abtrag. Bis hinein in den Nanometerbereich können so feinste funktionale 3D-Strukturen erzeugt werden. Im Zusammenhang mit diesen neuen Technologien wird teilweise von einer neuen industriellen Revolution gesprochen. Im Wesentlichen beruht dieses revolutionäre technologische Potenzial auf einer fundamentalen Änderung der Kostenfunktion für laserbasierte Fertigungsverfahren. Im Unterschied zu konventionellen Verfahren können mit dem Werkzeug Laser sowohl kleine Stückzahlen als auch komplexe Produkte in kleinster Dimension, aus verschiedensten Materialien und mit kompliziertesten Geometrien kostengünstig gefertigt werden. Um dieses Potenzial von Digital Photonic Production vollständig zu nutzen, müssen Prozessketten ganzheitlich betrachtet werden. Die Neuauslegung von industriellen Prozessketten reicht dabei von vor- und nachgelagerten Fertigungsschritten über das Bauteildesign bis zu völlig neuen Geschäftsmodellen wie Mass-Customization oder Open-Innovation.

Forschungscampus »Digital Photonic Production«

Genau diese ganzheitliche Betrachtung ist jetzt im neuen BMBF-Forschungscampus »Digital Photonic Production« in Aachen möglich. Im Rahmen der Förderinitiative »Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF wird der Aachener Campus in den kommenden 15 Jahren mit bis zu 2 Millionen Euro pro Jahr nachhaltig gefördert.

Der Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University ging als Koordinator eines Antragskonsortiums als einer von 10 Gewinnern aus dem nationalen Wettbewerb hervor. Mehr als 30 Unternehmen und wissenschaftliche Institute werden im Rahmen dieser neuen Initiative gemeinsam unter kontinuierlicher Einbindung neuer Partner unter einem Dach an grundlegenden Forschungsfragen arbeiten. Mit dem Forschungscampus »Digital Photonic Production« steht der Industrie und Wissenschaft in Aachen ein schlagfertiges Instrument zur Gestaltung der Zukunft der Produktionstechnik zur Verfügung.



Maßgeschneiderte Produkte in Serie

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

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

Individualität und Co-Creation

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

From bits to photons to atoms

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

FORSCHUNGSERGEBNISSE 2012

Ausgewählte Forschungsergebnisse
aus den Technologiefeldern des Fraunhofer ILT

- Laser und Optik 39 - 60
- Lasermaterialbearbeitung 61 - 114
- Medizintechnik und Biophotonik 115 - 122
- Lasermesstechnik und EUV-Technologie 123 - 129

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.

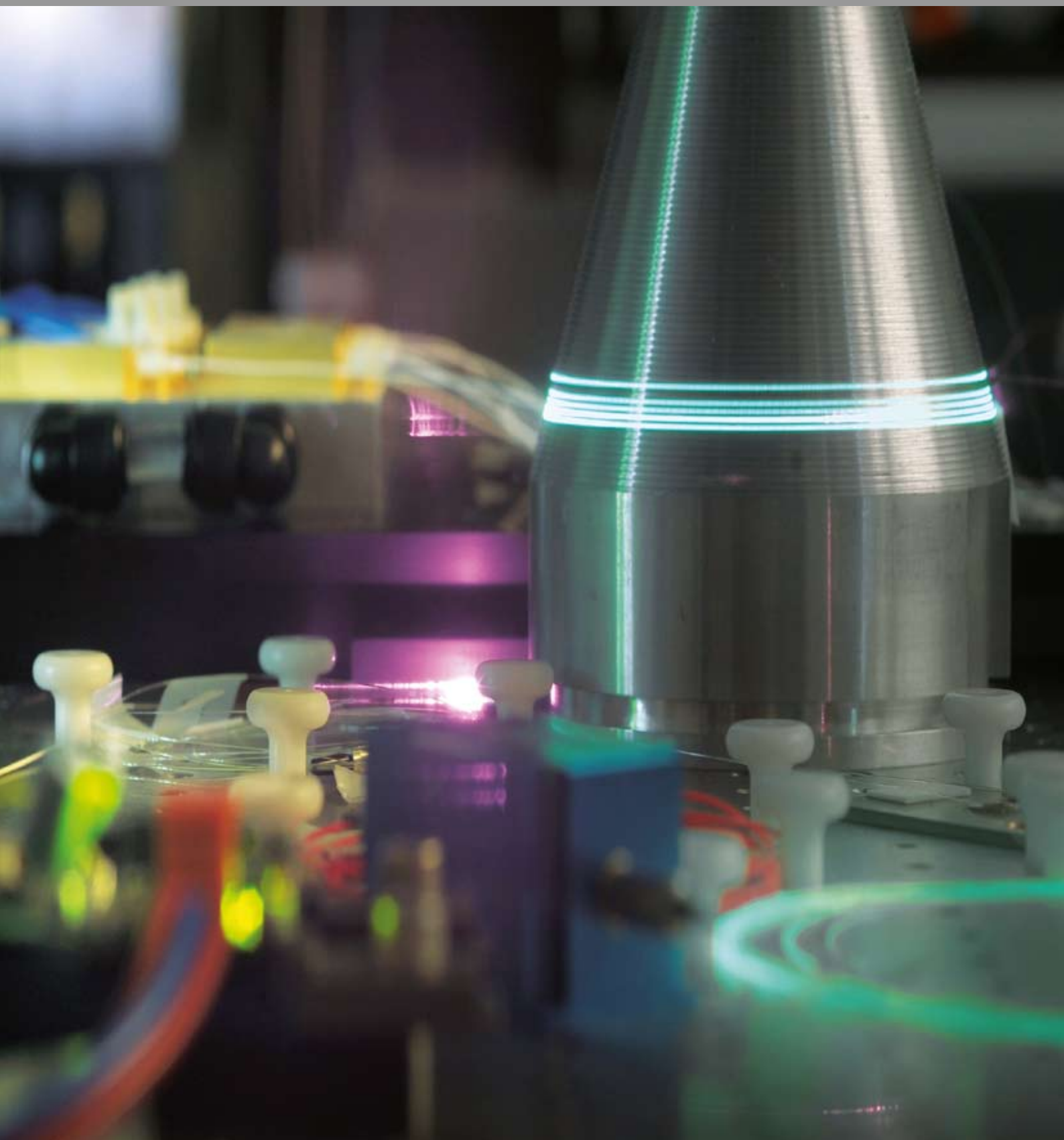
TECHNOLOGIEFELD
LASER UND OPTIK

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.

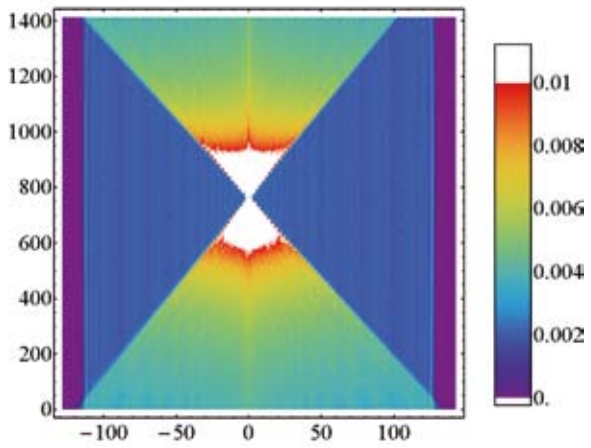
LASER UND OPTIK



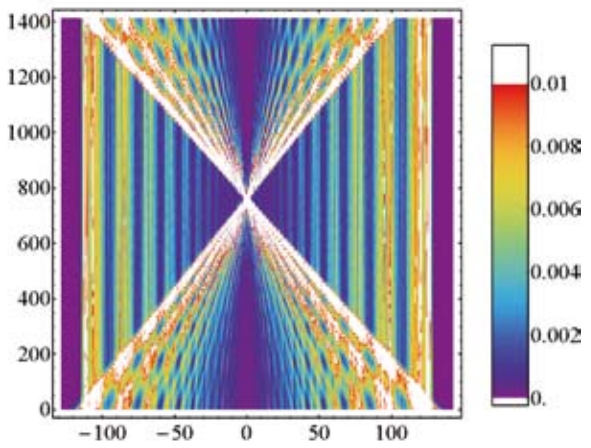
INHALT

Modellierung und Simulation instabiler Laser-Resonatoren	42
Optiksimulation bei thermischen Aberrationen	43
Freiformflächen für Straßenleuchten	44
Entwicklung von Kunststoff-Freiformoptiken für die automobile Beleuchtung	45
Mechanisch und thermisch stabile Mikrooptikmontage mittels Löttechnik	46
Reflow-Lötprozess für Laserkristalle	47
Thermomechanisch robuste Pockelszelle	48
Umwelttests an Laserkomponenten	49
Algorithmen zur automatisierten Justage mikrooptischer Komponenten	50
Brillante Diodenlasermodule im roten Spektralbereich	51
Tm:YLF-INNOSLAB-Laser mit 200 W bei 2 µm	52
Single-frequency Er:YLuAG-Laser bei 1645 nm für ein Methan-LIDAR	53
Kompakte Laser für flugzeuggestützte LIDAR-Systeme	54
Diodengepumpter Alexandrit-Laser	55
Abstimmbarer UV-Laser für den Flugeinsatz	56
Inverses Laserbohren zur Herstellung von Faserpreformen	57
Faraday-Isolator für Faserlaser hoher Leistung	58
Diodengepumpte gewinngeschaltete Faserlaser	59
Faserverstärker mit einstellbarer Pulsform	60

Faserverstärker mit einstellbarer Pulsform.



1



2

MODELLIERUNG UND SIMULATION INSTABILER LASER-RESONATOREN

Aufgabenstellung

Aufgrund der zunehmend größeren Leistungen für die Anwendungen zur Materialbearbeitung bei gleichzeitig brillanter Strahlqualität haben sich für Gaslaser zwei Konzepte für Multi-kW-Systeme in der Industrie durchgesetzt: die mehrfache Faltung stabiler Resonatoren und instabile Resonatoren. Der Vorteil instabiler Resonatoren liegt in der besonders guten Ausnutzung des aktiven Mediums. Die Analyse der Dynamik bei verschiedenen Betriebszuständen (transientes Verhalten, Anfahren, Leistungsmodulation, Leistungsskalierung) ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Vorgehensweise

Zur Erklärung, Vorhersage und Steuerung der zeitlich veränderlichen Laserleistung und der Intensitätsverteilung transient betriebener Multi-kW-Systeme wurde eine Simulation entwickelt, welche die Strahlverteilung im Resonator, den Einfluss räumlich und zeitlich verteilter Größen der Strahlung im Resonator und des aktiven Mediums beschreiben kann.

Ergebnis

Die Beschreibung instabiler Resonatoren ist beinahe ausschließlich durch numerische Berechnungen möglich, da keine analytischen Lösungen für diesen Resonatortyp existieren. Aufgrund der oft anzutreffenden fraktalen Eigenschaften der Eigenmoden solcher Resonatoren ergeben sich spezifische numerische Herausforderungen bei der Berechnung der Moden (numerische Auflösung, Konvergenz etc.).

Anwendungsfelder

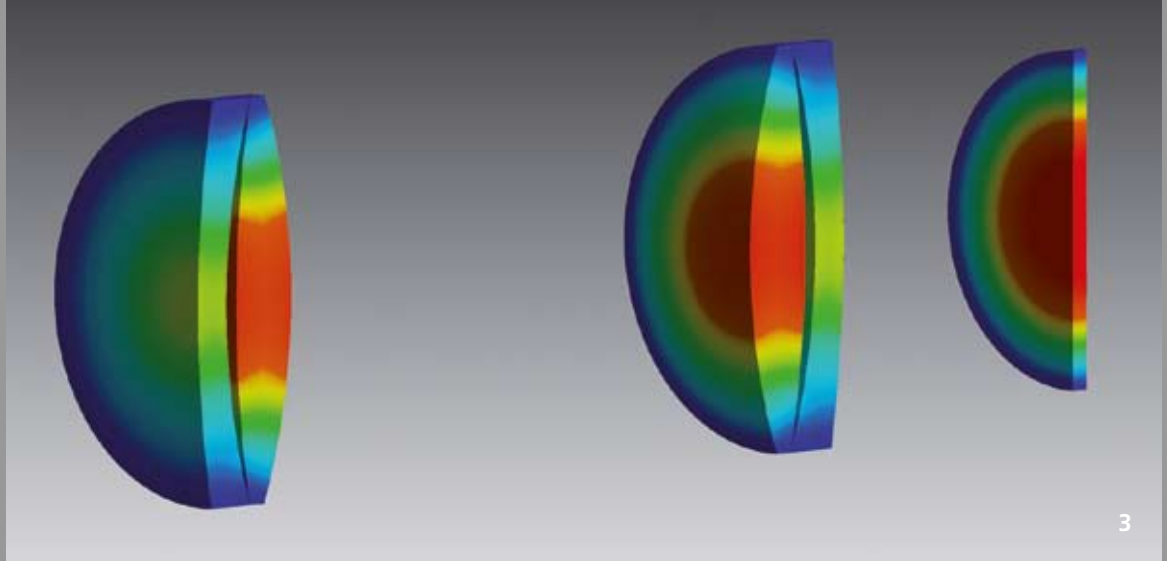
Die vorgestellte Modellierung und Simulation eignet sich insbesondere für die Strahlungspropagation in instabilen Resonatoren und kann daher zur Optimierung heute vorhandener Multi-kW-Systeme zur Materialbearbeitung sowohl im cw-Betrieb als auch im gepulsten Betrieb angewandt werden.

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

Intensitätsverteilung des 1. Modes (Bild 1) und des 50. Modes (Bild 2) eines instabilen Resonators.



OPTIKSIMULATION BEI THERMISCHEN ABERRATIONEN

Aufgabenstellung

Thermisch inhomogene Einflüsse in optischen Systemen (Temperaturprofil, Deformation, Spannungsverteilungen), beispielsweise durch lokale Absorption von Laserstrahlung, können zu einer signifikanten Änderung der optischen Eigenschaften und damit zu einer Reduzierung der Abbildungsleistung führen. Zur Auslegung optischer Systeme wird heute leistungsfähige Raytracing-Software genutzt, die eine Optimierung der Systemeigenschaften ermöglicht. Allerdings können thermisch inhomogene Effekte derzeit nur unzureichend simuliert werden, sodass eine Erweiterung der Fähigkeiten der Optiksimulation notwendig ist. Ziel ist, die Möglichkeit einer durchgängigen thermooptischen Simulation zu schaffen, die eine Analyse und Optimierung thermisch aberrierter Systeme ermöglicht.

Vorgehensweise

Eine Kopplung von thermischer und optischer Simulation wird durch ein Interface zwischen den Softwarepaketen Ansys (FE-Methode) und Zemax (Raytracing) erreicht. Die thermische Simulation (FE) basiert dabei auf Absorptionsgraden, die im Raytracing berechnet werden. Nach einem Approximationsschritt kann im Raytracing der veränderte Strahlverlauf unter Berücksichtigung thermischer Effekte analysiert werden.

Ergebnis

Durch die Erweiterung und Verbesserung der Approximationsverfahren kann die Simulation sowohl für symmetrische als auch asymmetrische Lasten und Temperaturverteilungen angewendet werden. Damit wird eine Analyse thermisch hochbelasteter Lasersysteme ermöglicht, die neben der Fokusverschiebung auch eine Untersuchung höherer Aberrationen erlaubt und eine Kompensation in Aussicht stellt.

Anwendungsfelder

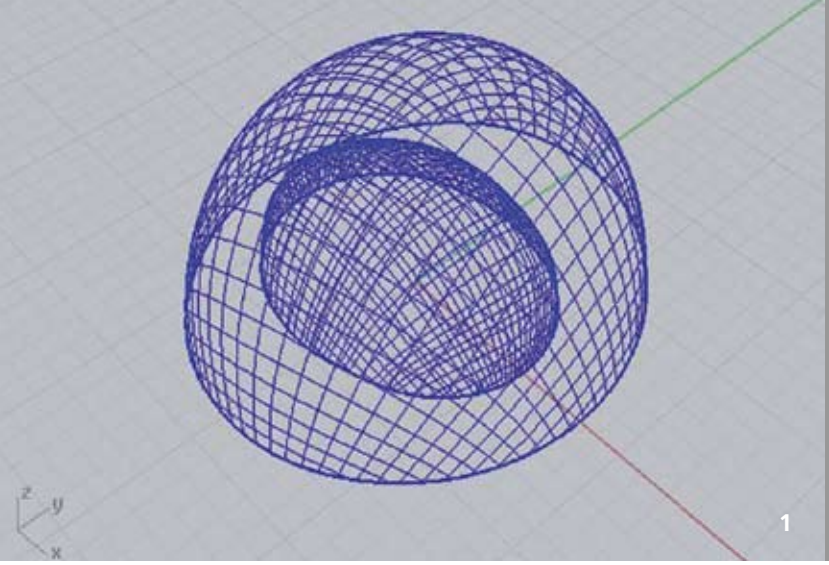
Diese Simulationskopplung erlaubt neben Betrachtungen im Bereich der Lasertechnik auch weitere Anwendungsfelder wie beispielsweise die Beleuchtungstechnik. Gleichzeitig ist die Funktionalität nicht auf thermische Effekte beschränkt und kann prinzipiell bei allen inhomogenen Effekten ausgeweitet werden, welche die Brechzahl beeinflussen. Dazu zählen Spannungsverteilungen durch thermische oder mechanische Lasten, aber auch die Simulation von Inhomogenitäten bei Kunststofflinsen durch den Spritzgussprozess.

Ansprechpartner

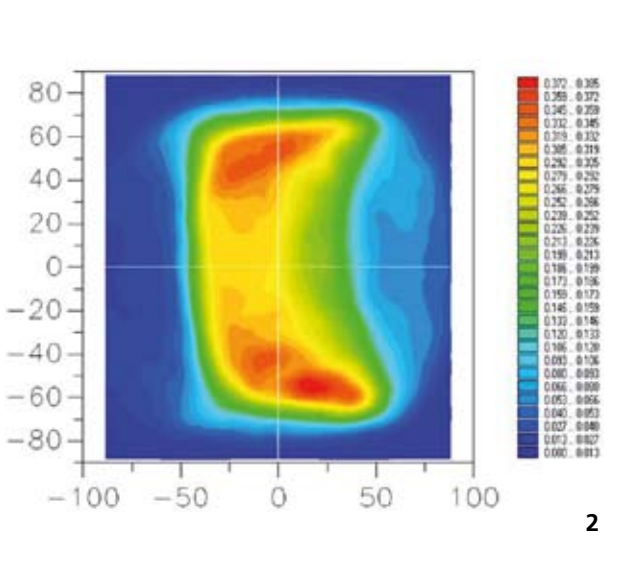
Dipl.-Wirt.-Ing. Alexander Gatej
Telefon +49 241 8906-614
alexander.gatej@ilt.fraunhofer.de

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

3 Thermooptische Simulation einer Laseroptik.



1



2

FREIFORMFLÄCHEN FÜR STRASSENLEUCHTEN

Aufgabenstellung

Straßenleuchten müssen die gesetzlichen Vorgaben in Bezug auf Helligkeit erfüllen, dabei aber nicht nur bei der Installation, sondern insbesondere während des Betriebs kostengünstig sein. Zu nennen sind hier neben den Wartungs- vor allem Energiekosten. Aufgabe war, eine Straßenleuchte zu entwickeln, die die gesetzlichen Vorgaben erfüllt bei gleichzeitig möglichst geringem Energieverbrauch.

Vorgehensweise

Die gesetzlichen Vorgaben fordern insbesondere eine Mindesthelligkeit über den gesamten beleuchteten Bereich. Da bei herkömmlichen Leuchten die Helligkeit direkt unter der Leuchte deutlich größer ist als in den Randbereichen, muss, um die Mindesthelligkeit überall zu gewährleisten, im Mittelbereich in Leuchtennähe sehr viel mehr Licht und damit Energie aufgewendet werden. Mithilfe einer Kombination aus hocheffizienten LEDs und Freiformoptiken kann das Licht wesentlich gleichförmiger auf Straße und Gehweg verteilt werden.

Ergebnis

Im Rahmen des Projekts wurden Algorithmen entwickelt und implementiert, mit denen die in Bild 1 gezeigte Freiformlinse designed wurde. Diese Linse ermöglicht, die notwendige Lichtleistung und damit den Energieaufwand nahezu zu halbieren. Bild 2 zeigt die Intensitätsverteilung im Winkelraum. Auf Straße und Gehweg ergibt sich hieraus eine weitgehend homogene Verteilung.

Anwendungsfelder

Die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Algorithmen zum optischen Freiformdesign können vorteilhaft in allen Beleuchtungsbereichen eingesetzt werden, wie zum Beispiel Innenbeleuchtung oder Fahrzeugbeleuchtung.

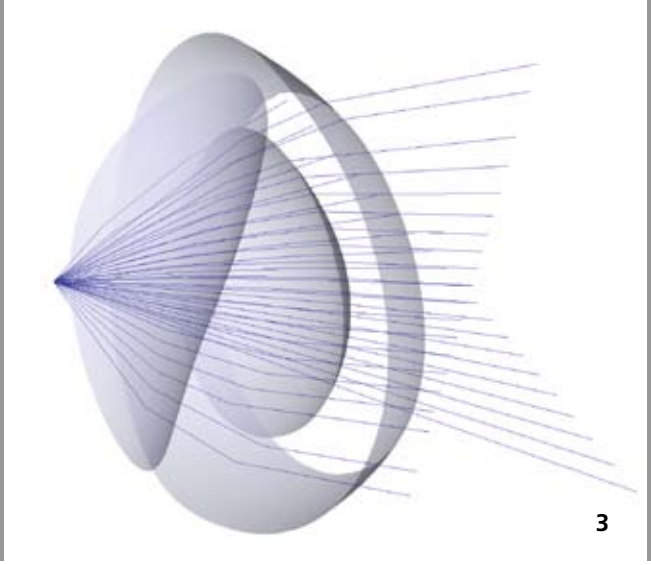
Die Arbeiten wurden vom BMBF im Rahmen des Vorhabens »OptiLight« (FKZ 02 PO 2464) gefördert.

Ansprechpartner

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

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

1 CAD-Modell der Freiformlinse für den Einsatz als Straßenleuchte.
2 Simulierte Intensitätsverteilung im Winkelraum, realisiert durch Freiformlinse.



3

4

ENTWICKLUNG VON KUNSTSTOFF-FREIFORMOPTIKEN FÜR DIE AUTOMOBILE BELEUCHTUNG

Aufgabenstellung

Optiken aus Kunststoff weisen im Vergleich zu Glasoptiken ein geringeres Gewicht und die Möglichkeit der kostengünstigen Massenfertigung durch Spritzgießen auf, wodurch auch eine wesentlich größere Flexibilität bei der Gestaltung der optischen Flächen ermöglicht wird. Bei der Herstellung von Kunststoffoptiken sind Restriktionen, die aus dem Spritzgussprozess resultieren, zu berücksichtigen. Ziel ist die Minimierung von Bauraum und Gewicht sowie in Verbindung mit effizienten LED-Lichtquellen die Minimierung der Leistungsaufnahme der automobilen Beleuchtung.

Vorgehensweise

Konventionelle Optiken für die automobile Beleuchtung, die zum Beispiel bei Abblendlicht und Nebelscheinwerfer eingesetzt werden, bilden meistens einen Shutter auf die Fahrbahn ab, um eine gute Ausleuchtung zu gewährleisten, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Dies ermöglicht zwar eine scharfe Hell-Dunkel-Grenze, limitiert allerdings die Effizienz der Optik, da durch den Shutter ein Teil des emittierten Lichts abgeschattet wird. Freiformoptiken erlauben eine Transformation der von LEDs emittierten Winkelverteilung in eine gewünschte Zielverteilung ohne Abschattung, sodass die Effizienz der ausgelegten Optik maximiert werden kann. Durch die Kombination von zwei Freiformoptiken an der Eintritts- und Austrittsfläche kann darüber hinaus die Bauteilgeometrie an die Anforderungen des Spritzgussprozesses optimal angepasst werden.

Ergebnis

Ein erster Demonstrator für ein Nebellicht mit zwei Freiformflächen wurde optimiert und vom Projektpartner HELLA im Hinblick auf die gesetzlichen Vorgaben für die Leuchtdichteverteilung erfolgreich qualifiziert. Bei einem zweiten Demonstrator, der als Spritzgussbauteil hergestellt wird, wird neben dem Nebellicht als weitere lichttechnische Funktion das Tagfahrlicht integriert, wobei eine Effizienz von 60 Prozent erreicht wird.

Anwendungsfelder

Die entwickelten Algorithmen zur simultanen Optimierung mehrerer Freiformoptiken können in allen Bereichen der Beleuchtungstechnik angewendet werden, bei denen bei gegebener Ausgangsverteilung eine applikationsangepasste Zielverteilung gewünscht ist, z. B. Straßenbeleuchtung sowie Innen- und Außenarchitektur.

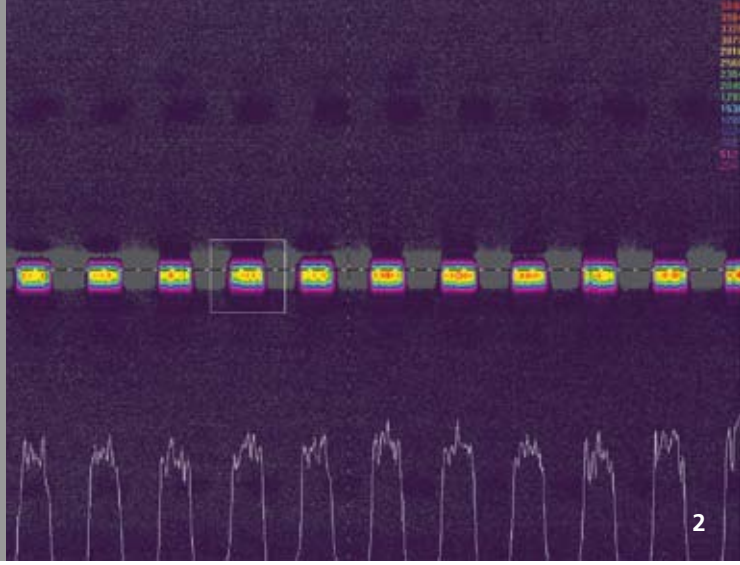
Die Arbeiten werden vom BMBF im Rahmen des Vorhabens »AutoLight« (FKZ 13N10832) gefördert.

Ansprechpartner

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

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hoffmann
Telefon +49 241 8906-206
hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de

3 Raytracing-Modell der Freiform-Nebellichtoptik.
4 Realisierter Prototyp der Freiform-Nebellichtoptik.



MECHANISCH UND THERMISCH STABILE MIKROOPTIKMONTAGE MITTELS LÖTTECHNIK

Aufgabenstellung

Für den Einsatz von Diodenlasermodulen unter extremen Umweltbedingungen mit großen mechanischen und thermischen Beanspruchungen werden stabile Fügetechniken für die Montage von Mikrooptiken benötigt. Aus diesem Grund soll die Montage der FAC (Fast Axis Collimation)-Linse für Diodenlaserbarren mittels Widerstandslöttechnik untersucht werden. Neben der Anpassung der am Fraunhofer ILT entwickelten Löttechnologie liegt ein besonderes Augenmerk auf der Montagegenauigkeit und dem Verhalten der FAC-Linse während des thermischen Wechsellastzyklus von -30 °C bis +50 °C.

Vorgehensweise

Aufgrund der Verwendung von herkömmlichen Laserbarren, Wärmesenken und FAC-Linsen muss für die durchzuführenden Untersuchungen die Löttechnologie für die Montage der FAC-Linsen angepasst werden. Dazu werden sowohl die Peripherie als auch die Prozesse so modifiziert, dass das Löten in vertikaler Position ermöglicht wird. Die für das Widerstandslöten notwendige Keramik wird an der Wärmesenke angebracht. Anschließend wird die FAC-Linse auf der Keramik aktiv ausgerichtet und verlötet. Die Strahleigenschaften (Größe und Position der Emitter) werden dabei mithilfe einer Kamera bestimmt. Überschreitet die Abweichung der Spotgröße nach dem Erstarren des Lotes die vorgegebene Toleranz (> 10 Prozent), kann die Verbindung aufgeschmolzen und die Linse erneut justiert werden.

Ergebnis

Die am Fraunhofer ILT entwickelte Montagetechnologie für FAC-Linsen gewährleistet eine thermomechanisch stabile Verbindung. Die Änderung der Strahleigenschaften durch die Erstarrung des Lotes beträgt etwa 1 Prozent. Die thermischen Wechsellastzyklen wurden erfolgreich durchlaufen.

Anwendungsfelder

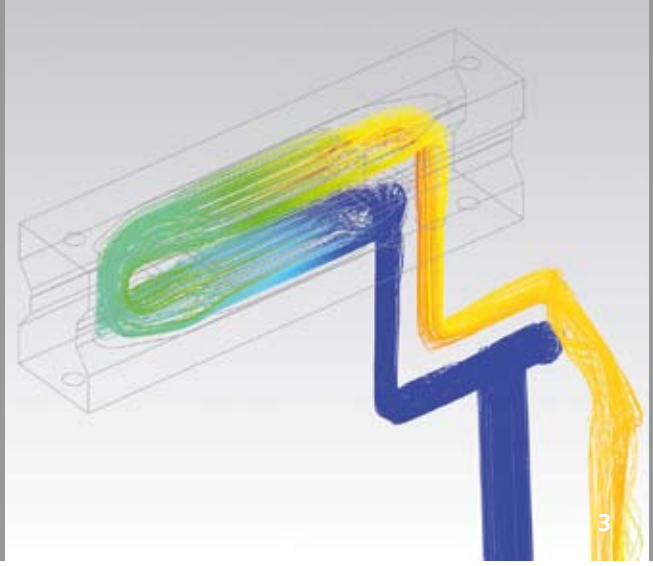
Das beschriebene Verfahren zur Montage von FAC-Linsen eignet sich neben dem Einsatz in optischen Systemen für die Luft- und Raumfahrt auch für industriell eingesetzte Pumpmodule von Festkörperlasern, wie sie z. B. in der Medizintechnik und der Materialbearbeitung Verwendung finden. Des Weiteren weist die Technologie ein großes Potenzial hinsichtlich automatisierter Montage auf.

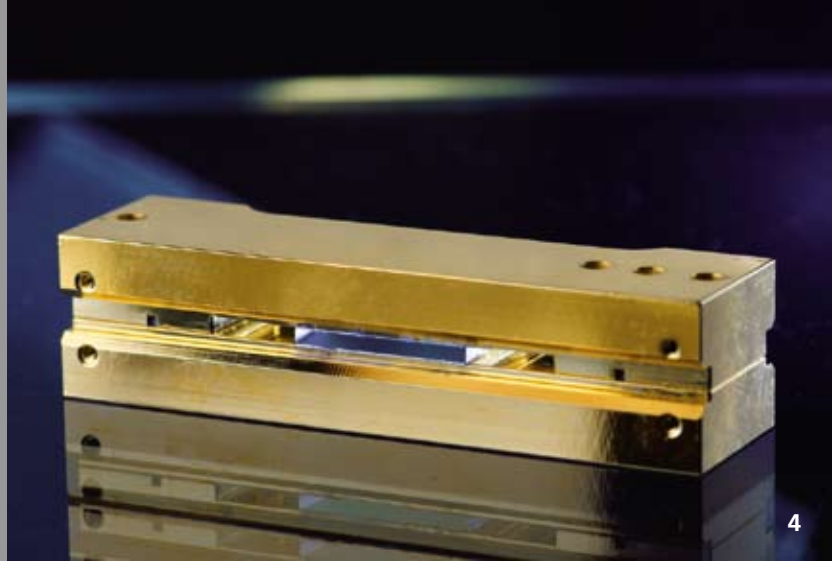
Ansprechpartner

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

1 Vor dem Diodenlaserbarren montierte FAC-Linse (experimenteller Aufbau).
2 Kamerabild der Emitter nach dem Temperaturzyklustest.





REFLOW-LÖTPROZESS FÜR LASERKRISTALLE

Aufgabenstellung

Laserkristalle stellen das Herzstück eines jeden Festkörperlasers dar. Für die steigenden Anforderungen hinsichtlich Strahlqualität, Pump- und Ausgangsleistung, thermischer Stabilität und Robustheit hat eine zuverlässige und gut wärmeleitende Verbindung von Kristall und Wärmesenke eine zentrale Bedeutung. Insbesondere zur Steigerung der thermischen Belastbarkeit und Langzeitstabilität werden Klemm- bzw. Klebetechniken durch Reflowlöten ersetzt. Das Verfahren soll für unterschiedliche Kristalltypen geeignet sein.

Vorgehensweise

Unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Kristallmaterialien wie Yttrium-Aluminium-Granat (z. B.: Nd:YAG oder Yb:YAG) oder Yttrium-Vanadat (z. B. Nd:YVO_4) werden aktiv oder passiv gekühlte Wärmesenken eingesetzt und hinsichtlich einer homogenen Kühlung mit niedrigem thermischen Widerstand optimiert. Der im Fraunhofer ILT entwickelte Reflow-Lötprozess erzeugt dabei das thermische Interface zwischen Kristall und metallischem Fügepartner. Die Prozesskette, bestehend aus Lotapplikation, Metallisierung der Komponenten und Lötprozess, wird aufgabenspezifisch abgestimmt und definiert.

Ergebnis

Ein flussmittelfreies Lötverfahren wurde insbesondere zur Montage von quaderförmigen Kristallen (= Slab) entwickelt. Die Ergebnisse wurden auf verschiedene Kristallgeometrien und Anwendungen übertragen. Auf diese Weise werden zuverlässige Verbindungen mit hoher Wärmeleitung erzeugt. Eine mechanische Verspannung der Laserkristalle kann vermieden werden. In Temperaturzyklustests konnte die Zuverlässigkeit der Verbindung in einem Bereich von -30 °C bis +50 °C nachgewiesen werden. Mit auf diese Weise gekühlten Yb:YAG-Laserkristallen mit den Abmessungen 10 x 10 x 1 mm^3 wurde beispielsweise eine mittlere Laserleistung von mehr als 700 W erzielt. Als Kühlinterface dienen dabei die 10 x 1 mm^2 großen Flächen.

Anwendungsfelder

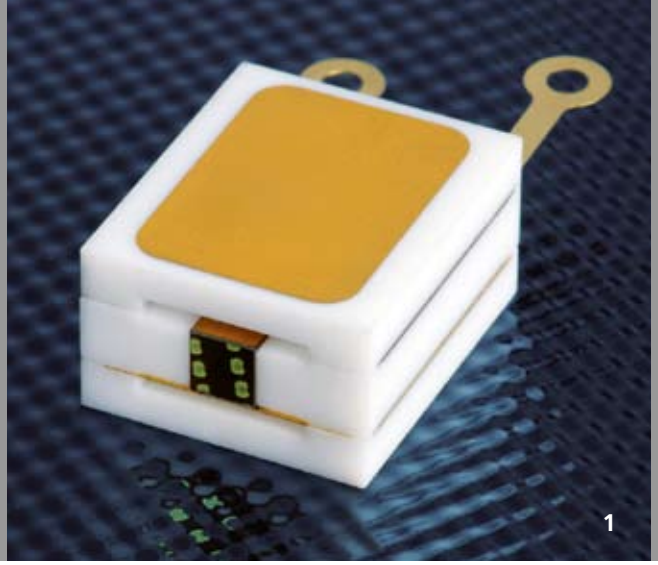
Mittels Reflow-Lötprozess hergestellte Laserkristallmodule werden in Laseroszillatoren und -verstärkern für Festkörperlaser, d. h. sowohl für Hochleistungs-Ultrakurzpulslaser als auch in LIDAR-Strahlquellen für Luft- und Raumfahrtanwendungen eingesetzt. Das vorhandene Know-how zur flussmittelfreien, spannungsarmen und robusten Löttechnologie kann auch für die Befestigung anderer thermisch und mechanisch belasteter Komponenten eingesetzt werden.

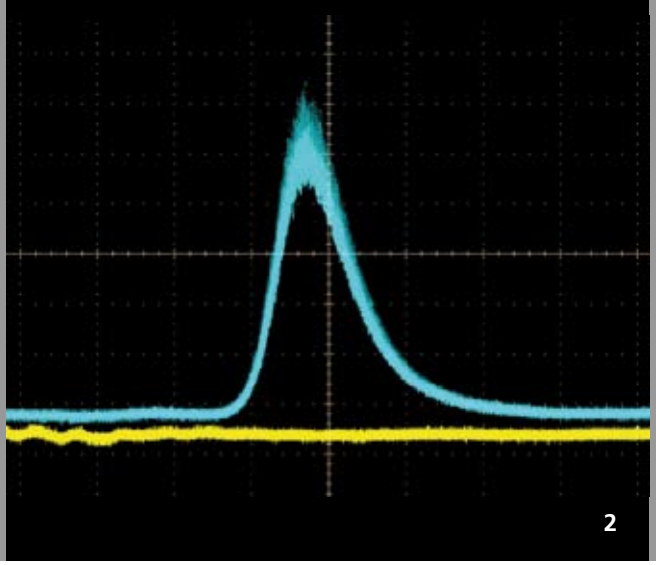
Ansprechpartner

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

3 Kühlkreislauf im Laserkristallmodul.
4 Gelötetes Laserkristallmodul.





THERMOMECHANISCH ROBUSTE POCKELSZELLE

Aufgabenstellung

Der Einsatz in LIDAR-Systemen für die Atmosphärenforschung erfordert mechanisch und thermisch stabile Laserkomponenten. Die Montage der Pockelszellenkristalle ist aufgrund der optischen, elektrischen und thermomechanischen Randbedingungen besonders anspruchsvoll. Die Montage des Pockelszellenmoduls soll mittels eines Lötverfahrens untersucht werden. Eine besondere Herausforderung stellen unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten entlang der Kristallebenen (α_{11}/α_{33} = 1/9) dar. Das Montagekonzept soll thermische Wechsellasten von -30 °C bis +50 °C ermöglichen.

Vorgehensweise

Die Belastung des BBO-Kristalls während der Lötung und des Temperaturzykluses wird durch elastische Ausführung der tragenden Strukturen reduziert. Dazu wird der BBO-Kristall zwischen zwei Bleche eingelötet, die mittels Lot mit dem Keramikgehäuse verbunden werden. Die Bleche sind so ausgeführt, dass ein elektrischer Überschlag verhindert wird. Die Verlötung des kompletten Pockelszellenmoduls findet simultan statt, sodass keine weiteren Schritte zur Montage in ein Gehäuse notwendig sind. Das so montierte Modul kann im Laser als Ganzes ausgerichtet und gefügt werden.

Ergebnis

Die am Fraunhofer ILT entwickelte Montagemethode für Pockelszellen gewährleistet die Fertigung thermomechanisch stabiler Module. Nach dem absolvierten Temperaturzyklustest wurde mit einem Kristall der Abmessung 4 x 4 x 20 mm^3 eine Sperrwirkung bei 3,85 kV erreicht. Die Pockelszelle wurde im gütegeschalteten Betrieb erfolgreich getestet.

Anwendungsfelder

Das Anwendungsspektrum des beschriebenen Verfahrens zur Montage von Pockelszellen erstreckt sich weit über den Luft- und Raumfahrteinsatz hinaus. Das vorgestellte Konzept kann auch in Laserstrahlquellen für die Lasermaterialbearbeitung sowie für mess- und medizintechnische Anwendungen eingesetzt werden.

Die Arbeiten werden vom BMWi im Rahmen des Projekts »OPTOMECH II« (FKZ 50 EE 0904) gefördert.

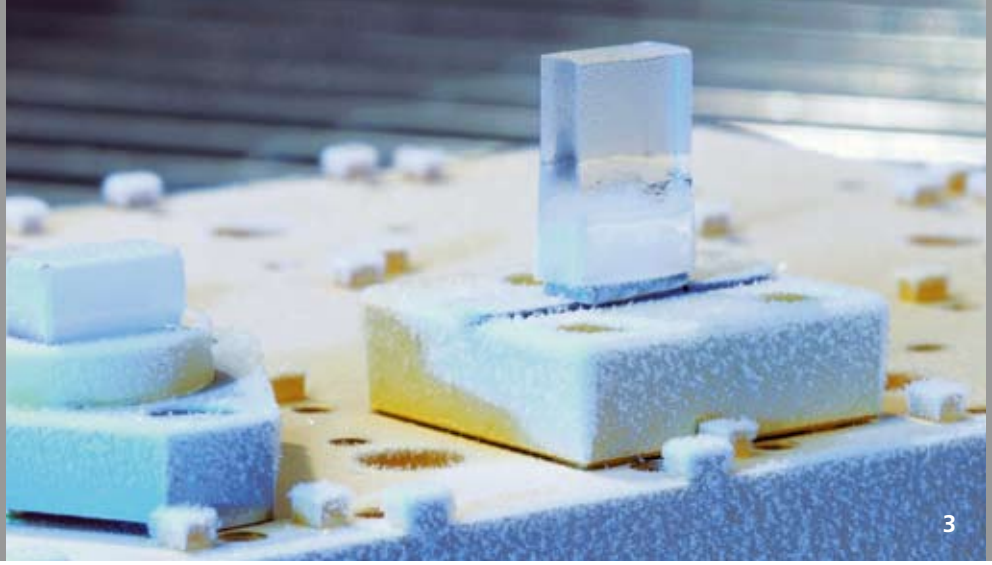
Ansprechpartner

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

1 Mittels Lot montierte Pockelszelle im Keramikgehäuse.

2 Oszilloskopbild der Laserpulse im gütegeschalteten Betrieb.



UMWELTTESTS AN LASERKOMPONENTEN

Aufgabenstellung

Lasersysteme, die unter extremen Umgebungsbedingungen betrieben oder transportiert werden, müssen vorher qualifiziert werden. Das ist insbesondere für den satellitengestützten Einsatz dieser Lasersysteme notwendig. Für die Gesamtqualifizierung der Lasersysteme werden sogenannte Umwelttests an den einzelnen Laserkomponenten durchgeführt.

Vorgehensweise

Zu den Umwelttests zählen Temperaturwechsel- und Vibrationstests. Im Zuge der Temperaturwechseltests z. B. von -30 °C bis +50 °C werden mithilfe eines Klimaschranks die Laserkomponenten einer festgelegten Anzahl von Temperaturzyklen ausgesetzt. Weil oft Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten gefügt werden müssen, sind vor allem die durch Temperaturänderungen hervorgerufenen induzierten Spannungen und Verformungen von Interesse. Bei vielen im Lasersystem montierten Baugruppen (z. B. Spiegel) kommt es auf sehr genaue Winkelpositionierung an. Am Fraunhofer ILT wurde deshalb die Möglichkeit geschaffen, während der Temperaturwechseltests Winkelmessungen an Komponenten mit Planspiegeln mit einem Autokollimator durchzuführen. Bei diesen Messungen wird die Änderung der Winkellage des Planspiegels über die Dauer des Klimatests aufgezeichnet. Im Zuge der Vibrationstests können auf einem sogenannten Shaker bei Raumtemperatur Komponenten mechanisch mittels Stößen und Vibrationen untersucht werden. Nach den Umwelttests werden - falls nötig - optische Messungen oder mechanisch zerstörende Tests an den Komponenten durchgeführt.

Ergebnis

Aus den Umwelttests kann abgeleitet werden, inwiefern Komponenten thermomechanisch stabil gegen Temperaturänderungen und/ oder mechanisch stabil gegen Stoß- oder Vibrationsbelastung sind. Die Ergebnisse aus nachträglichen optischen Messungen oder mechanischen Zerstörungstests liefern weitere Einsichten in das thermische oder mechanische Verhalten von Komponenten und Baugruppen.

Anwendungsfelder

Die im Fraunhofer ILT durchgeführten Klimatests sind wesentlicher Bestandteil der Qualifizierung von Laserkomponenten für LIDAR-Systeme für die Luft- und Raumfahrt. Sie können außerdem als Qualifikationsmethoden für jegliche Komponenten, die harschen Umweltbedingungen ausgesetzt sind, eingesetzt werden.

Die Arbeiten werden vom BMWi im Rahmen des Projekts »OPTOMECH II« (FKZ 50 EE 0904) gefördert.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Erik Liermann
Telefon +49 241 8906-394
erik.liermann@ilt.fraunhofer.de

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

3 Laserkomponenten im Temperaturwechseltest.

ALGORITHMEN ZUR AUTOMATISIERTEN JUSTAGE MIKROOPTISCHER KOMPONENTEN

Aufgabenstellung

Der überwiegende Teil der Fertigungsprozesse in der Produktionskette von Hochleistungsdiodenlasern ist voll- oder teil-automatisiert. Lediglich die Justage mikrooptischer Komponenten zur Stahlformung erfolgt manuell. Die manuelle Montage der Mikrooptiken ist ein vergleichsweise zeit- und kostenintensiver Prozess bei der Fertigung von Diodenlasermodulen. Bislang existieren keine geeigneten Algorithmen zur Strahlanalyse, die eine voll automatisierte Justage der mikrooptischen Komponenten, insbesondere der Fast-Axis-Kollimationslinsen für Hochleistungdiodenlaserbarren, in sechs Freiheitsgraden ermöglichen.

Vorgehensweise

Die Leistungsdichteverteilung hinter fehlgestellten Fast-Axis-Kollimationslinsen wird in Abhängigkeit einer sechsdimensionalen Fehlstellung der Linse modelliert. Aus dem Modell werden Zusammenhänge abgeleitet, die eine eindeutige, quantitative Vorhersage der Fehlstellung mittels Analyse der Leistungsdichteverteilung im Nah- oder Fernfeld ermöglichen. Mit der berechneten Vorhersage kann die Fehlstellung in einem Schritt korrigiert werden.

Darüber hinaus werden weitere Algorithmen entwickelt, die eine iterative Korrektur der Fehlstellung in den Bereichen der Strahlungsverteilung erlauben, die durch Modelle nicht oder nicht eindeutig abgebildet werden.

Ergebnis

Aus der Leistungsdichteverteilung hinter fehlgestellten Fast-Axis-Kollimationslinsen kann die erforderliche Korrektur mit einer maximalen Unsicherheit von einem Mikrometer vorhergesagt werden. Die typische Justagedauer wird auf weniger als zehn Sekunden reduziert.

Anwendungsfelder

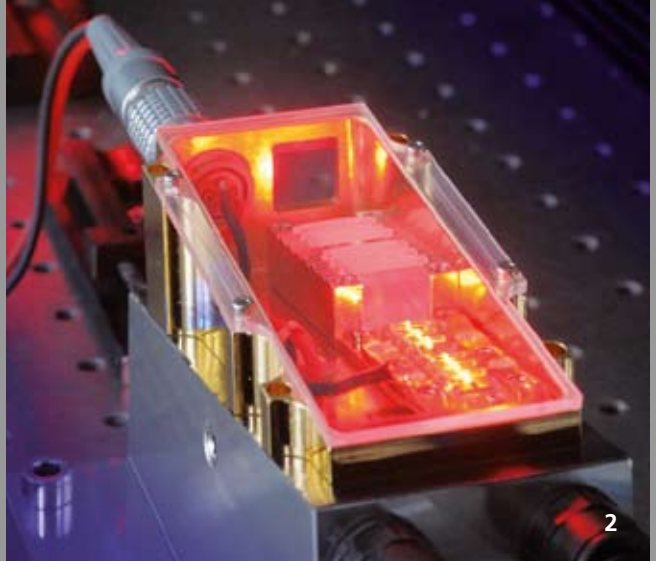
Die Ergebnisse können im Bereich der Produktionstechnik für Hochleistungsdiodenlaser eingesetzt werden, um eine Vollautomatisierung der Produktionskette zu erzielen. Die entwickelten Modelle und Algorithmen können modifiziert und für andere Strahlquellen und Mikrooptiken angepasst werden.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Thomas Westphalen
Telefon +49 241 8906-374
thomas.westphalen@ilt.fraunhofer.de

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

1 Mikroskopaufnahme von drei FAC-Linsen.



BRILLANTE DIODEN-LASERMODULE IM ROTEN SPEKTRALBEREICH

Aufgabenstellung

Für die direkte Materialbearbeitung, die Medizintechnik oder das Pumpen von Festkörperlasern, z. B. einem Alexandrit-Laser für die Klimaforschung, werden Strahlquellen hoher Brillanz mit Emission im roten Spektralbereich benötigt. Ein Diodenlasermodul zum direkten, longitudinalen Pumpen eines Alexandrit-Lasers soll eine gepulste Ausgangsleistung von mindestens 10 W bei mindestens 35 Hz Pulsrepetitionsrate und etwa 200 µs Pulsdauer erreichen.

Vorgehensweise

Ein optomechanisches Konzept zur dichten Überlagerung der Strahlung mit einer minimierten Anzahl von Optikkomponenten zur Kollimation und Fokussierung wurde ausgewählt. Das Konzept kann schnell an individuelle Kundenanforderungen für den gesamten Spektralbereich vom UV bis in das IR angepasst werden. Die Optiken wurden mit der kommerziellen Raytracing-Software Zemax auf eine optimale Intensitätsverteilung der Pumpstrahlung im Kristall ausgelegt. Um eine gleichmäßige Temperatur der Dioden sicherzustellen und damit eine kleinstmögliche spektrale Breite zu ermöglichen, wurde die Form der Wärmesenken entsprechend angepasst.

Ergebnis

Ein Diodenlasermodul mit einer optischen Ausgangsleistung von mehr als 13 W (Pulsspitzenleistung im Fokus) wurde aufgebaut. Die spektrale Breite bei 2,2 nm entspricht der statistischen Streuung der einzelnen Emitter. 96,5 Prozent der Ausgangsleistung sind linear polarisiert. Die Beugungsmaßzahl beträgt 45 in der Fast-Axis und 38 in der Slow-Axis.

Anwendungsfelder

Durch die Entwicklung hochbrillanter Diodenlasermodule im roten Spektralbereich können Blitzlampen als Pumpquelle ersetzt und gleichzeitig die Energieeffizienz der Alexandrit-Festkörperlaser erheblich gesteigert sowie die wartungsfreien Betriebszeiten vergrößert werden.

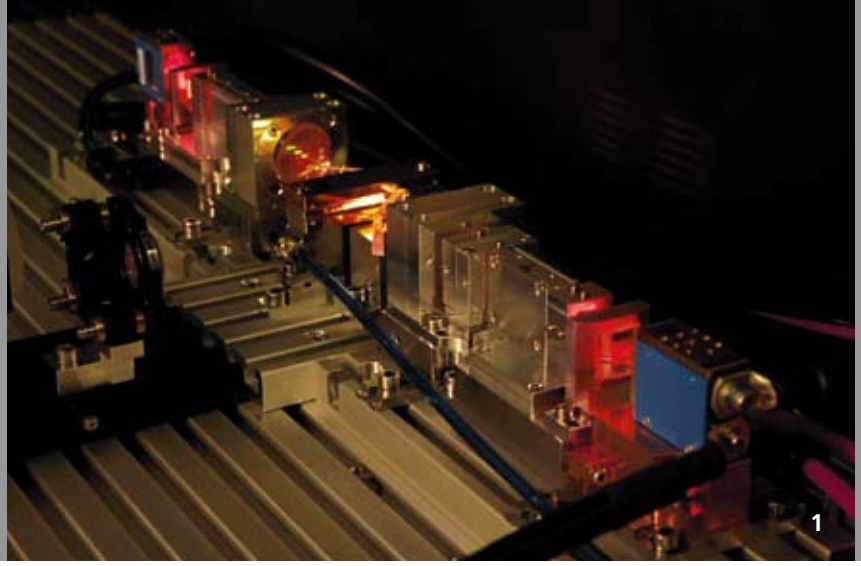
Die Arbeiten wurden teilweise vom BMBF im Rahmen des Projekts »SPEKTRALAS« (FKZ 13 N 9729) gefördert.

Ansprechpartner

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

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

2 Diodenlasermodul.



TM:YLF-INNOSLAB-LASER MIT 200 W BEI 2 µM

Aufgabenstellung

Der Wellenlängenbereich um 2 µm bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten von medizinischen Applikationen über Spurengasdetektion in der Atmosphäre bis hin zur Bearbeitung von VIS-transparenten Materialien. Das System aus Thulium (Tm) und Holmium (Ho) als laseraktiven Ionen in Festkörperkristallen ist etabliert für die effiziente Erzeugung von Laserstrahlung bei 2 µm. Tm-dotierte Materialien eignen sich dabei besonders für cw-Laserstrahlquellen und können direkt bei 800 nm diodengepumpt werden. Ho-dotierte Festkörper sind auch für den Energiespeicherbetrieb geeignet und können mit Tm-basierten Lasern gepumpt werden. Das INNOSLAB-Konzept ist prädestiniert, um die Kette Diodenlaser/Tm-Laser (cw)/Ho-Laser (gepulst) für große optische Leistungen jenseits von 100 W zu realisieren. Ziel der Arbeiten ist es, die gesamte Kette zu untersuchen und Verstärker mit großer mittlerer Leistung zur Skalierung kommerzieller Laser im Bereich um 2 µm zur Verfügung zu stellen.

Vorgehensweise

Ein Tm:YLF-INNOSLAB-Kristall wird von beiden Enden partiell mit Diodenlaserstacks bei 792 nm gepumpt. Das so erzeugte Gainvolumen mit rechteckigem Querschnitt und großem Aspektverhältnis wird in einen stabilen Resonator eingebracht, dessen Gaußscher Grundmode in der schmalen Achse an die Höhe des Gainvolumens angepasst ist und in der breiten Achse im hohen Multimode ($M^2 > 100$) betrieben wird.

Damit wird eine homogene tophat-förmige Strahlverteilung erzeugt, welche sich insbesondere eignet, um im Weiteren einen Ho-dotierten Laserkristall in INNOSLAB-Geometrie zu pumpen.

Ergebnis

Es wurde eine optische Ausgangsleistung von 200 W bei einer Wellenlänge von 1,9 µm aus einer absorbierten Pumpleistung von 490 W erzielt. Die optische Effizienz bezogen auf die absorbierte Pumpleistung liegt bei 40 Prozent, die Steigungseffizienz bei 50 Prozent. Die Effizienz ist derzeit durch die Zerstörschwelle der verwendeten Spiegelbeschichtungen begrenzt, andere Beschichtungen werden untersucht.

Anwendungsfelder

Außer der Anwendung als Pumpquelle für Ho-basierte INNOSLAB-Verstärker um 2 µm eignet sich der Laser auch zur direkten Materialbearbeitung.

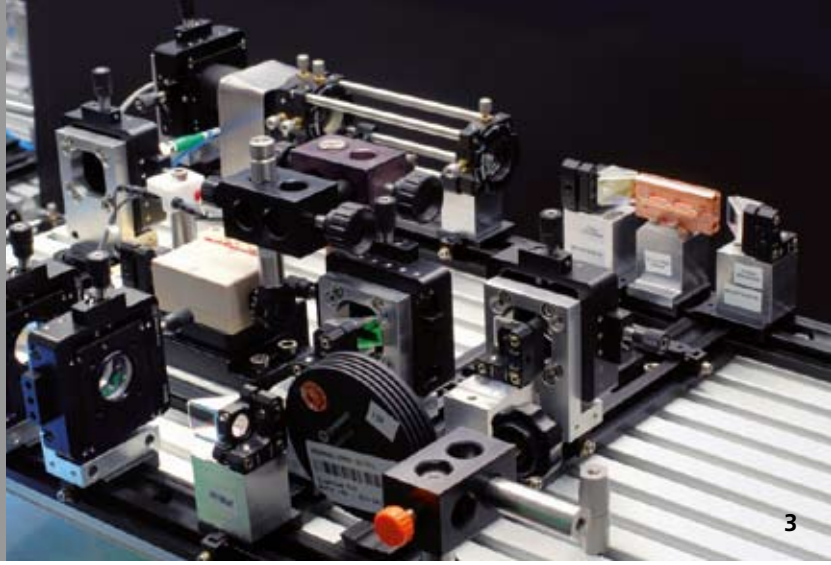
Ansprechpartner

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

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

1 Tm:YLF-INNOSLAB-Laser. Quelle: Berthold Leibinger Stiftung GmbH.

2


3

SINGLE-FREQUENCY-ER:YLUAG-LASER BEI 1645 NM FÜR EIN METHAN-LIDAR

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 µm herangezogen werden. Diese müssen mit schmalbandiger Laserstrahlung (Linienbreite < 20 MHz, »single-frequency«) angesprochen werden. Dies wird bislang mit nichtlinearen Konverterstufen (OPO/OPA) realisiert. Die direkte Erzeugung mittels Festkörperlasern basierend auf Erbium-dotierten Kristallen verzichtet auf zusätzliche nichtlineare Prozesse und verspricht daher Vorteile bei Effizienz und Robustheit. Beides sind wichtige Faktoren für einen späteren Einsatz auf Satelliten.

Vorgehensweise

Es wird ein Festkörperlaser mit einem Erbium-dotierten Laserkristall aufgebaut, der mit Faserlasern bei 1532 nm Wellenlänge gepumpt wird. Der Laserkristall Er:YLuAG hat eine gezielt optimierte Zusammensetzung, bei der das Maximum des Emissionswirkungsquerschnitts im Erbium-Ion bei der avisierten Emissionswellenlänge liegt. Der Laseroszillator wird mit einer Repetitionsrate von 100 Hz gütegeschaltet und mit aktiver Resonatorlängenregelung longitudinal einmodig (»single-frequency«) betrieben.

Ergebnis

Erstmals wurde mit dem Lasermaterial ein gepulster Laser aufgebaut, welcher derzeit im Single-Frequency-Betrieb eine Pulsenergie von 2,3 mJ bei ca. 3 Prozent optischer Effizienz und $M^2 = 1$ erreicht. Die Pulsdauer liegt bei 90 ns. Erstmals wurde so in einer Methan-Referenzzelle die Methan-Absorptionslinie bei 1645,1 nm (in Luft) mitsamt ihrer Substruktur erfolgreich im Labor ohne nichtlineare Konverterstufen vermessen.

Momentan ist die Pulsenergie durch die verfügbare Pumpleistung begrenzt. Ausgehend von den bisher gewonnenen Ergebnissen wird eine Effizienzsteigerung um mindestens einen Faktor zwei von einer verbesserten Kristallkühlung und einem optimierten Design des Laserresonators erwartet und untersucht.

Anwendungsfelder

Laserstrahlung mit Wellenlängen um 1,6 µm findet auch in der Medizintechnik Anwendung. Zusätzlich kommt eine Nutzung zur Bearbeitung von im sichtbaren Wellenlängenbereich transparenten Materialien infrage.

Die Arbeiten wurden durch das BMBF unter dem Kennzeichen 01 LK 0905 B gefördert.

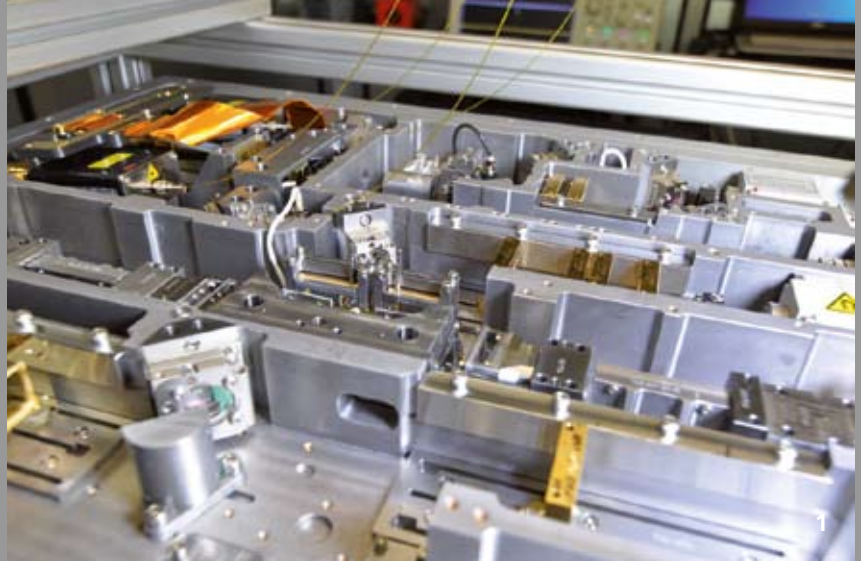
Ansprechpartner

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

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

2 Er:YLuAG-Laserkristall.

3 Single-Frequency-Laser mit Er:YLuAG-Kristall.



KOMPAKTE LASER FÜR FLUGZEUGGESTÜTZTE LIDAR-SYSTEME

Aufgabenstellung

Im Bereich der Klimaforschung ist es ein langfristiges Ziel, alle klimarelevanten Größen durchgehend und global mit hoher räumlicher Auflösung zu bestimmen. Derartige Daten sollen in Zukunft durch satellitenbasierte LIDAR-Systeme generiert werden. Flugzeuggestützte Systeme sind als Technologiedemonstratoren ein wichtiger Schritt dahin.

Eine Strahlquelle zur Messung von Windgeschwindigkeitsprofilen sowie drei Pumpstrahlquellen für CO_2- und CH_4-Dichtemessungen werden hierfür entwickelt. Sie erfüllen die besonderen Anforderungen an Effizienz, Kompaktheit, Robustheit und Sicherheit, die sich aus dem Einsatz in der Luftfahrt ergeben.

Vorgehensweise

Die vier Laser wurden als teilweise mehrstufige MOPA-Systeme mit Nd:YAG-Kristallen konzipiert. Die spektralen Strahleigenschaften werden in einem Oszillator im longitudinalen Einmodenbetrieb bei geringer Pulsenergie (~ 10 mJ) erzeugt und dann in INNOSLAB-Verstärkerstufen auf 100 - 200 mJ hochverstärkt. Die für die jeweilige Anwendung benötigte Zielwellenlänge wird in einer nachgeschalteten Frequenzkonverterstufe erzeugt. Die optischen Bauteile sind auf beiden Seiten einer monolithischen, mittels FE-Simulationen optimierten Trägerstruktur kompakt angeordnet. Die Kippeigenschaften der optomechanischen Einzelkomponenten wurden unter Vibrationslasten und unter Temperaturvariationen im Fraunhofer ILT getestet, analysiert und optimiert.

Ergebnis

Entsprechend den Anforderungen wurde der stabile einmodige Betrieb der fertig integrierten Oszillatoren bei Pulsenergien von 8 - 10 mJ, einer Wiederholrate von 100 Hz und einer Pulsdauer von 35 ns sowie die Verstärkung auf 75 mJ in einer ersten Verstärkerstufe demonstriert. Die vier Lasersysteme werden 2013 an die jeweiligen Projektpartner übergeben.

Anwendungsfelder

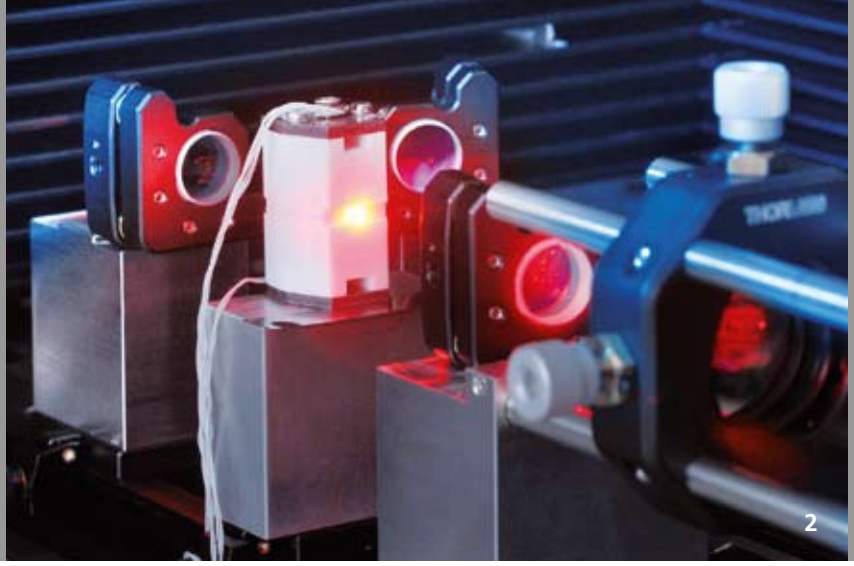
Im Bereich der Klimaforschung lassen sich neben den genannten Messaufgaben durch Anpassung von Strahlparametern wie z. B. der Wellenlänge auch weitere klimatische Größen erfassen. Zudem kann diese Technologie im industriellen Bereich für die Überwachung von Industrieanlagen, Leckageprüfung von Gasleitungen oder Vermessung von Windfeldern eingesetzt werden. Die kompakte und robuste Aufbautechnik kann systemübergreifend bei der Strahlquellenentwicklung eingesetzt werden.

Ansprechpartner

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

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

1 Oszillator und INNOSLAB-Verstärker der Pumpstrahlquelle für das CH_4-Messsystem.



DIODENGEPUMPTER ALEXANDRIT-LASER

Aufgabenstellung

Zur Messung von Temperaturprofilen der Atmosphäre in Höhen zwischen 80 und 110 km werden am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP) mobile Resonanz-LIDAR-Systeme eingesetzt, um die Dopplerbreite der Kalium-Resonanzlinie bei 770 nm sowie der Eisen-Resonanzlinie bei 386 nm spektroskopisch zu ermitteln. Als Laseremitter werden blitzlampengepumpte Alexandrit-Ringlaser im gütegeschalteten Einfrequenzbetrieb eingesetzt. Typische Einsatzbedingungen umfassen die Messung auf einem Forschungsschiff bei rauer See oder unter polaren Umgebungsbedingungen in der Antarktis. Mit Blick auf die teilweise unwirtlichen Umgebungsbedingungen und entlegenen Einsatzregionen des Lasers ist eine Steigerung der wartungsfreien Betriebszeiten und des Steckdosenwirkungsgrads wünschenswert. Zu diesem Zweck soll am Fraunhofer ILT der Einsatz von Laserdioden als alternative Pumplichtquelle untersucht werden.

Vorgehensweise

Ein am Fraunhofer ILT entwickeltes Diodenlasermodul mit Emission im roten Spektralbereich wird eingesetzt, um einen Alexandrit-Laser longitudinal zu pumpen. Die Pumpstrahlung ist linear polarisiert, der depolarisierte Leistungsanteil kleiner als 4 Prozent. Die Pulsleistung beträgt 13 W bei einer Pulsrepetitionsrate von 35 Hz, die Beugungsmaßzahl (M^2) 38 ± 2 bzw. 49 ± 2 in den beiden Raumrichtungen.

Der verwendete Alexandrit-Kristall ist 15 mm lang und in einem 190 mm langen, einfach gefalteten Laserresonator angeordnet. Die Temperatur des Lasermediums kann mithilfe eines Thermostaten zwischen 30 °C und 190 °C eingestellt werden.

Ergebnis

Durch Variation der Kristalltemperatur kann die Ausgangswellenlänge des Alexandrit-Lasers im freilaufenden Betrieb zwischen 755 nm und 788 nm abgestimmt werden. Dabei wird im Grundmode-Betrieb ($M^2 \cong 1{,}10$) eine optisch-optische Effizienz von 17,8 Prozent und eine Steigungseffizienz von mehr als 30 Prozent erreicht. Die Resonatorverluste werden mithilfe des Findlay-Clay-Verfahrens zu etwa 1 Prozent bestimmt.

Anwendungsfelder

Die Untersuchungen bilden das Fundament für die Entwicklung effizienter, diodengepumpter Grundmode-Laser mit frei einstellbarer Wellenlänge zwischen 700 nm und 800 nm für medizinische und messtechnische Anwendungen.

Ansprechpartner

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

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

2 Laboraufbau des diodengepumpten Alexandrit-Lasers.

ABSTIMMBARER UV-LASER FÜR DEN FLUGEINSATZ

Aufgabenstellung

Messungen klimarelevanter Gase liefern einen wertvollen Beitrag für das Verständnis von atmosphärischen Prozessen. Das Hydroxyl-Radikal spielt eine wichtige Rolle beim Abbau von Schadstoffen in der Luft und ist z. B. für die Vorhersage von Smog relevant. Für die Ermittlung der Konzentration mittels laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) setzt das Institut für Energie- und Klimaforschung – Troposphäre (IEK-8) des Forschungszentrums Jülich GmbH (FZJ) einen abstimmbaren, resonatorintern frequenzverdoppelten Farbstofflaser mit einer Emissionswellenlänge von 308 nm ein. Da die Radikale sehr kurzlebig sind, müssen die Messungen in den jeweils interessanten Höhen vorgenommen werden. Dazu wird der Laser oben auf einem Zeppelin angebracht. Bei Messungen bis in einer Höhe von 1500 m treten Temperaturen von 10 - 40 °C und Umgebungsdrücke von 800 - 1000 hPa auf. Unter diesen Einsatzbedingungen konnte mit dem bisher verwendeten Lasersystem kein kontinuierlicher Messbetrieb sichergestellt werden.

Vorgehensweise

Zunächst wird der vorhandene Laser bezüglich der bestehenden Schwachstellen analysiert. Dazu werden sowohl eine theoretische Toleranzanalyse des optischen Designs als auch experimentelle Untersuchungen der Komponenten und der Gesamtkonstruktion in einer Klimakammer am Fraunhofer ILT durchgeführt.

Zur Steigerung der Stabilität gegen Umwelteinflüsse und zur Schaffung von Leistungsreserven werden Experimente zum optischen Redesign durchgeführt und optimierte Komponenten auf ihre Stabilität in Temperaturzyklen getestet.

Ergebnis

Basierend auf den Ergebnissen der Analysen und Experimente wurde zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich ein optisch, thermisch und mechanisch stabiler Aufbau realisiert, der im Rahmen der europäischen PEGASOS-Kampagne über mehrere Wochen kontinuierliche LIF-Messungen ermöglichte.

Anwendungsfelder

Die Methoden und Ergebnisse sowohl der theoretischen als auch experimentellen Analyse des Lasers lassen sich auf andere Lasersysteme übertragen. Somit kann bei der Auslegung neuer oder der Überarbeitung bestehender Optikdesigns die Toleranz gegenüber Änderungen der Umgebungsbedingungen gesteigert werden.

Ansprechpartner

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

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

1 Resonator eines abstimmbaren, resonatorintern frequenzverdoppelten Farbstofflasers.

INVERSES LASERBOHREN ZUR HERSTELLUNG VON FASERPREFORMEN

Aufgabenstellung

Optische Fasern spielen eine wichtige Rolle in der Nachrichtentechnik und der Materialbearbeitung. Undotierte Fasern werden zur verlustarmen Führung, dotierte Fasern zur Erzeugung und Verstärkung von Laserstrahlung eingesetzt. Die Herstellung solcher Fasern erfolgt durch Ziehen sogenannter Preformen, in die zuvor geometrische Strukturen eingebracht werden, die die optischen Eigenschaften der Faser bestimmen. Gängige Verfahren zur Preformherstellung sind das Ultraschallbohren und das Bündeln einer Vielzahl einzelner Rohre. Ein laserbasiertes Verfahren ermöglicht eine Automatisierung des Fertigungsprozesses, vermeidet weitgehend die Kontamination der Oberflächen und erlaubt eine höhere Flexibilität bezüglich der Geometrie der Bohrungen.

Vorgehensweise

Zur Herstellung von Bohrungen wird das zu entfernende Material in aufeinanderfolgenden Lagen abgetragen. Jede Lage wird mit einem fokussierten Laserstrahl abgerastert. Der Abtrag erfolgt von der Rückseite des transparenten Materials. Der Laserstrahl durchstrahlt dabei das unbearbeitete Volumen. Auf diese Weise lassen sich nahezu beliebige Hohlräume im Glas erzeugen, unter anderem Bohrungen mit extremem Aspektverhältnis und einstellbarer Konizität.

Für den Bearbeitungsprozess wird ein gütegeschalteter INNOSLAB-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulsdauer von ca. 15 ns verwendet. Zur Verbesserung der erreichbaren Bohrtiefe wird der Einfluss der verschiedenen Prozessparameter untersucht. Mit den gefundenen Prozessparametern wird eine Preform hergestellt und im Anschluss gezogen.

Ergebnis

Mithilfe des inversen Laserbohrens wurden erste Faserpreformen aus Quarzglas mit einer photonischen Struktur, bestehend aus mehreren Bohrkanälen mit einem Durchmessser von 800 µm und einer Länge von 100 mm, hergestellt. Der Durchmesser der Faser beträgt nach dem Ziehvorgang 109 µm, die eingebrachten Strukturen weisen 3,9 µm Durchmesser auf.

Anwendungsfelder

Mögliche Anwendungsfelder des inversen Laserbohrens sind alle Bereiche, in denen Bohrkanäle in Glas mit einem hohen Aspektverhältnis und geringer bzw. einstellbarer Konizität gefordert werden. Das berührungslose Bearbeitungsverfahren eignet sich insbesondere zur Herstellung von optischen Komponenten wie Faserpreformen.

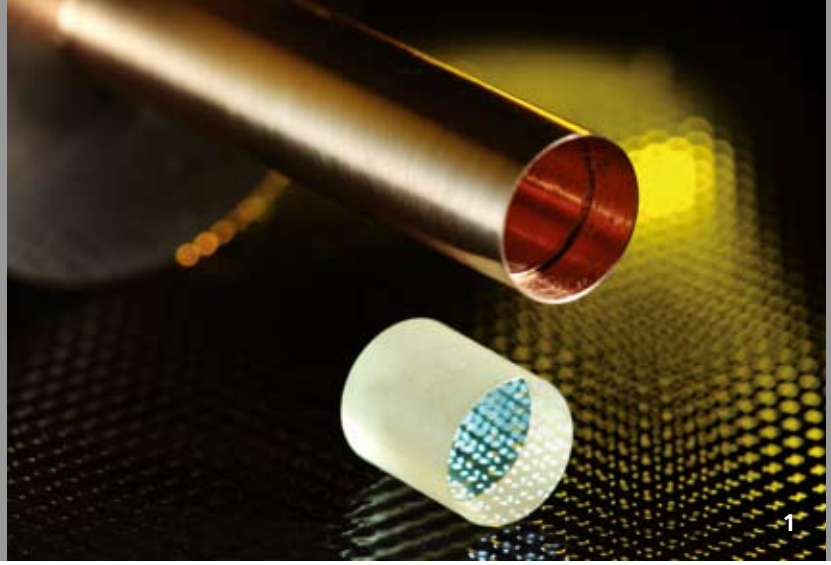
Ansprechpartner

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

2 Ziehzwiebel einer photonischen Faser mit einem Durchmesser von 26 mm.

3 Verschiedene Faserpreformen für photonische Fasern: Bohrungsdurchmesser 600 µm, Außendurchmesser 43 mm.



FARADAY-ISOLATOR FÜR FASERLASER HOHER LEISTUNG

Aufgabenstellung

Faserlaser sind mittlerweile ein Standardwerkzeug für die industrielle Bearbeitung von Metallen, sowohl in Form von Blechen als auch Pulvern. Bei der Bearbeitung kann es durch die Dynamik im Schmelzbad oder durch eine ungünstige Positionierung des Strahlengangs zu Rückreflexen des Laserstrahls in die Strahlquelle kommen. Da der Faserlaser prinzipbedingt empfindlich gegen solche Rückreflexe ist, sollen Isolatoren das Wiedereinkoppeln der reflektierten Strahlung in die Quelle verhindern und einen stabilen und störungsfreien Betrieb des Lasers ermöglichen. So können weitere Anwendungsgebiete erschlossen und bisher aufgrund von Rückreflexen kritische Prozesse bei Laserleistungen bis in den kW-Bereich zuverlässig umgesetzt werden.

Vorgehensweise

Mit dem Ziel der Erhaltung der exzellenten Strahlqualität des Faserlasers wurden in einem ersten Schritt verbesserte Faraday-Rotator-Kristalle aus Terbium-Gallium-Granat (TGG) mit besonders niedriger Absorption untersucht. Hierzu wurden die Kristalle mit bis zu 1 kW Strahlung mit einem Strahlparameter-Produkt von 3 mm x mrad belastet und sowohl die Strahlqualität als auch die Polarisation des Signals hinter dem Kristall in Abhängigkeit von der transmittierten Leistung gemessen.

1 Zylindrischer TGG-Kristall für die Faraday-Rotation (Länge: 11 mm, Ø 10 mm).

Ergebnis

Die vom Projektpartner hinsichtlich ihrer Absorption weiter optimierten Kristalle ermöglichten den Betrieb mit 1 kW Faserlaserstrahlung mit einem Strahlparameterprodukt von 3 mm x mrad ohne messbare Verschlechterung der Strahlqualität. Der Polarisationsgrad der transmittierten Strahlung nimmt von 17 dB ohne TGG-Kristall (Referenzmessung) auf 16 dB mit TGG-Kristall ab, was auf thermisch induzierte Effekte, insbesondere Spannungsdoppelbrechung, zurückzuführen ist. Der Einfluss durch die thermisch induzierte Linse ist dabei gering und kann, falls erforderlich, durch eine Optik kompensiert werden. Der Faraday-Rotator erfüllt damit die Anforderungen für die Lasermaterialbearbeitung. Auf dieser Grundlage wird derzeit ein Isolator für eine mittlere Ausgangsleistung von 1 kW realisiert, der anschließend im industriellen Umfeld getestet wird.

Anwendungsfelder

Überall dort, wo mit Faserlasern Material bearbeitet wird, insbesondere für Anwendungen im Hochleistungsbereich, wie z. B. dem Schneiden, Schweißen oder dem selektiven Laserschmelzen, kann ein Isolator eingesetzt werden, um den Prozess zu stabilisieren und gleichzeitig die Strahlquelle vor Beschädigung zu schützen. Durch beidseitige Faserkopplung wird die Nutzbarkeit weiter erhöht.

Diese Arbeiten wurden durch das BMBF unter dem Förderkennzeichen 13N9890 gefördert.

Ansprechpartner

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

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hoffmann
Telefon +49 241 8906-216
hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de

DIODENGEPUMPTE GEWINNGESCHALTETE FASERLASER

Aufgabenstellung

Neben diodengeseedeten Faserverstärkern und gütegeschalteten Faserlasern bietet sich als alternatives Konzept der Pulserzeugung insbesondere bei niedrigen Repetitionsraten der gewinngeschaltete Faserlaser an. Dabei wird der Signalpuls durch das Pulsen der Pumpquelle erzeugt. Für die anschließende Frequenzkonversion stellen eine möglichst hohe Pulsleistung und eine geringe spektrale Bandbreite des gewinngeschalteten Faserlasers eine besondere Herausforderung dar. Dies wird im Rahmen des BMBF-Projekts »FaZit« experimentell und theoretisch untersucht.

Vorgehensweise

Durch den gepulsten Betrieb mehrerer fasergekoppelter Diodenmodule als Pumpquelle kann der gewinngeschaltete Faserlaser als komplett monolithischer Resonator mit Faser-Bragg-Gittern ausgeführt werden. Neben der Realisierung eines beidseitig gepumpten Resonators soll ebenfalls ein zur Frequenzkonversion optimierter Aufbau mit schmaler Bandbreite und linearer Polarisation als gewinngeschalteter Faser-Masteroszillator mit darauffolgendem gepulst gepumpten Faserverstärker demonstriert werden.

Ergebnis

Mit dem beidseitig gepumpten, gewinngeschalteten Faserlaser konnten bei Repetitionsraten bis 10 kHz Pulsspitzenleistungen von maximal 10 kW und Pulsdauern bis hinunter zu etwa 40 ns erreicht werden.

Der für die Frequenzkonversion optimierte Aufbau mit anschließender faserintegrierter Nachverstärkung liefert linear polarisierte Ausgangsstrahlung mit über 2 kW Spitzenleistung und ca. 150 ns Pulsdauer mit einer spektralen Breite von weniger als 350 pm bei 90 Prozent eingeschlossener Leistung. Die anschließende Frequenzkonversion zu 532 nm erreichte in einem ersten Versuch bereits eine Effizienz von ca. 37 Prozent.

Anwendungsfelder

Aufgrund ihrer hervorragenden Strahlqualität finden gepulste Faserlaser in vielen Bereichen der Materialbearbeitung, Messtechnik und Kommunikationstechnik Anwendung. Durch die Tendenz zu verstärkter Spontanemission (ASE) ist der mögliche Parameterraum von herkömmlichen Faserlasern allerdings in der Repetitionsrate auf Bereiche über 10 kHz begrenzt. Dies kann mit dem Konzept des gewinngeschalteten Faserlasers umgangen werden, sodass gewinngeschaltete Faserlaser dort Einsatz finden, wo hohe Spitzenleistungen im Bereich von mehreren kW mit Grundmode-Strahlqualität bei niedrigen Repetitionsraten bis hinunter in den Einzelschussbetrieb erforderlich sind.

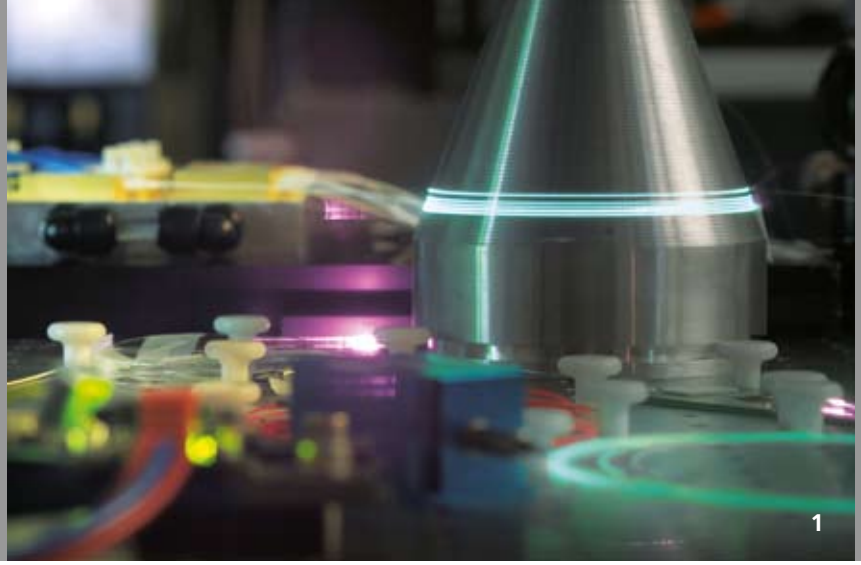
Diese Arbeiten wurden durch das BMBF unter dem Förderkennzeichen 13N9671 gefördert.

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

2 Gewinngeschalteter Faserlaser.



FASERVERSTÄRKER MIT EINSTELLBARER PULSFORM

Aufgabenstellung

Im Projekt »FaZit« werden Diodenseedquellen mit variablen Pulsparametern und deren anschließende faserbasierte Verstärkung untersucht. Aufbauend auf gepulsten Diodentreibern des Projektpartners Picolas werden kompakte Faserverstärker mit variabler Repetitionsrate und Pulsdauer im Bereich von 0,5 ps bis 10 µs und Spitzenleistungen im kW-Bereich zur anschließenden Nachverstärkung entwickelt. Im Rahmen des Projekts soll ebenfalls ein Faserverstärker mit frei einstellbarer Pulsform realisiert werden. Zum einen kann mit der einstellbaren Pulsform die während der Verstärkung in der Faser auftretende Pulsdeformation vorkompensiert und so der Einfluss von nichtlinearen Effekten bei gleicher Pulsenergie verringert werden. Zum anderen ist eine frei einstellbare Ausgangspulsform für viele Anwendungen in der Materialbearbeitung vorteilhaft.

Vorgehensweise

Mit kommerziellen Stufenindexfasern soll ein zweistufiger, linear polarisierter Faserverstärker für Pulsdauern im ns-Bereich mit frei einstellbarer Pulsform aufgebaut werden. Durch die direkte Pulsformung über den Seeddiodentreiber sind keine Freistrahlelemente wie akustooptische Modulatoren zur Pulsformung nötig, sodass der Faserverstärker komplett faserintegriert ausgeführt werden kann.

Ergebnis

Der realisierte experimentelle Aufbau des Faserverstärkers liefert mittlere Leistungen von mehr als 10 W und Spitzenleistungen von etwa 10 kW bei Pulsdauern im Bereich von 20 - 200 ns.

Mit der einstellbaren Pulsform konnte erfolgreich die zeitabhängige Signalsättigung und damit einhergehende Pulsdeformation vorkompensiert und so rechteckige Ausgangspulse erzeugt werden. Daneben lassen sich aber ebenfalls komplexere Ausgangspulsformen wie Stufenpulse, Trapeze, beliebige Sinusmodulationen etc. generieren.

Anwendungsfelder

Mit flexibler Repetitionsrate und flexibler Pulsdauer decken diodengeseedete Faserverstärker bereits ein breit gefächertes Anwendungsspektrum in der Materialbearbeitung und der Messtechnik ab. Durch den weiteren Freiheitsgrad einer frei einstellbaren Pulsform eignet sich der Laser, um die optimalen zeitlichen Prozessparameter für die Materialbearbeitung wie Bohren oder Abtragen einzustellen.

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

1 Aktive Faser.

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.

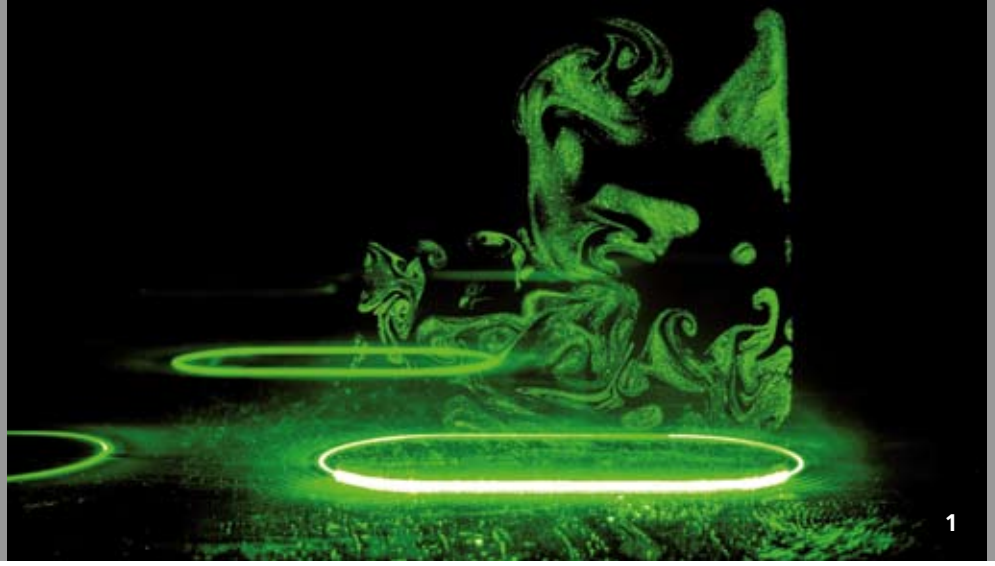
FORSCHUNGSERGEBNISSE 2012

LASERMATERIALBEARBEITUNG

INHALT

Laserstrahlschneiden von Dünnglas 64
Modellierung und Simulation des Abtragens von Glas 65
Sauberes Trennen von Leiterplatinen mit Laserstrahlung 66
Schneiden von faserverstärkten Kunststoffen 67
Schneiden mit wasserstrahlgeführter Strahlung 68
Riefenbildung beim Schneiden 69
Prozessdiagnose beim Laserschneiden 70
Online-Qualitätsdiagnose für das Lichtbogen-Hybridschweißen mit Festkörperlaser im Schiffbau 71
Ultraschallunterstütztes Laserstrahlschweißen 72
Automatisierte Wärmequellenkalibrierung beim Laserstrahlschweißen 73
Laserstrahlschweißen von Titanmembranen für die Herstellung von Drucksensoren 74
Schweißen von Bipolarplatten 75
Mikroschweißen von Kupferbauteilen mittels Leistungsmodulation 76
Schweißen von Quarzglas mit CO_2-Laserstrahlung 77
Laserlöten von Solarzellen 78
Laserstrahlschweißen von Infusionsschläuchen mit NIR-Hochleistungsdiodenlasern 79
Schweißen von Antennengehäusen aus ASA-Polymer mittels 1,5 µm Faserlaser 80
Thermische Simulation der Schweißnahthomogenität beim TWIST®-Laserschweißen 81
Simulation des Nahtfestigkeitsoptimums beim Laserschweißen von Kunststoffen 82
Topologieoptimiertes Bauteildesign 83
Generative Fertigung von Schubdüsen für Satelliten-Triebwerke 84
High-Power-SLM-Bearbeitung von Inconel 718 85
Optische Systeme für das High Power SLM 86
Verarbeitung von IN738LC mittels SLM 87
Selective Laser Melting von Magnesiumlegierungen 88
Prozessketten zur Fertigung und Reparatur 89
Laserauftragschweißen komplexer Geometrien an Turbinenschaufeln 90
Automatisiertes Laserauftragschweißen von Schaufelspitzen 91
Koaxiale Pulverdüsen für höhere Laserleistungen 92
Schneller Pulverschalter – Systemtechnik für das Laserauftragschweißen 93
Verschleissschutzschichten mit nanopartikulären Zusätzen für Werkzeuge 94
Verschleissschutz von Magnesiumlegierungen mittels Laserauftragschweißen 95
Erzeugung keramischer Dekorationsschichten mittels Laserverfahren 96
Laserbasierte Herstellung von Silberleiterbahnen 97
Zoom-Homogenisatoroptik für die prozessangepasste CO_2-Lasermaterialbearbeitung 98
Lokale Wärmebehandlung pressgehärteter Bauteile mit Laserstrahlung 99
Lasermikropolieren von Laufrädern aus Titan 100
Selektives Laserpolieren 101
Politur und Formkorrektur optischer Komponenten 102
Montierte Mikrobauteile aus Glas 103
Hochgeschwindigkeitsmikroscanner 104
Laserabtrag für die Strukturierung dünner, funktionaler Schichten 105
Strukturierung von Hochfrequenz-Keramiksubstraten 106
Prozessbeschleunigung beim Laserabtrag mit Multistrahloptiken 107
Charakterisierung scannerbasierter Fertigungssysteme 108
Vermessung von Multistrahloptiken 109
Lasermaterialbearbeitung mit Schallgeschwindigkeit 110
Nanoantennen 111
Laserstrahlbohren von Hochdruckdüsen 112
Modellierung und Simulation des Schmelzabtragens 113
Metamodellierung 114

Laserstrahlschneiden von Dünnglas mit grünem ps-Laser.



LASERSTRAHLSCHNEIDEN VON DÜNNGLAS

Aufgabenstellung

Das schnelle und präzise Schneiden von beliebigen Formen in Dünnglas (Glasdicke < 1 mm) besitzt durch die immer größere Nachfrage nach OLED- und LCD-Displays ein großes Marktpotenzial. Konventionell gesägte oder geritzte und gebrochene Gläser weisen schlechte Schnittkanten auf und müssen über aufwendige Schleif- und Polierschritte nachbearbeitet werden. Auch die Herstellung beliebiger Schnittkonturen ist schwierig. Insbesondere das Schneiden gehärteter Gläser, wie sie in der Displaytechnik üblich sind, bereitet mit konventionellen Verfahren große Schwierigkeiten.

Vorgehensweise

Durch den Einsatz von ultrakurz gepulsten Lasern soll das Glas präzise und schnell geschnitten werden, sodass kein zusätzlicher Nachbearbeitungsschritt notwendig ist. Bei der Bearbeitung mit ultrakurz gepulsten Lasern kann das Material nicht auf einmal durchgeschnitten werden. Durch wiederholtes Abscannen der Schnittkontur wird das Material schichtweise abgetragen, bis es komplett durchgeschnitten ist. Je nach durchzuschneidender Materialstärke müssen mehrere Schnitte nebeneinander gelegt werden, um das Material durchtrennen zu können.

Für das Schneiden von Glas wird ein frequenzverdoppelter ps-Laser eingesetzt. Der Laserstrahl wird mittels Scanner und f-Theta-Objektiv auf die Probenoberfläche fokussiert und mit Schnittgeschwindigkeiten von mehreren m/s verfahren.

Ergebnis

Durch den Einsatz von ps-Lasern kann das Dünnglas präzise geschnitten werden. Durch Anpassung der Schneidparameter können Schädigungen im Glas verringert werden, wodurch Proben mit Biegebruchspannungen > 200 MPa erzeugt werden können.

Anwendungsfelder

Anwendung findet das Verfahren überall dort, wo beliebige Geometrien vor allem aus dünnem Glas hergestellt werden müssen. Dies können Gläser für z. B. Smart-Phone- oder Tablet-Displays sein oder auch Gläser für Solaranwendungen. Auch neue Einsätze von Glas als Designelement lassen sich durch neue Schneidverfahren realisieren.

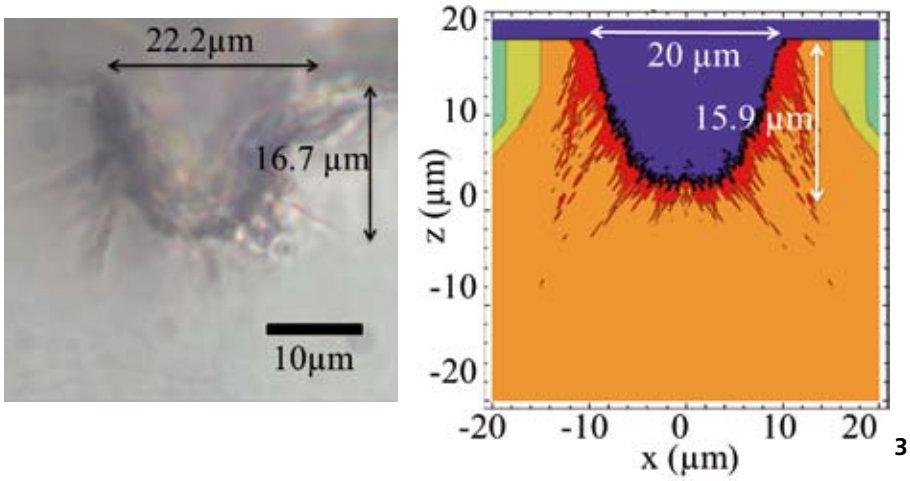
Ansprechpartner

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

1 Schneiden von Dünnglas mit grünem ps-Laser.

2 Querschliff von Schnittkanten, Glasdicke 300 µm.



3

MODELLIERUNG UND SIMULATION DES ABTRAGENS VON GLAS

Aufgabenstellung

Die Bearbeitung transparenter dielektrischer Werkstoffe (z. B. Gläser) mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung besitzt spätestens seit der großen Nachfrage nach Smartphones und anderen Flat-Panel-Displays ein großes Marktpotenzial. Jedoch sind die Mechanismen des Abtrags und der Materialschädigung beim Einsatz des Lasers noch wenig verstanden.

Vorgehensweise

Das Ziel der Modellierung ist die räumlich aufgelöste Beschreibung der Strahlungspropagation und der Energiedeposition sowie der Schädigung bzw. des Abtrags dielektrischer Werkstoffe für den Fall ultrakurzer, hochintensiver Laserpulse. Dazu wird sowohl die Dynamik des elektronischen Systems dargestellt als auch die Rückwirkung auf das propagierende Strahlungsfeld berechnet und daraus das abgetragene Volumen sowie die Schädigung im Materialvolumen bestimmt.

Ergebnis

Ein Modell, das die Teilprozesse nichtlineare Absorption, Strahlungspropagation und Ablation enthält, wurde implementiert und durch den Vergleich mit realen Schnitten in Glas getestet. Der Vergleich zeigt eine perfekte Übereinstimmung der Simulationsvorhersage mit dem experimentell ermittelten Querschliffbild. Nicht nur die Abtragsgeometrie wird sehr exakt wiedergegeben, sondern auch die Materialschädigungen im Innern des Glasvolumens (mittlere Schädigungstiefe [im Querschliffbild schwarz, in der Simulation rot], spitzenförmige Schädigungsstrukturen etc.) werden korrekt dargestellt. Gerade diese Schädigungen sind für die Beurteilung der Bruchfestigkeit des finalen Bauteils von besonderem Interesse und können nun verlässlich vorhergesagt werden.

Anwendungsfelder

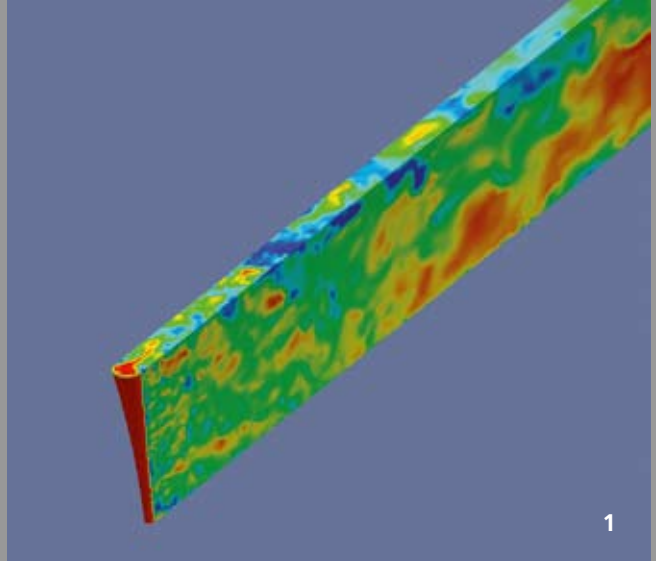
Die Anwendung des implementierten Modells erstreckt sich auf alle Materialien, die u. a. durch nichtlineare Prozesse wie Multiphotonen- oder Kaskadenionisation absorbierend auf die eingebrachte Strahlung wirken. Darunter fallen z. B. Gläser, wässrige Lösungen oder biologische Gewebe. Auch für andere dielektrische Werkstoffe und sogar halbleitende Materialien, wie sie in der Solar- bzw. Elektronikindustrie eingesetzt werden, ist die entwickelte Methodik anwendbar.

Ansprechpartner

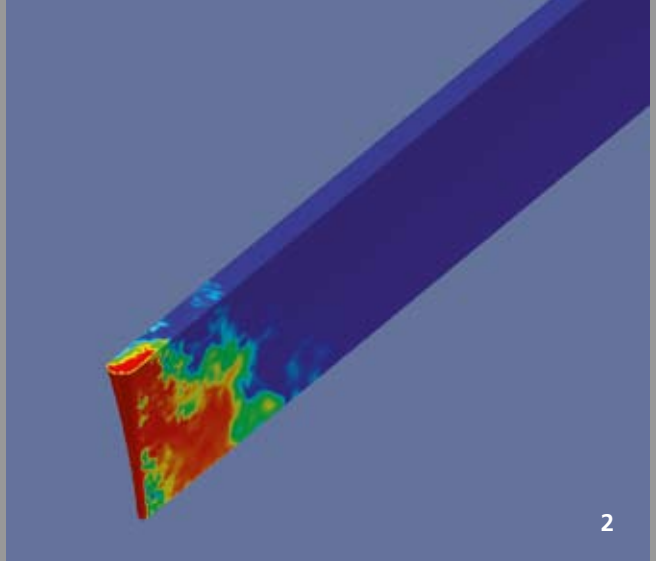
Dipl.-Phys. Urs Eppelt
Telefon +49 241 8906-163
urs.eppelt@ilt.fraunhofer.de

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

3 Querschliff / Simulation nach 5 Pulsen.



1



2

SAUBERES TRENNEN VON LEITERPLATINEN MIT LASERSTRAHLUNG

Aufgabenstellung

Leiterplatinen bestehen im Wesentlichen aus ausgehärteten Epoxidharzen und eingebetteten Glasfasern, die zu einem Gewebe verbunden sind. Beim Trennen von Leiterplatinen mit Laserstrahlung lagern sich häufig Zersetzungsprodukte sowohl auf den Platinen als auch an Schnittkanten ab.

Vorgehensweise

Zur Vermeidung dieser qualitätsmindernden Ablagerungen ist ein Modell erforderlich, welches die Zersetzung beschreibt und das Abströmen der Zersetzungsprodukte durch eine geeignete Auslegung der Schneidgasströmung optimiert.

Ergebnis

Ein Discontinuous-Galerkin-Verfahren zur Berechnung der dreidimensionalen Strömung von Gasgemischen in komplexer Geometrie wurde implementiert. Die Zersetzung wurde durch ein Modell beschrieben, welches experimentell bestimmte Abtragsraten und die wesentlichsten Zersetzungskanäle berücksichtigt. Für die bisher untersuchten Trennprozesse konnten die qualitätsmindernden Ablagerungen weitestgehend durch Mehrkammerdüsen und eine geeignete Auslegung der Schneidgasströmung vermieden werden.

Anwendungsfelder

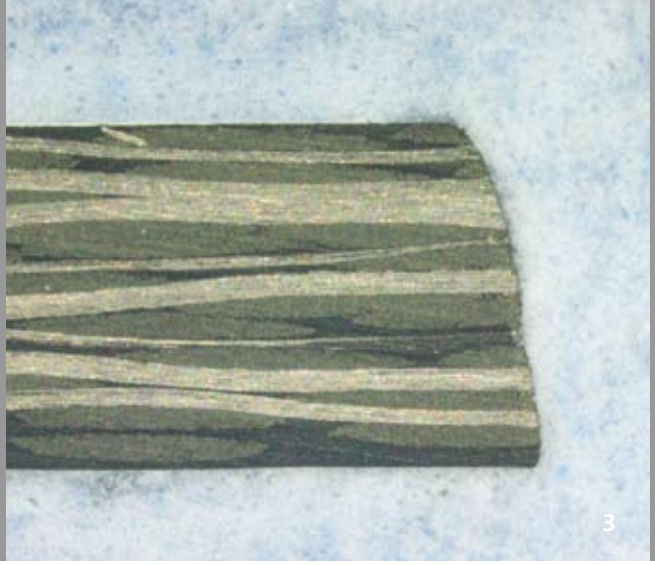
Die vorgestellte Simulation ermöglicht eine Berechnung der Gasströmung unter Berücksichtigung der Zersetzung/Verdampfung von Werkstoffen. Sie kann für Bearbeitungsprozesse eingesetzt werden, wo die Auslegung einer Gasströmung zu einer Qualitätssicherung führt.

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

Massenbruch des abgetragenen Materials in der Schnittfuge für eine nicht angepasste Schneidgasströmung (Bild 1) und für eine angepasste Schneidgasströmung (Bild 2).



SCHNEIDEN VON FASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN

Aufgabenstellung

Der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen mit thermoplastischer Matrix (TP-FVK) gewinnt aufgrund der kurzen Zykluszeiten in der Fertigung zunehmend an Bedeutung zur automatisierten Herstellung von FVK-Komponenten. Das Material kann im Gegensatz zu den harzbasierten FVK nach Erwärmung umgeformt werden und ermöglicht z. B. mit Presswerkzeugen die Produktion großer Stückzahlen mit Prozessschritten, wie sie auch in der Blechbearbeitung auftreten. Pressen oder flexible Verfahren wie das Faserlegen oder das Faserspritzen erreichen endkonturnahe Bauteile, aber dennoch bleibt das Einbringen von Löchern und Ausbrüchen sowie der präzise Konturbeschnitt häufig ein unverzichtbarer nachfolgender Fertigungsschritt. Dazu werden produktive Schneidverfahren benötigt, die sich durch eine geringe thermische Beeinflussung der Schnittkante auszeichnen.

Vorgehensweise

Neben Lösungen, bei denen eine geringe Wärmeeinbringung in das Material durch kurzgepulste Laserstrahlung erreicht wird und die ebenfalls verfolgt werden, kann eine kurze Wechselwirkungszeit auch über eine hohe Geschwindigkeit erreicht werden. Dabei wird in Mehrfachüberfahrten (Multipass-Verfahren) sukzessive Material abgetragen, bis eine vollständige Schnittfuge entstanden ist.

Ergebnis

Durch das Multipass-Verfahren wird die Wärmeeinflusszone reduziert gegenüber einer Trennung, die bei entsprechend reduzierter Verfahrgeschwindigkeit in einem Schritt erfolgt. Die effektive Schneidgeschwindigkeit bleibt dabei konstant. Durch den Einsatz von Lasern mit Leistungen im Kilowattbereich und darüber liegen die Schneidgeschwindigkeiten bei einigen m/min und somit in einer für die Serienanwendung geeigneten Größe.

Anwendungsfelder

FVK sind ein wesentliches Element im Leichtbau, ebenso sind Schneidverfahren ein wichtiger Bestandteil der Prozesskette. Die Eignung sowohl für glasfaser- wie auch kohlefaserverstärkte Kunststoffe eröffnet ein breites Einsatzspektrum z. B. im Fahrzeugbau, im Maschinenbau sowie in der Konsumgüter- oder Sportartikelindustrie.

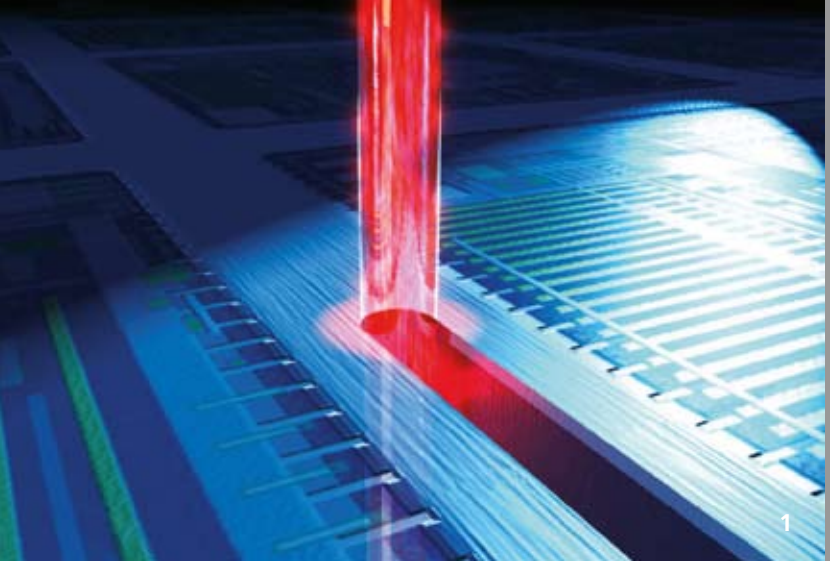
Die Arbeiten wurden gefördert im Rahmen des EU-Projekts »FibreChain«.

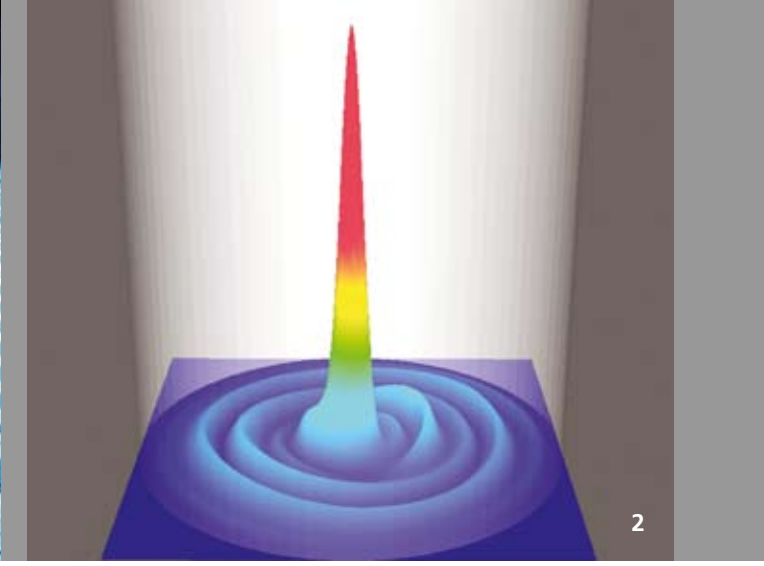
Ansprechpartner

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

3 Querschliff Schnittkante Kohlefaser/PA6 (Dicke: 2 mm).





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 Hochleistungsrechnersystem 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.

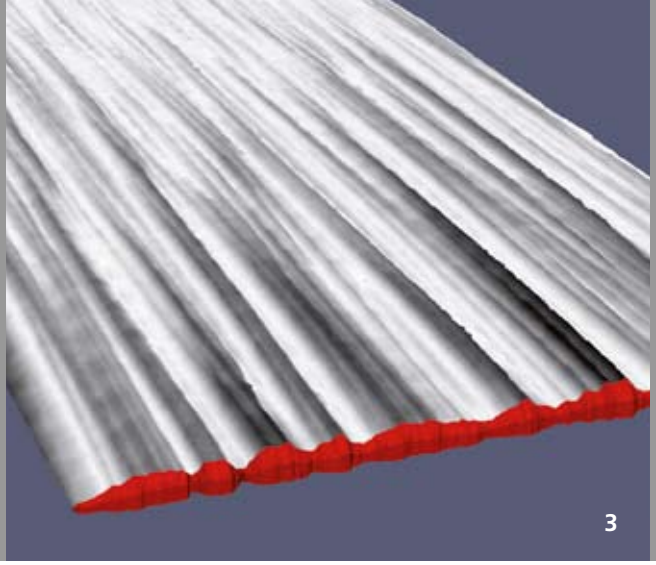
Ansprechpartner

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

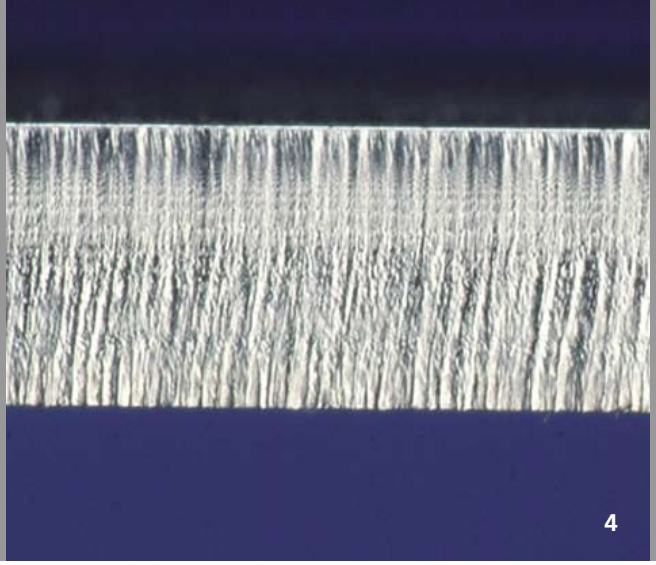
Prof. Wolfgang Schulz
Telefon +49 241 8906-204
wolfgang.schulz@ilt.fraunhofer.de

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

2 Simulation der Strahlpropagation im Wasserstrahl.



3



4

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.

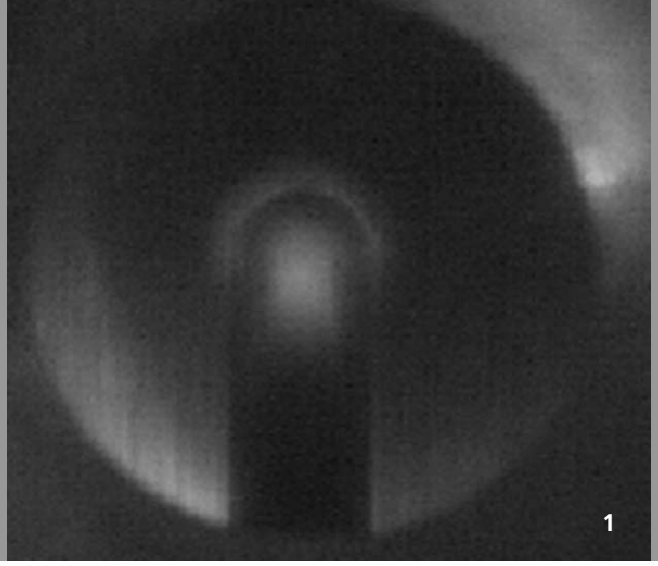
Ansprechpartner

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

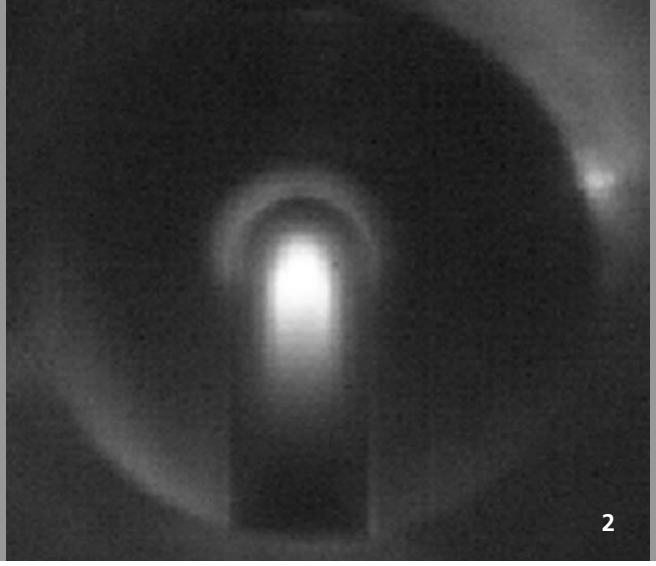
Prof. Wolfgang Schulz
Telefon +49 241 8906-204
wolfgang.schulz@ilt.fraunhofer.de

3 Mit QuCUT simuliertes Riefenprofil.

4 Riefenprofil einer realen Schnittkante.



1



2

PROZESSDIAGNOSE BEIM LASERSCHNEIDEN

Aufgabenstellung

Bei der Untersuchung und Optimierung von Laserschneidprozessen ist die exakte Beobachtbarkeit des Prozesses und dessen Veränderungen bei Modifikation der Prozessparameter eine zentrale Frage. Erst mit einer genauen Analyse von Schmelzdynamik, Schmelzfilmdicke und der Variation der Schmelzentstehung lässt sich eine Optimierung der Schneideffizienz erzielen.

Vorgehensweise

Zur Diagnose des Laserschneidprozesses wurden eine Schwarz-Weiß-Hochgeschwindigkeitskamera und eine schnelle Photodiode verwendet. Die Strahlengänge dieser beiden Systeme werden über Strahlteiler mit dem Bearbeitungsstrahlengang verbunden. Die Kombination der beiden Systeme bietet die Vorteile einer guten Interpretierbarkeit der Kamerasignale und die nochmals erweiterte zeitliche Auflösung der Photodiode. Heutige Laserschneidmaschinen verfügen häufig bereits über eine im Strahlengang integrierte Photodiode. Die erarbeiteten Ergebnisse haben so das Potenzial für eine schnelle Industrieumsetzung ohne eine deutlich erweiterte Systemtechnik.

Ergebnis

Ein Ergebnis dieser Analysemöglichkeit war die Zuordnung des dominanten Signalanteils der Photodiode. Hier trägt der untere Teil der Schneidfront bis zum Funkenflug an der Schneidfrontunterkante den größten Anteil zur Helligkeit bei. Aufgrund der geometrischen und thermischen Eigenschaften der Schneidfront ist der obere Teil der Front ähnlich dunkel wie die kalte Blechoberfläche.

Bei der Zuordnung einer spezifischen Prozessantwort zur Variation eines Verfahrensparameters zeigte die Schneidgeschwindigkeit eine besonders deutliche Prozessantwort. Wie in den Abbildungen zu sehen ist, steigt bei Zunahme der Geschwindigkeit die Helligkeit an der Schneidfront und in der Schnittfuge deutlich an. Daraus lässt sich im Weiteren ein Regelsystem realisieren, mit dem eine Schneidqualitätskontrolle erreicht werden kann.

Anwendungsfelder

Die Entwicklungsarbeiten beziehen sich auf konkrete Fragestellungen bei Laserschneidprozessen von Edelstahlblechen bis zu einer Materialstärke von 12 mm. Mittelfristig können die Erkenntnisse auf andere Materialien wie Aluminium oder andere Verfahren wie das Brennschneiden angewendet werden.

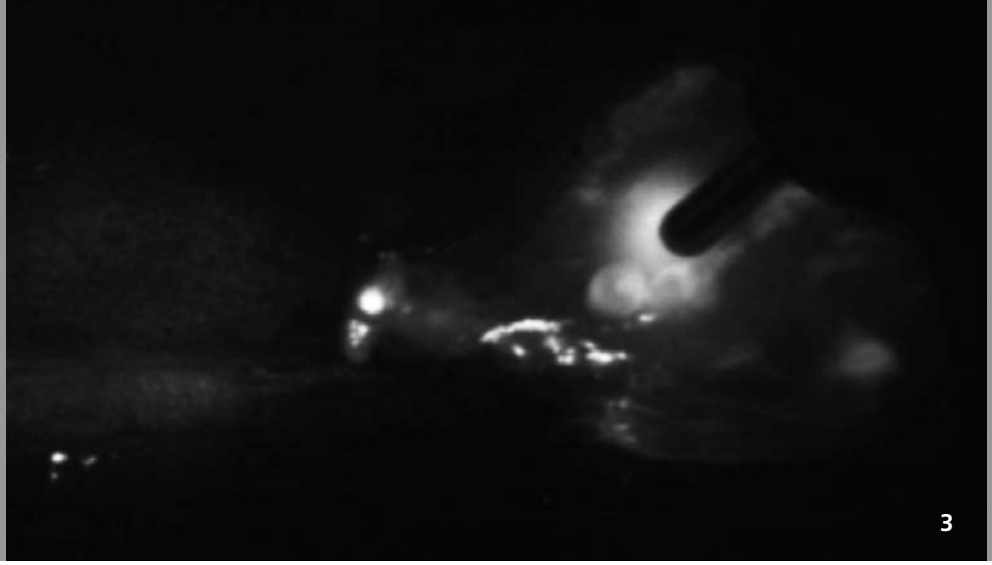
Ansprechpartner

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

1 Gemittelte Prozessaufnahme bei 0,7 m/min.

2 Gemittelte Prozessaufnahme bei 2,7 m/min.



3

ONLINE-QUALITÄTSDIAGNOSE FÜR DAS LICHTBOGEN-HYBRIDSCHWEISSEN MIT FESTKÖRPERLASER IM SCHIFFBAU

Aufgabenstellung

Die lasergestützten Fügeverfahren Laser-Remoteheften und Laser-Hybridschweißen 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 3D-Strukturen (t = 4 mm bis 10 mm) eingesetzt werden. Die Ermittlung der Füge- und Prozessqualität erfolgt dabei mit einem Fertigungsdemonstrator für das flexible Laser-Remote- und -Hybridschweißen und mit integrierter Qualitätsdiagnose und -bewertung.

Vorgehensweise

Beim Laser-MSG-Hybridschweißen wird intensive Strahlung über das gesamte optische Spektrum (UV, VIS, NIR) aus der Prozesszone emittiert. Zur berührungsfreien optischen Prozessüberwachung werden ortsauflösende bildgebende Kamera- und ortsintegrierende Sensorsysteme eingesetzt. Der Laser-MSG-Hybridschweißprozess wird mit dem CPC-System des Fraunhofer ILT mit einer High-Speed-CMOS-Kamera durch einen schmalbandigen optischen Bandbassfilter koaxial durch die Fokussieroptik hindurch beobachtet und überwacht. Zur »Blitzlicht«-Beleuchtung der Prozesszone wird ein Superpuls-diodenlaser eingesetzt, der lateral neben der Fokussieroptik angeordnet ist und gleichzeitig mit Belichtung der Kamera synchron zu den Strompulsen der Schweißstromquelle angesteuert wird. Ziel ist die automatisierte Fugenfolge und die online Überwachung der Stabilität des Laser-MSG-Hybridprozesses beim Fügen von 3D-Schiffbaustrukturen.

Ergebnis

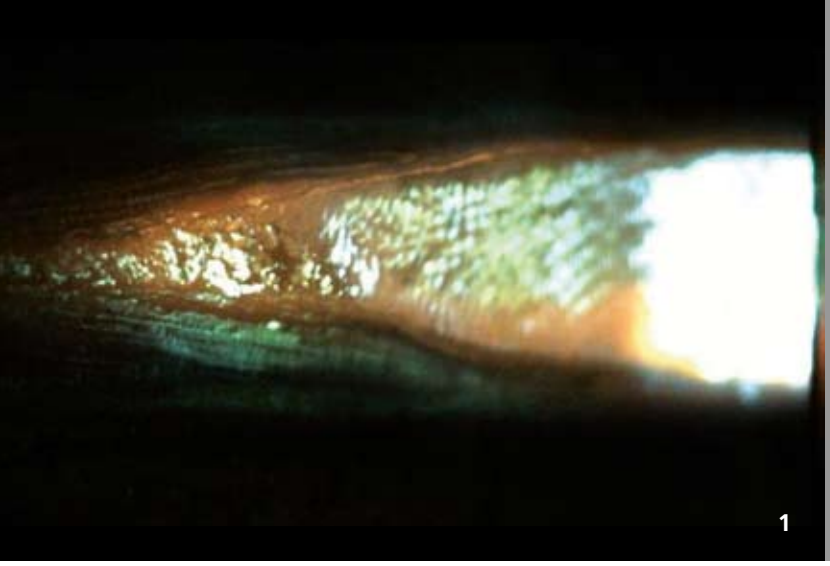
Durch die synchrone Belichtung zwischen den Strompulsen mittels der gepulsten Beleuchtungsstrahlquelle werden Bilddaten aufgezeichnet, aus denen die Position der Kapillare (Keyhole) relativ zum Fügespalt ermittelt wird. Bild 3 zeigt ein Einzelbild aus einer CPC-Aufnahmesequenz. Rechts neben der vom Laserstrahl erzeugten Kapillare (Keyhole) in der Bildmitte ist zwischen Schweißdraht und Schmelze ein fliegender Tropfen zu erkennen, der mit dem Schweißstrompuls 2 ms vorher vom Zusatzdraht abgeschmolzen worden ist. Bei einem stabilen Prozess wiederholt sich der Vorgang periodisch mit jedem Strompuls der Schweißstromquelle, sodass bedingt durch den Stroboskopeffekt in der Bilderfolge der Tropfen immer an derselben Position zu schweben scheint. Mit dem realisierten System werden mittelfristig Aussagen zur Prozessqualität und -stabilität laserbasierter Fügeverfahren für Anwendungen im Schiff-, Stahl- und Fahrzeugbau sowie bei der Herstellung von Rohren erwartet.

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

3 CPC-Momentaufnahme des Laser-Hybridschweißprozesses.



ULTRASCHALL-UNTERSTÜTZTES LASER-STRAHLSCHWEISSEN

Aufgabenstellung

Die Erzeugung homogener Schweißnähte an artungleichen metallischen Fügeverbindungen und schwer schweißbaren Metallen stellt die Schweißtechnik häufig vor große Herausforderungen. Zur Vermeidung des Nahtversagens muss das Fügeverfahren in der Lage sein, eine Minimierung von intermetallischen Phasen sowie eine signifikante Reduzierung von sprödharten Bereichen, Grobkornbildung und dendritischen Anisotropien zu ermöglichen.

Vorgehensweise

Um die oben genannten Fragestellungen zu lösen, wird ein zeitlich und örtlich modulierter Laserstrahl mit einer Ultraschallanregung des Schweißbads kombiniert. In einem ersten Schritt wurde die Wirkung von Körperschall mit 20 kHz auf die Ausbildung der Mikrostruktur in einem nichtrostenden ferritischen Stahl geprüft. Hierzu wurde das Schallfeld aus unterschiedlichen Richtungen zur Schweißrichtung in das Werkstück eingekoppelt. Die Untersuchung der Schweißnähte erfolgte metallographisch. Eine Prozessbeobachtung mittels Hochgeschwindigkeits-Kinematografie ergab Aufschlüsse über die Schallverteilung in der Schmelze und die Erstarrung.

1 Momentaufnahme des Schmelzbads.
2 Flachschliff einer Schweißnaht in 1.4512, ohne Beschallung geschweißt.
3 Flachschliff einer Schweißnaht in 1.4512 unter einer Schallleistung von 100 W bei 20 kHz, parallel zur Schweißrichtung beschallt.

Ergebnis

Unter den gegebenen Versuchsbedingungen lieferte eine Ankopplung parallel zur Schweißrichtung die besten Ergebnisse. Dabei ließen sich Leistungen von bis zu 500 W einkoppeln. Andere Richtungen der Ankopplung erbrachten im Widerspruch zur Literatur keine Effekte; eine Rissbildung setzte darüber hinaus bei geringeren Schallleistungen ein. Im Fall eines Werkstoffs mit ausgeprägt kolumnarer Erstarrung konnte der Bereich mit gleichgerichtetem Gefüge verbreitert werden, wobei die Korngröße geringfügig zunahm. In den Schwingungsbäuchen konnte eine Ankopplung der Schallwellen an die Schmelze beobachtet werden.

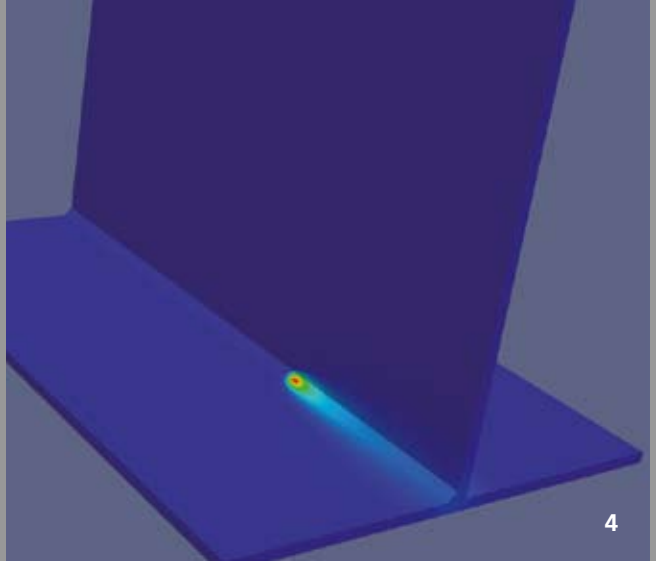
Anwendungsfelder

Die Ergebnisse finden dort Anwendung, wo ein isotropes Gefüge in Schweißnähten angestrebt wird. Dies sind die Vermeidung von Mitteldendriten beim Schweißen austenitischer Werkstoffe und die damit verbundene Rissgefahr sowie die Gefügehomogenisierung bei artungleichen Verbindungen. Hier werden Phasensäume aufgelöst und deren Bestandteile feindispers über den Schweißnahtquerschnitt verteilt, wodurch einerseits die Risshäufigkeit vermindert und andererseits eine Festigkeitssteigerung durch Dispersoide erreicht wird.

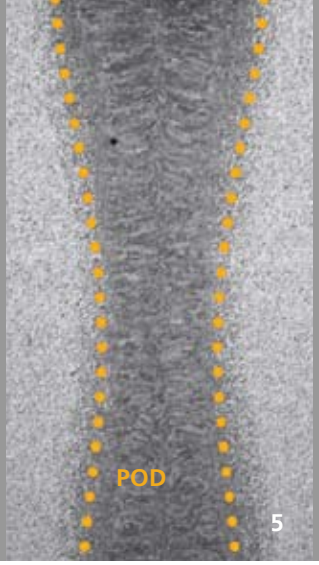
Ansprechpartner

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



4



5

AUTOMATISIERTE WÄRMEQUELLENKALIBRIERUNG BEIM LASERSTRAHLSCHWEISSEN

Aufgabenstellung

Kommerziell verfügbare Software zur Simulation des Laserstrahlschweißens erfasst in der Regel nicht alle physikalischen Phänomene, sondern bildet den Energieeintrag anhand einer parametrisierten Volumenquelle ab. Um eine äquivalente Beschreibung des Wärmeeintrags zu erreichen, werden die Werte der Parameter in einem iterativen Prozess durch Ausprobieren so lange kalibriert, bis berechnete und experimentelle Werte für die Temperatur hinreichend gut übereinstimmen. In jedem Iterationsschritt wird eine partielle Differenzialgleichung (PDE) in drei Raumdimensionen mit herkömmlichen Finite-Elemente(FE)-Verfahren unter einem erheblichen Rechenaufwand gelöst. Die Anzahl der Iterationsschritte hängt stark von der geschickten Anpassung der Parameter ab und erfordert ein fundiertes Expertenwissen.

Vorgehensweise

Ziele dieses Projekts sind die Automatisierung und Beschleunigung des Kalibrierungsprozesses bei mindestens gleicher Zuverlässigkeit gegenüber der etablierten Methodik. Zur Anpassung der Parameterwerte sowie zur Beurteilung der Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment werden Optimierungsverfahren angewandt. Zur Lösung der PDE werden parallelisierte effiziente numerische Verfahren sowie das Modellreduktionsverfahren Proper Orthogonal Decomposition (POD) eingesetzt.

Ergebnis

Durch die schnelle, automatisierte und zuverlässige Bestimmung der Parameterwerte entfällt die zeit- und somit kostenintensive Kalibrierungsphase durch einen Experten.

Die entwickelten effizienten numerischen Verfahren in Kombination mit dem POD-Verfahren bringen im Vergleich zu herkömmlichen FE-Verfahren eine erhebliche Zeitersparnis. So können die Parameterwerte einer Volumenquelle innerhalb weniger Stunden automatisiert und mit kontrollierbarem Fehler bestimmt werden.

Anwendungsfelder

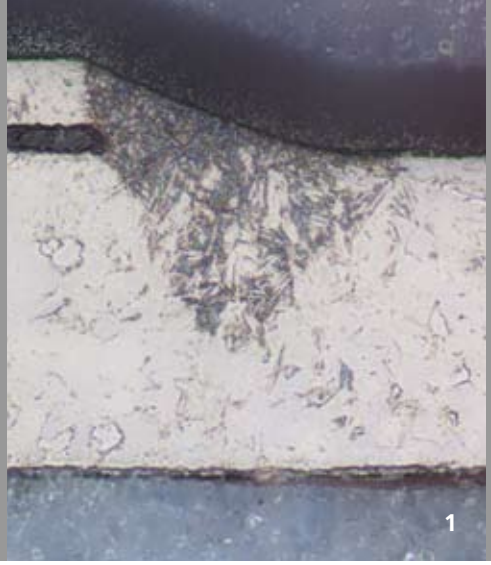
Die entwickelten Methoden ermöglichen eine automatisierte, schnelle und zuverlässige Kalibrierung der parametrisierten Wärmequelle. Dies ist die Grundlage für eine effiziente Schweißsimulation zur Vorhersage von Prozessqualitätsmerkmalen wie Verzug und Eigenspannungen.

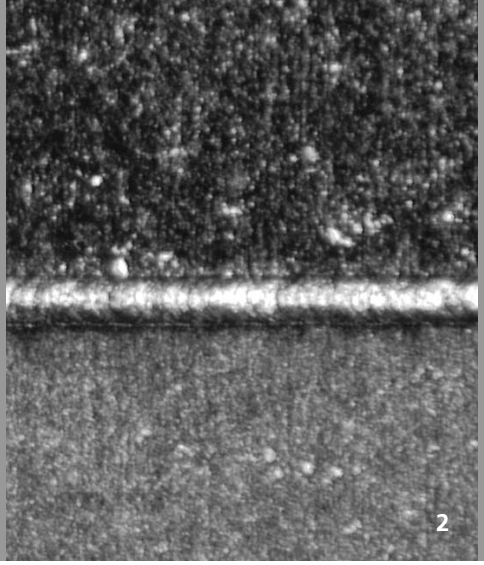
Ansprechpartner

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

4 Mit POD berechnete Temperatur für die Schweißung eines T-Stoßes.
5 Berechnete Schmelzlinie und zugehöriger Querschliff.





LASERSTRAHLSCHWEISSEN VON TITANMEMBRANEN FÜR DIE HERSTELLUNG VON DRUCKSENSOREN

Aufgabenstellung

Neue hochbrillante Strahlquellen wie Faserlaser mit einem Faserdurchmesser < 15 µm und einer exzellenten Fokussierbarkeit ermöglichen feine Schweißnähte im Bereich von wenigen µm Dicke und Tiefe. Mit diesen Parametern eignen sich Faserlaser insbesondere für eine energieminimierte Fügetechnik an thermisch sensiblen Bauteilen. Für einen intrakorporalen Drucksensor soll eine Membran von ca. 10 - 25 µm auf ein Titangehäuse verschweißt werden.

Die besondere Herausforderung beim Schweißen dünner Membranen ist eine mediendichte Naht, die eine gratfreie, d. h. einkerbungsfreie Naht und eine glatte Nahtunterraupe und Nahtoberraupe gewährleistet, um notwendige sterilisierbare Werkzeuge für die Medizintechnik herzustellen.

Vorgehensweise

Zur Herstellung des Drucksensors wird in einem Gehäuse mit einer Wandstärke von 100 µm mittels Laserablation eine rechteckförmige Öffnung erzeugt. Auf diesen Ausschnitt wird dann eine Titanmembran von ca.10 - 25 µm Dicke lasergeschweißt, über die mittels eines Sensors der Druck gemessen werden kann. Für das Verfahren wurde ein 200 W Faserlaser mit einer hohen Strahlqualität M^2 < 1,1 eingesetzt.

1 Schliffbild.

2 Schweißnaht.

Mittels einer prozessangepassten Schweißvorrichtung, die eine stabile spaltfreie Fixierung der Membran erlaubt, und einer gezielten Anpassung der Strahlposition auf der Bauteilkante wurde eine Schweißnaht mit glattem und sanftem Übergang in der Nahtoberraupe bei riss- und porenfreien Nähten erzielt. Hierbei wird der wesentliche Vorteil der neuen Strahlquellen deutlich, die eine sehr exakte Deposition der Energie an den Prozess sowie an die Bauteilverhältnisse erlauben.

Ergebnis

Das Laserstrahlschweißen mit Faserlasern ermöglicht durch die geringen Strahldurchmesser kleinste Schmelzvolumen und dadurch sehr notwendige Energien zum Schweißen. Hierdurch werden die bisherigen Grenzen des Laserstrahlschweißens insbesondere beim Fügen dünner Folien und Drähte mit geringen Wärmekapazitäten überwunden.

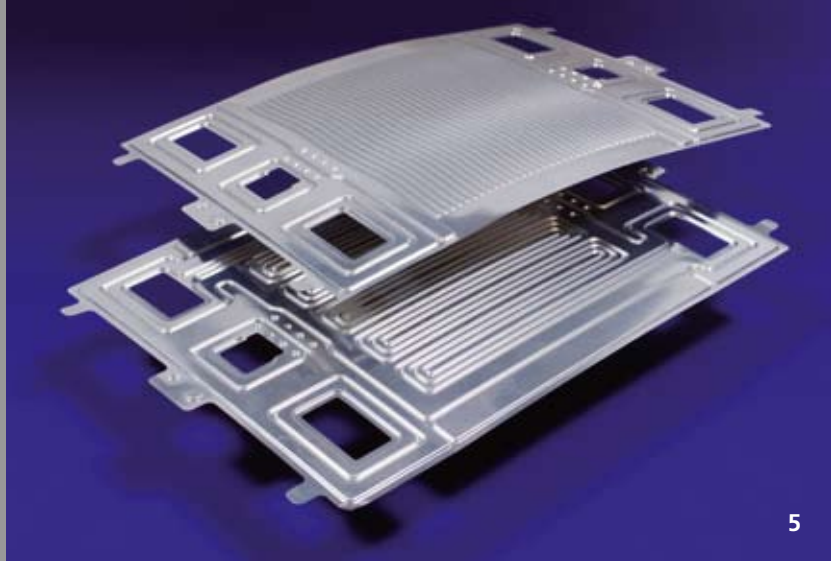
Anwendungsfelder

Das Laserstrahlschweißen von Titanmembranen ist in verschiedenen Medizintechnikanwendungen wie Blutdruck-, Augeninnendruck- und Blasendruckmessung für die Herstellung von Sensoren einsetzbar. Weitere Anwendungen des Verfahrens sind in der Kontaktierung von Drähten und Leadframes zu sehen.

Ansprechpartner

Vahid Nazery Goneghany
Telefon +49 241 8906-159
vahid.nazery@ilt.fraunhofer.de

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



SCHWEISSEN VON BIPOLARPLATTEN

Aufgabenstellung

Die Nutzung regenerativer Energiequellen in Form von Wasserstoff oder Methanol bietet die Möglichkeit, die Umweltbelastung zu reduzieren und die Wirkungsgrade in der Energieerzeugung zu erhöhen. Ein Beispiel hierzu ist die Direktmethanol-Brennstoffzelle. Diese bietet gegenüber Akkumulatoren und H_2-Brennstoffzellen eine deutlich höhere Reichweite bei vergleichbaren Systemvolumina. Um den Wirkungsgrad der Brennstoffzellen noch weiter zu steigern, können an die Prozessmedien angepasste Flowfieldgeometrien (z. B. als Bipolarplatten) verwendet werden, wodurch jedoch eine Füge- und Montagetechnik für den Aufbau in Stacks notwendig ist. Niedrige Fügezeiten und hohe Reproduzierbarkeit zur Erzeugung dichter Schweißnähte sind hier die Anforderungen, um eine Akzeptanz im Markt zu erreichen.

Vorgehensweise

Das Laserstrahlschweißen bietet beste Voraussetzungen, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Die Verwendung einer aufgabengerechten Spannvorrichtung und die Anpassung der Schweißparameter für unterschiedliche Materialien sind zentrale Aufgaben. Hierzu wurde eine angepasste Spannvorrichtung entwickelt und die Schweißung von Bipolarplatten mit einer Größe von ca. 190 x 140 mm (Dicke 2 x 0,1 mm) mit einem Faserlaser durchgeführt.

Ergebnis

Die Schweißung von Bipolarplatten mit Faserlasern lässt sich in einer Zeit von weniger als 20 s pro Plattenpaar realisieren, sodass eine Produktion im Serienmaßstab möglich ist. Prozessfehler lassen sich durch die Spannvorrichtung sowie Schutzgas und angepasste Prozessparameter reduzieren und vermeiden.

Anwendungsfelder

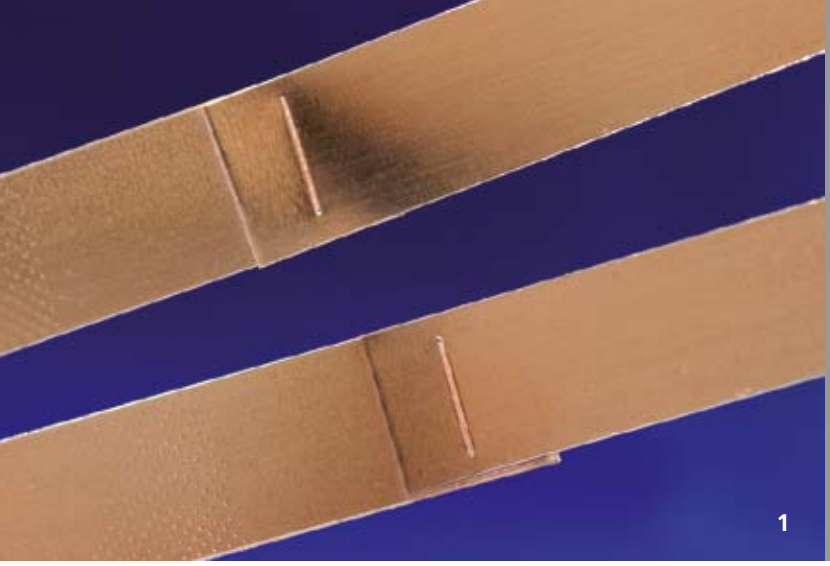
Die Verwendung von laserstrahlgeschweißten Bipolarplatten ermöglicht durch den erhöhten Wirkungsgrad der Bipolarplatten höhere Reichweiten im Mobilitätssektor. Die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Spann- und Prozesstechnik lassen sich auch auf andere vergleichbare Fügeaufgaben, wie z. B. Mikrofluidikkomponenten oder Designelemente, übertragen.

Ansprechpartner

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

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

3 Querschliff der lasergeschweißten Naht.
4 Aufsicht einer Schweißnaht.
5 Unterschiedliche Flowfieldgeometrien der Bipolarplatten.



MIKROSCHWEISSEN VON KUPFERBAUTEILEN MITTELS LEISTUNGSMODULATION

Aufgabenstellung

Kupfer ist nach wie vor der wichtigste Werkstoff zur Stromleitung und zum Aufbau elektrischer und elektronischer Systeme. Die hohe Wärmeleitung und die geringe Absorption von Kupfer(-legierungen) im nahen Infrarot-Wellenlängenbereich stellen beim Schweißen und insbesondere beim Laserschweißen Herausforderungen dar. Bezogen auf eine Kontrolle der Einschweißtiefe kann gerade bei Kupferwerkstoffen ein Spiking, also eine lokale Zunahme der Einschweißtiefe, beobachtet werden. Darüber hinaus treten beim Nahtschweißen teilweise Instabilitäten, wie Auswürfe, auf.

Vorgehensweise

Im Rahmen des Projekts »CuBriLas« wurden verschiedene Ansätze zur Erzeugung einer verbesserten Schweißnahtqualität und zur Einstellung konstanter Einschweißtiefen untersucht. Neben den Parametern Strahldurchmesser, -leistung und Vorschub werden durch die zeitliche und örtliche Leistungsmodulation weitere Parameter erzeugt, die die Möglichkeiten zur Schmelzbadkontrolle und zur Verringerung von Nahtfehlern erhöhen. Bei der zeitlichen Leistungsmodulation wird eine Sinus-Schwingung auf die Laserleistung aufgeprägt, welche in Frequenz und Amplitude angepasst wird. Im Falle der örtlichen Leistungsmodulation wird die Vorschubbewegung von einer kreisförmig oszillierenden Bewegung überlagert und somit werden Oszillationsfrequenz und -amplitude variiert.

Ergebnis

Durch den Einsatz von zeitlicher Leistungsmodulation im Bereich von einigen Hundert Hertz wird eine annähernd konstante Einschweißtiefe bei z. B. der Bronze CuSn8 erreicht, wobei Bleche im Bereich 0,2 mm Dicke untersucht wurden. Durch die örtliche Leistungsmodulation kann hierbei auch eine Stabilisierung der Schweißnaht, besonders im Hinblick auf Spaltüberbrückbarkeit, erzielt und der Anbindungsquerschnitt im Überlapp vergrößert werden.

Anwendungsfelder

Die Anwendung des Laserstrahlschweißens ist ein aktuelles Thema in der Leistungselektronik oder Batterietechnik. Die verbesserten Möglichkeiten der Tiefensteuerung von Schmelzbädern, um Durchschweißungen und damit Schädigungen des Substrats oder dünnwandiger Batterien zu vermeiden, sind entscheidende Gründe, das Laserschweißen in diesen Bereichen einzusetzen.

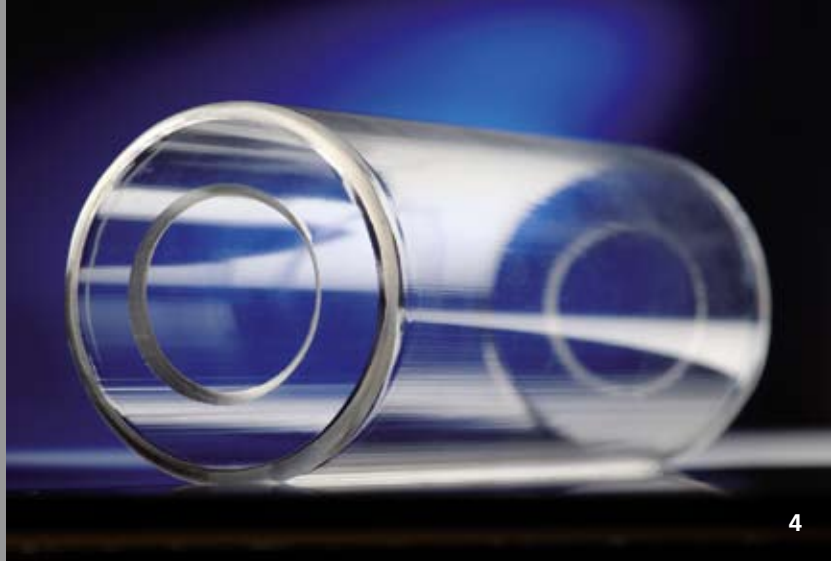
Ansprechpartner

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 Überlapp-Schweißnaht in CuSn6.

2 Querschliff modulierte Schweißnaht.



SCHWEISSEN VON QUARZGLAS MIT CO_2-LASERSTRAHLUNG

Aufgabenstellung

Das Schweißen von Quarzglas wird derzeit überwiegend konventionell mittels Gasbrennersystemen durchgeführt. Allerdings weist dieser Prozess nur einen geringen Wirkungsgrad auf, da nur ein kleiner Teil der vom Brenner abgestrahlten Energie zum Schmelzen verwendet wird. Ebenso nachteilig ist die im Vergleich zur Nahtoberfläche große Prozesszone mit unerwünschten Rückständen, wie z. B. Ruß, die eine Nachbehandlung erforderlich macht. Hinsichtlich eines automatisierten Fertigungsprozesses liegen im Vergleich zum Laserschweißen ein größerer Aufwand sowie eine geringere Prozessreproduzierbarkeit vor. Alternativ kann anstelle einer Gasflamme die Energie zum Aufheizen auf die erforderliche Verarbeitungstemperatur prozesssicher durch eine CO_2-Laserstrahlquelle emittiert werden.

Vorgehensweise und Ergebnis

Die elektromagnetische Strahlung der CO_2-Laser-Wellenlänge von 10,6 µm wird wie beim konventionellen Schweißen auf der Bauteiloberfläche absorbiert. Der Energietransport in die meist durchzuschweißende Materialstärke findet durch Wärmeleitung statt. Im Gegensatz zur Gasflamme findet dabei keine chemische Wechselwirkung mit den zu fügenden Bauteilen statt. Ein Verfahrensansatz zum Laserschweißen von Quarzglas ist die quasisimultane Bestrahlung, bei der die Energie durch sich vielfach wiederholendes Rotieren von Bauteil und/ oder Laserstrahl homogen in die gesamte Fügezone eingebracht wird. Eine angepasste, bauteilgrößenunabhängige Bestrahlungsstrategie, welche als eine Kombination aus kontinuierlichem Vorschub entlang der Fügenaht und quasisimultaner Überlagerung mit einem Bestrahlungsmuster beschrieben werden kann, ermöglicht derzeit das Durchschweißen von Materialdicken bis 3 mm bei minimalem Energieeintrag.

Anwendungsfelder

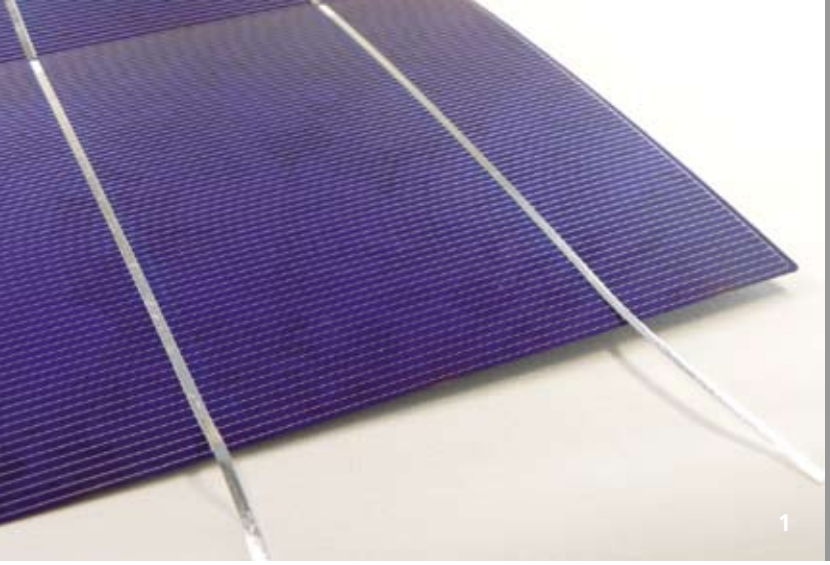
Anwendung findet das Verfahren in der pharmazeutischen Fertigung, wie beim hermetischen Verschließen von Primärpackmitteln, sowie bei Produkten mit temperaturempfindlichen Funktionsschichten, wie z. B. bei UV-Quellen und Sensorgehäusen. Darüber hinaus bietet das Verfahren durchaus Möglichkeiten zur Substitution von gängigen Feuerprozessen, wie sie im chemischen Apparatebau oder in der Lampenindustrie anzutreffen sind.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Elmar Gehlen
Telefon +49 241 8906-640
elmar.gehlen@ilt.fraunhofer.de

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

3 Verschlossene Medikamentenampulle.
4 Quarzglaszylinder mit stirnseitig aufgeschweißter Bordscheibe.



LASERLÖTEN VON SOLARZELLEN

Aufgabenstellung

Die Anforderungen an die Lebensdauer und die damit verbundene erforderliche Fertigungsqualität von Photovoltaikmodulen sind in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Gleichzeitig müssen die Produktionskosten durch eine Verringerung der Waferdicke auf unter 150 µm und eine höhere Prozesstaktung gesenkt werden. Ein Schlüsselprozess bei der Modulfertigung ist die Zellkontaktierung, bei der metallische Zellverbinder mittels Löten an die Solarzelle gefügt werden. Ziel ist, die mechanische und thermische Belastung beim Fügen des Zellverbinders zu minimieren, um Zellbrüche durch induzierte Spannungen zu vermeiden. Dabei soll die Prozesszeit unter 3 s betragen.

Vorgehensweise

Durch die geringe Energieeinbringung birgt das Laserlöten gegenüber konventionellen Verfahren das größte Potenzial, die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Für die Bestrahlung der Zellverbinder wird sowohl ein Verfahrensansatz unter Nutzung eines Laserscanners sowie die Verwendung einer Festoptik mit linienförmiger Strahlformung gewählt. Der Einsatz eines Galvanometerscanners mit pyrometrischen Messsystemen ermöglicht die Ermittlung der Temperaturverteilung in der Fügezone, wodurch eine individuelle Energieeinbringung ermöglicht wird. Im Zuge der Optimierung der Verfahrensparameter wie z. B. Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Bearbeitungsstrategie wird die Ursache für entstehende Mikrorisse analysiert. Durch die Strahlformung mit Festoptik wird die gesamte Fügezone quasisimultan aufgeheizt. Gleichzeitig wird der Prozess mittels Wärmebildkameras auf Prozessfehler hin überprüft.

Ergebnis

Durch die Verwendung der Festoptik kann der Zellverbinder über die gesamte Länge innerhalb 1 s gefügt werden. Der Galvanometerscanner ermöglicht Prozesszeiten im Bereich 1 - 2 s und erreicht durch verzugsminimierte Bearbeitungsstrategien Kontaktierungen mit Abzugskräften bis zu 6 N. Die Rissbildung im Kontaktierungsprozess kann durch minimale Energieeinbringung verhindert werden.

Anwendungsfelder

Die Laserverbindungstechnik wird in der Kontaktierung von konventionellen kristallinen Siliziumsolarzellen angewendet. Durch die Geometriefreiheit bei der scannenden Bearbeitung ist die Erweiterung der Anwendung auf neuartige Rückseitenkontaktzellen mit punktuellen Kontaktierungen möglich. Potenzielle Anwendungen sind bei der Verbindungstechnik im Elektronikbereich möglich.

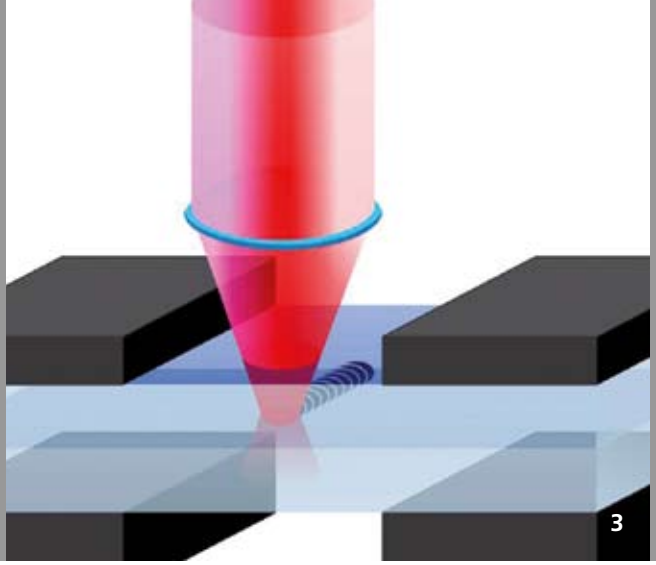
Ansprechpartner

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

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

1 Solarzelle mit gefügten Zellverbindern.

2 Laserlötprozess.



LASERSTRAHLSCHWEISSEN VON INFUSIONSSCHLÄUCHEN MIT NIR-HOCHLEISTUNGS-DIODENLASERN

Aufgabenstellung

Das Laserstrahlschweißen von Kunststoffen zeichnet sich durch einen gezielten und kontaktfreien Energieeintrag aus und ist aufgrund der Schmutz- und Partikelfreiheit ideal zum Verschweißen medizinischer Bauteile geeignet. Allerdings wird für diese Bauteile oftmals vollkommene Transparenz gefordert, die aufgrund der Verwendung von Absorbern für das konventionelle Transmissions-Kunststoffschweißen mit einer Kombination aus absorbierendem und transparentem Kunststoff in der Regel nicht gewährleistet werden kann und bisher dem Einsatz des Verfahrens entgegenstand. Für einen Infusionsschlauch galt es, Schlauchende und Verbindungsstück, beide aus additivfreiem Polypropylen (PP), miteinander zu verschweißen (Bild 4).

Vorgehensweise

Ein Großteil der Kunststoffe weist im nahen Infrarotbereich oberhalb von 1,2 µm Wellenlänge charakteristische Absorptionsbanden auf, die durch Wahl einer Strahlquelle mit geeigneter Emissionswellenlänge ausgenutzt werden können, um den Einsatz von Absorbern entbehrlich zu machen. Bei fehlendem Absorber haben beide Fügepartner die gleichen optischen Eigenschaften und die Absorption der Laserstrahlung erfolgt nicht mehr an ihrer Grenzfläche. Um dennoch die Energie gezielt in die Fügeebene einzubringen, wird der Laserstrahl mittels einer Optik mit hoher numerischer Apertur (NA) fokussiert (Bild 3). Dadurch hat der Strahl nur im Fokus eine zum Schmelzen ausreichende Intensität, außerhalb der Fokuslage bleibt das Material fest.

Ergebnis

Die Messung der optischen Eigenschaften ergab, dass PP bei 1,7 µm Wellenlänge über eine ausreichend hohe intrinsische Absorption verfügt. Mithilfe eines Hochleistungsdiodenlasers, der bei gleicher Wellenlänge emittiert, konnten beide Elemente des Infusionsschlauchs miteinander verschweißt werden. Die erzeugte Naht ist von außen nicht sichtbar und weist sowohl eine hohe Festigkeit als auch Mediendichtigkeit auf. Die zum Schweißen benötigte Zykluszeit beträgt ca. 10 s.

Anwendungsfelder

Das vorgestellte Verfahren findet hauptsächlich im medizinischen Bereich Anwendung, in dem oftmals transparente Bauteile gefordert werden. Neben der Transparenz bietet das Verfahren auch Kostenvorteile, da neben den Kosten für den Absorber auch die für dessen Einsatz notwendigen zeit- und kostenintensiven Zulassungsverfahren eingespart werden können.

Ansprechpartner

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

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

3 Schweißen transparenter Kunststoffe mit hoher numerischer Apertur (NA).

4 Infusionsschlauch mit Verbindungsstücken.

SCHWEISSEN VON ANTENNEN-GEHÄUSEN AUS ASA-POLYMER MITTELS 1,5 µm FASERLASER

Aufgabenstellung

3G-C-Antennen sind aktive, hochpräzise Systeme, die für den Signalempfang aller existierenden Satellitennavigationssysteme entwickelt worden sind. Eine mediendichte Versiegelung des Gehäuses ist für die Langzeitstabilität der Antenne unerlässlich, weil diese rauen Umwelteinflüssen ausgesetzt sind.

Vorgehensweise

Eine große Anzahl von Kunststoffen weist im nahinfraroten Wellenlängenbereich oberhalb von 1,5 µm ein hohes Absorptionsvermögen auf und muss nicht mit absorbierenden Additiven versehen werden, um einen Laserschweißprozess zu ermöglichen. Im Rahmen des EU-Projekts POLYBRIGHT werden Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1567 nm (Erbiumdotierung) und 1940 nm (Thulliumdotierung) bei maximalen Laserleistungen von 120 W entwickelt. Die Emissionswellenlängen stimmen mit lokalen Absorptionsmaxima verschiedener unpigmentierter Kunststoffe überein, sodass diese Strahlquellen insbesondere für das Schweißen von Kunststoffen geeignet sind. Insbesondere weist im vorliegenden Fall der untere weiße Fügepartner in diesem Wellenlängenbereich ein ausreichendes Absorptionsvermögen auf, sodass auch bei verschiedenfarbigen Kunststoffen und hoher Reflexion im Sichtbaren eine gute Nahtqualität erzielt werden kann.

1 G3-C-Antennengehäuse (navXperience, Kunststoff ASA), geschweißt mittels 1,5 µm Faserlaserstrahlung in kombinierter REMOTE/TWIST®-Konfiguration.

Ergebnis

Innerhalb einer am Fraunhofer ILT aufgebauten Bearbeitungsanlage werden die Gehäuseober- und -unterschale der Antenne im Überlapp zueinander positioniert, gespannt und die Laserstrahlung mit einem Galvanometerscanner entlang der Schweißkontur geführt. Zur Vermeidung hoher Intensitätsspitzen wird die fokussierte Laserstrahlung entlang einer Kreisbahn oszillierend bewegt (TWIST®-Verfahren).

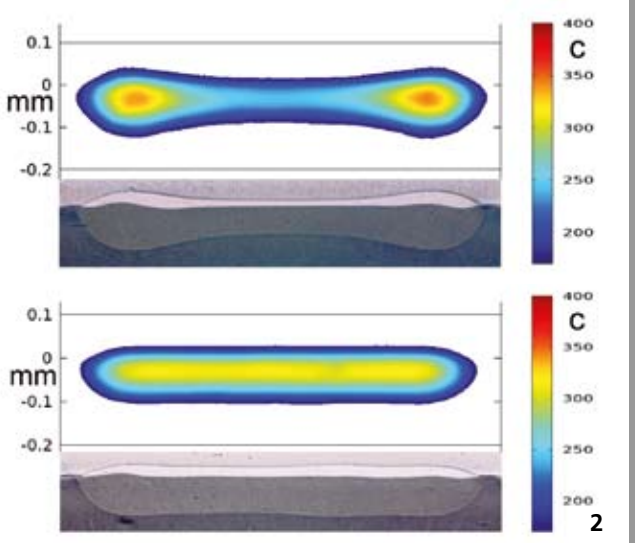
Anwendungsfelder

Mit dieser Demonstratoranlage kann den wachsenden Anforderungen der Industrie Rechnung getragen werden, statt der klassischen Schwarz-Weiß-Konfiguration auch andersfarbige Kunststoffbauteile (Bild 1) bis hin zu transparenten Bauteilen zu fügen. Anwendungen ergeben sich insbesondere im Consumer- und Medizintechnikbereich, in denen aufgrund verschiedenster Anforderungen auf eine Pigmentierung mit Kohlenstoff verzichtet werden muss.

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

THERMISCHE SIMULATION DER SCHWEISSNAHT-HOMOGENITÄT BEIM TWIST®-LASERSCHWEISSEN

Aufgabenstellung

Beim Laserschweißen von Kunststoffen mittels hochbrillanter Faserlaserquellen wird das TWIST®-Verfahren zur Homogenisierung des Energieeintrags verwendet, wobei die Schweißkontur mit einer Kreis- oder Ellipsenoszillation überlagert ist. Eine Optimierung der jeweiligen Oszillationsfiguren und Oszillationsparameter erfolgt bisher nur durch experimentelle Studien. Eine thermische Simulation der Energiedeposition und der daraus resultierenden Aufschmelzung am Interface der beiden Fügepartner soll die experimentell erzielten Ergebnisse verifizieren und gleichzeitig eine Vorhersage- und Optimierungsmöglichkeit schaffen.

Vorgehensweise

Auf Basis einer Berechnung der optischen Strahlungspropagation durch den transparenten Fügepartner und der werkstoffabhängigen Absorption im zweiten Fügepartner wird eine Energiequelle simuliert, die als Eingangsgröße für eine FEM-Wärmeleitungsberechnung im Volumen der Fügepartneranordnung dient. Dabei wird sowohl die Lichtstreuung durch den oberen teilkristallinen Fügepartner als auch die Eindringtiefe in den unteren Fügepartner berücksichtigt. Ein Vergleich der damit erhaltenen Schmelzvolumensimulationen mit Mikrotomschnitten von Flachproben erlaubt eine Verifizierung und eine Kalibrierung des simulativen Ansatzes.

Ergebnis

Für TWIST®-Schweißungen mit 0,8 mm Nahtbreite, 80 µm Strahldurchmesser, 50 mm/s Vorschub und 2000 Hz TWIST®-Frequenz werden Kreis (0,8 mm Durchmesser) und Ellipse (0,8 mm und 0,2 mm Achslängen) anhand der Mikrotomschnitte sowie der theoretischen Temperaturverteilung verglichen (Bild 2). Der Vergleich zeigt, dass mit einer ellipsenförmigen Oszillation der Energieeintrag und damit die Schweißnahtgeometrie homogenisiert werden können, wobei das Achsenverhältnis ausschlaggebend für den Grad der Homogenität ist.

Anwendungsfelder

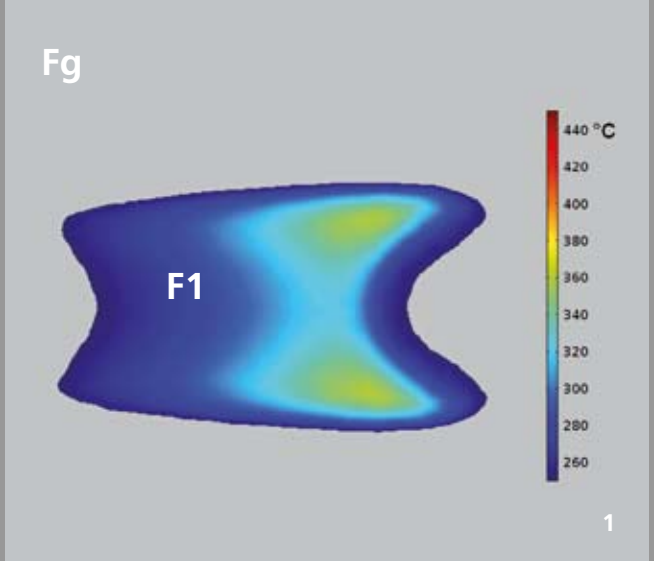
Mit der verfügbaren Simulationsbasis für TWIST®-Schweißungen kann auf Basis der optischen und werkstofftechnischen Parameter eine Optimierung der Oszillationsparameter für TWIST®-Schweißungen vorgenommen werden. Damit lassen sich die Entwicklungszeiten für Anwendungen des Verfahrens in der Kunststofftechnik erheblich verkürzen.

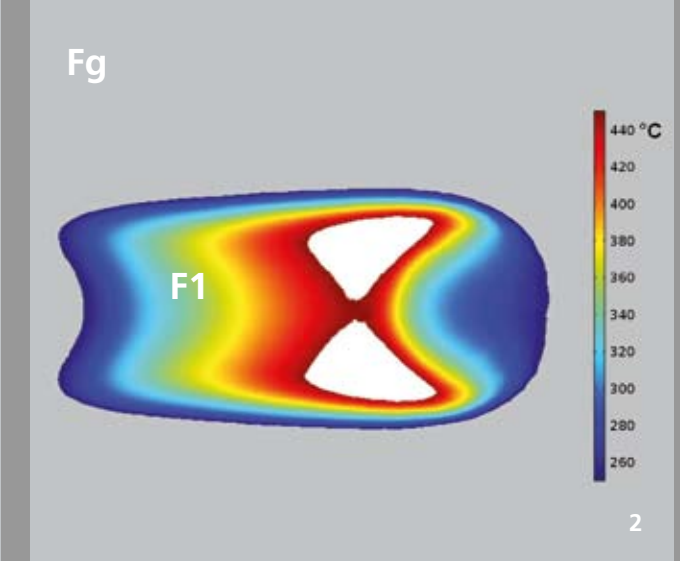
Ansprechpartner

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





SIMULATION DES NAHT-FESTIGKEITSOPTIMUMS BEIM LASERSCHWEISSEN VON KUNSTSTOFFEN

Aufgabenstellung

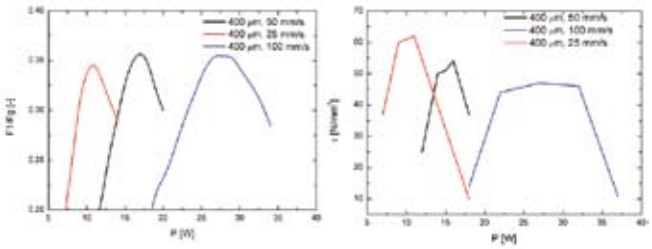
Die Nahtfestigkeit einer Kunststoffschweißverbindung hängt primär vom Anbindungsquerschnitt der Schweißnaht ab. Insbesondere beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen ist eine exakte Vorhersage dieser Festigkeit bisher kaum möglich, da die Fläche der aufgeschmolzenen Zone von einer Vielzahl von Faktoren, wie Absorption, Strahlquerschnitt, Schweißstrategie und anderem, abhängt. Zur Ermittlung der optimalen Schweißnahtfestigkeit bei vorgegebenen Werkstoff- und Bauteilparametern müssen bislang aufwendige Reihenversuche und Analysen durchgeführt werden.

Vorgehensweise

Mit einem neuen simulationstechnischen Ansatz auf der Basis einer kombinierten Simulation aus Strahlungspropagation und Temperaturausbildung im Werkstoff kann die bisherige Vorgehensweise auf wenige Verifikationsversuche reduziert werden. Dabei wird die Nahtfestigkeit mit thermischen Simulationsergebnissen der Schweißnahtgeometrie korreliert. Für verschiedene Versuchsparameter wurde dazu das jeweilige Temperaturfeld in der Fügezone berechnet. Aus der Simulation wird als charakteristische Größe der Flächeninhalt F1 des Gebiets, in dem die Temperatur größer als die Schmelztemperatur (250 °C) und kleiner als die Zersetzungstemperatur (450 °C) ist, bestimmt.

Ergebnis

Der Vergleich der ermittelten Nahtfestigkeiten und der Flächeninhalte F1 zeigt für verschiedene Prozessparameter jeweils ein übereinstimmendes lokales Maximum bei einer bestimmten Laserleistung. Die Verfahrensparameter, bei denen eine optimale Nahtfestigkeit erreicht wird, lassen sich also über die Berechnung des Temperaturfelds angeben.



Anwendungsfelder

Die Anwendung des neuen Optimierungsansatzes liegt vor allem in der Planung und Auslegung von Laser-Kunststoffschweißprozessen sowie der entsprechenden Bauteilkonstruktion.

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

Berechnete Temperaturfelder für zwei unterschiedliche Laserleistungen (Bild 1: 12 W, Bild 2: 17 W).

TOPOLOGIEOPTIMIERTES BAUTEILDESIGN

Aufgabenstellung

Mit Topologieoptimierungsmethoden kann die Geometrie eines Bauteils optimal an funktionale Anforderungen (z. B. Krafteinleitung, Festigkeit) angepasst werden. So können beispielsweise sehr leichte und gleichzeitig sehr steife Bauteile entworfen werden. Das resultierende Design zeichnet sich meist durch eine filigrane, bionische Struktur aus, die auch innere Hohlstrukturen umfassen kann. Da ein solches Design mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht herstellbar ist, werden die Ergebnisse der Topologieoptimierung nur als Anhaltspunkt verwendet und das Design von Hand so angepasst, dass es z. B. gegossen oder zerspant werden kann. Die Bauteile werden dabei wieder massiver und schwerer, d. h. die Möglichkeiten der Topologieoptimierung werden nur teilweise genutzt. Generative Fertigungverfahren erlauben die Fertigung nahezu beliebiger Geometrien und bieten somit die Möglichkeit, das Potenzial der Topologieoptimierung vollständig zu nutzen.

Vorgehensweise

Bei der Fertigung mit Selective Laser Melting (SLM) müssen die Algorithmen zur Topologieoptimierung an die fertigungstechnischen Möglichkeiten von SLM angepasst werden. Dazu werden z. B. Filterfunktionen und Gitterparameter an minimal realisierbare Featuregrößen angepasst. Ein derart topologieoptimiertes Design muss nur leicht geglättet werden, um anschließend direkt mit SLM aufgebaut zu werden.

Ergebnis

Ausgangspunkt ist das Design für einen Achsschenkel, das für das Hochgeschwindigkeitszerspanen optimiert war. Im Vergleich zu diesem über Jahre mehrfach optimierten Design konnten mit der SLM-spezifischen Topologieoptimierung ca. 18 Prozent des Bauteilgewichts eingespart werden. Der SLM-optimierte Achsschenkel hat Abmessungen von ca. 220 mm x 160 mm und wurde mithilfe von High Power Selective Laser Melting (HP-SLM) mit einer Laserleistung von 500 W aus einer hochfesten Aluminiumlegierung (AlMgSc) aufgebaut.

Anwendungsfelder

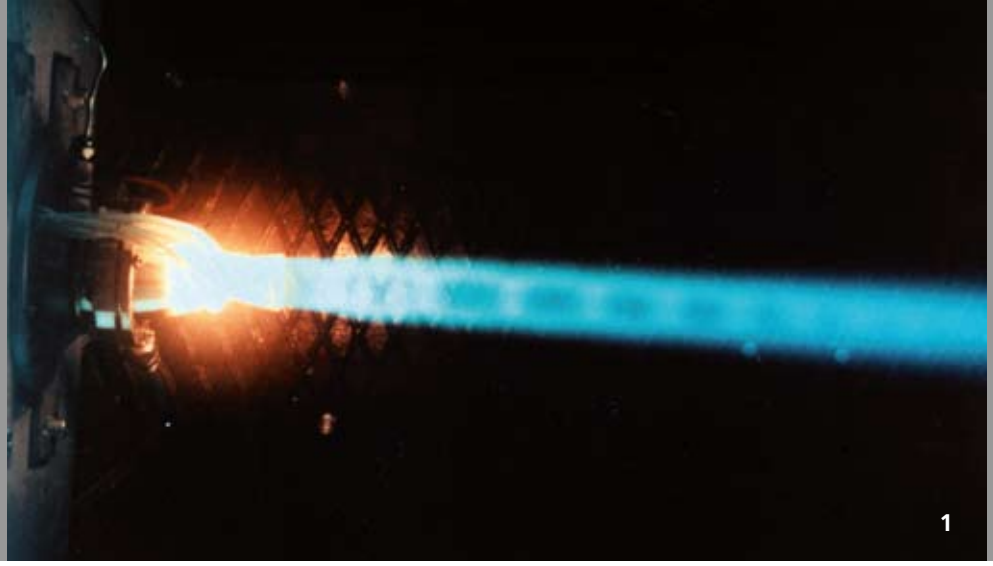
Anwendungsfelder für generativ gefertigte, topologieoptimierte Bauteile sind neben dem Automobilbau vor allem die Luft- und Raumfahrtindustrie, da hier das Bauteilgewicht eine wesentliche Rolle spielt.

Ansprechpartner

Dipl.-Wirt.-Ing. Simon Merkt
Telefon +49 241 8906-658
simon.merkt@ilt.fraunhofer.de

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

3 Generativ gefertigtes, topologieoptimiertes Automobilbauteil.



GENERATIVE FERTIGUNG VON SCHUBDÜSEN FÜR SATELLITEN-TRIEBWERKE

Aufgabenstellung

Für die Positionierung von Satelliten im Weltall werden Schubdüsen mit einer Schubkraft von bis zu 400 N eingesetzt. Um einen geringen Brennstoffverbrauch und damit eine längere Betriebszeit zu ermöglichen, muss bei der Verbrennung eine möglichst hohe Temperatur erzeugt werden. Legierungen auf Platinbasis erweisen sich als sehr geeignet, um die aus den hohen Temperaturen resultierenden mechanisch-thermischen Anforderungen an die Schubdüsen zu erfüllen. Diese Werkstoffe werden gießtechnisch hergestellt und die spanende Verarbeitung ist aufgrund des hohen Materialpreises sehr kostenintensiv. Deswegen bieten sich ressourcenschonende generative Verfahren wie das Selektive Laserschmelzen (SLM) an, um Schubdüsen aus Platinlegierungen herzustellen.

Vorgehensweise

In einem von der European Space Agency (ESA) geförderten Forschungsvorhaben werden gemeinsam von EADS Space Transportation, EADS Innovation Works und dem Fraunhofer ILT unterschiedliche generative Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die Verarbeitung einer ausgewählten Platinlegierung untersucht. Am Fraunhofer ILT wird die Verarbeitbarkeit der Platinlegierung mittels SLM untersucht. Dazu wird ein geeignetes Prozessfenster zur Herstellung von defektfreien Probekörpern mit einer Dichte von ca. 100 Prozent ermittelt und das erzeugte Gefüge metallurgisch untersucht. Nachfolgend werden Festigkeitskennwerte bei statischer und dynamischer Belastung bei den relevanten Einsatztemperaturen an mit SLM hergestellten Testbauteilen bestimmt. Abschließend soll bei Erreichen der erforderlichen mechanischen Kennwerte eine Schubdüse generativ gefertigt und unter Einsatzbedingungen getestet werden.

Ergebnis

Die ersten Ergebnisse der bisher erfolgten Untersuchungen zeigen, dass die ausgewählte Platinlegierung mit SLM zu defektfreien Bauteilen mit einer Dichte von ca. 100 Prozent verarbeitet werden kann. Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften bei Temperaturen bis 1500 °C werden demnächst an den bereits gefertigten Testbauteilen durchgeführt.

Anwendungsfelder

Bei erfolgreichen Testergebnissen können Schubdüsen aus Platinlegierungen mittels SLM ressourceneffizient und damit erheblich kostengünstiger als bisher gefertigt werden.

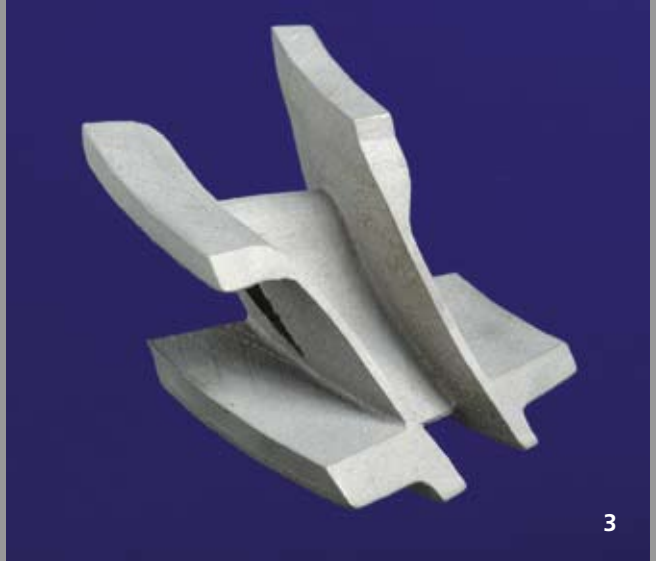
Ansprechpartner

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

1 Schubdüse im Brennkammertest, Quelle: EADS ST.

2



3

HIGH-POWER-SLM-BEARBEITUNG VON INCONEL 718

Aufgabenstellung

Das generative Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM) wird nach derzeitigem Stand der Technik überwiegend für die Herstellung von Prototypen und Endprodukten in geringen Stückzahlen eingesetzt. Um das Potenzial des SLM für die Serienfertigung nutzbar zu machen und Bauteile in größeren Stückzahlen wirtschaftlich herstellen zu können, ist allerdings eine signifikante Steigerung der Produktivität notwendig. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, bietet die Anwendung von High Power Selective Laser Melting (HP-SLM) in Kombination mit einer angepassten Prozessführung (z. B. Hülle-Kern-Strategie). Ein aktuelles Anwendungsbeispiel für das SLM ist die Fertigung von Komponenten für Testtriebwerke aus der Nickelbasis-Legierung Inconel 718. Für diesen Werkstoff liegt noch keine HP-SLM-Prozessführung vor.

Vorgehensweise

Beim HP-SLM wird durch Verwendung höherer Laserleistungen (P_L = 1 kW) eine Steigerung der Aufbaurate erreicht. Insbesondere bei Werkstoffen mit vergleichsweise niedriger Wärmeleitfähigkeit ($\lambda \leq 30$ W/mK) wird dazu eine angepasste Prozessführung (Hülle-Kern-Prinzip) eingesetzt. Dabei wird das zu erstellende Bauteil in einen Hüll- und Kernbereich unterteilt, denen unterschiedliche Verfahrensparameter zugewiesen werden können. Für die Anwendung dieser Prozessführung für IN 718 müssen sowohl geeignete Verfahrensparameter für den Hüllbereich als auch den Kernbereich bestimmt werden, mit denen eine Bauteildichte von ca. 100 Prozent erzeugt wird. Außerdem muss die Prozessführung eine defektfreie Anbindung zwischen Hülle und Kern gewährleisten.

Ergebnis

Als Ergebnis konnte für die HP-SLM-Bearbeitung mit angepasster Prozessführung (Hülle-Kern-Prinzip) die Herstellung von Bauteilen mit einer Dichte ≥ 99,5 Prozent sowohl für den Hüll- und Kernbereich als auch für den Übergangsbereich zwischen Hülle und Kern erreicht werden. Damit ist durch den Einsatz einer Laserleistung P_L von bis zu 1 kW im Vergleich zum konventionellen SLM-Prozess mit $P_L \leq 200$ W eine Steigerung der Aufbaurate bis zu einem Faktor 4 möglich.

Anwendungsfelder

Das derzeit wichtigste Anwendungsfeld des SLM für die Verarbeitung von Inconel 718 ist der Turbinenbau. Aufgrund der gesteigerten Produktivität bietet das HP-SLM das Potenzial zur wirtschaftlichen Serienfertigung von Bauteilen in größeren Stückzahlen.

Ansprechpartner

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

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

2 Generativ gefertigtes Segment (Vorderansicht) eines Nozzle Guide Vane aus Inconel 718, Quelle: TurboMeca.

3 Rückansicht.

OPTISCHE SYSTEME FÜR DAS HIGH POWER SLM

Aufgabenstellung

Der deutliche Trend zur stärkeren Nutzung des Selective Laser Melting (SLM) für die Serienproduktion erfordert u. a. eine höhere Produktivität, Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit von SLM-Anlagen. Die Erhöhung der Produktivität durch Einsatz von Laserstrahlquellen im kW-Bereich (High Power SLM) und der damit erzielten höheren Aufbaurate konnte im Labor bereits gezeigt werden. Die industrielle Nutzung der kW-Strahlquellen und werkstoffabhängigen Belichtungsstrategien in kommerziellen SLM-Anlagen erfordert neue und robuste Optikkonzepte zur Strahlführung und -formung.

Vorgehensweise

Zur Umsetzung von Laserleistung in Aufbaurate werden neue Prozessführungsstrategien entwickelt. Untersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Belichtungsstrategien mit angepassten Strahldurchmessern, u. a. in Abhängigkeit der thermophysikalischen Eigenschaften der Werkstoffe, angewendet werden können. Zur Umsetzung dieser Belichtungsstrategien werden entsprechend geeignete optische Systeme für die jeweilige Prozessführung ausgelegt. Die Umsetzung ausgewählter Systeme in kommerziellen SLM-Anlagen erfolgt in Zusammenarbeit mit Anlagenherstellern unter Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen wie z. B. geforderte Scanfeldgröße und Fokusdurchmesser. Bei der Auswahl der optischen Komponenten steht darüber hinaus deren Eignung hinsichtlich Zerstörschwellen und thermischer Belastung für die Leistungsklasse von 1 kW und den dabei auftretenden Intensitäten, insbesondere bei der Verwendung von Single-Mode-Strahlquellen, im Vordergrund.

Ergebnis

In Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Anlagenherstellern wurden zwei unterschiedliche optische Systeme in kommerzielle Anlagen umgesetzt, mit denen erstmals SLM-Anlagen mit einer Laserleistung von 1 kW verfügbar sind. Zum einen wird eine variable Fokussieroptik zur stufenlosen Verstellung des Strahldurchmessers bei Verwendung einer 1-kW-Single-Mode-Strahlquelle eingesetzt. Zum anderen wird ein Zweistrahlkonzept verwendet, welches mittels zweier Strahlquellen die Umschaltung zwischen einem kleinen Strahldurchmesser mit einer gaußförmigen Intensitätsverteilung und einem großen Strahldurchmesser mit top-hat-förmiger Intensitätsverteilung erlaubt. Mit diesen optischen Systemen können Bauteile mit höherer Aufbaurate unter Beibehaltung von Detailauflösung und Oberflächenqualität hergestellt werden.

Anwendungsfelder

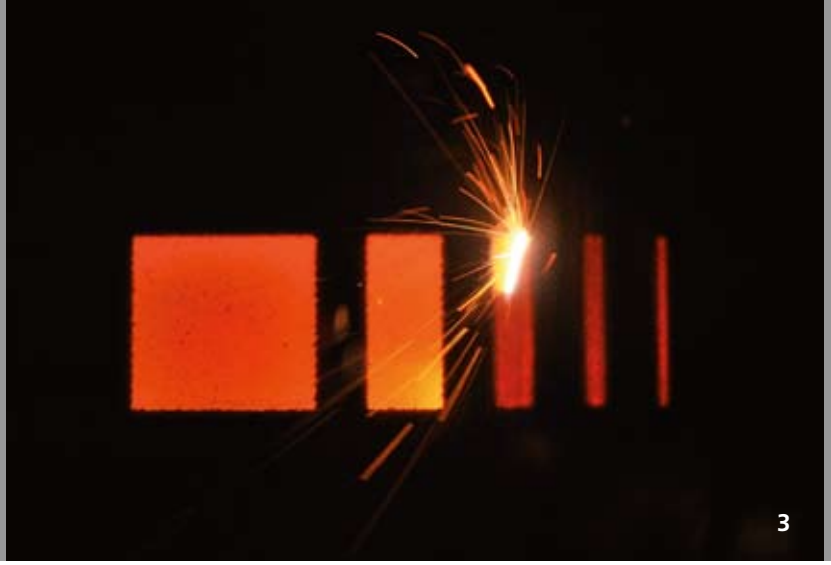
Die 1-kW-SLM-Anlagen werden zur generativen Fertigung von Bauteilen in unterschiedlichen Branchen wie z. B. Automotive, Turbomaschinen oder Werkzeugbau eingesetzt.

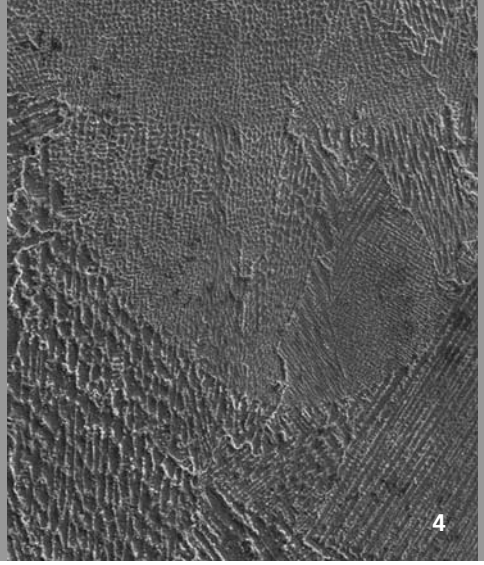
Ansprechpartner

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

1 Mit generativem Laserverfahren hergestelltes Modell (1:3) eines V8-Motorblocks.

2 Strahlengang eines optischen Systems für HP-SLM.





VERARBEITUNG VON IN738LC MITTELS SLM

Aufgabenstellung

Nickelbasis-Superlegierungen wie Inconel 738LC sind für hochtemperaturbelastete Bauteile entwickelt worden und bilden den aktuellen Stand der Technik im Turbinenbau. Die konventionelle Fertigung von Bauteilen mittels Feinguss ist zeit- und kostenintensiv und mit Einschränkungen hinsichtlich der Geometriefreiheit verbunden. Als Gusslegierungen ausgelegt, sind die komplexen Werkstoffe aufgrund von Heißrissbildung schwer bis nicht schweißbar. Bisher kann IN738LC nicht rissfrei mittels SLM verarbeitet werden.

Vorgehensweise

Am Fraunhofer ILT wird die Verarbeitbarkeit von IN738LC mittels SLM im Rahmen des EU-Projekts »MERLIN« mit Partnern aus Forschungseinrichtungen und Unternehmen des Turbinenbaus untersucht. Mit einer speziell angepassten Laboranlage wird zunächst eine Prozessführung zum Aufbau defektfreier Probekörper bei Vorheiztemperaturen bis zu ca. 900 °C entwickelt. Auf dieser Basis werden die thermomechanischen Kennwerte nach Bestimmung einer geeigneten Wärmebehandlung ermittelt. Abschließend werden Funktionsprototypen mittels SLM hergestellt und unter realen Bedingungen getestet.

Ergebnis

Auf einer am Fraunhofer ILT entwickelten SLM-Laboranlage können rissfreie Probekörper mit einer Dichte von nahezu 100 Prozent bei Vorwärmtemperaturen von 800 bis 900 °C aufgebaut werden. Die kleinere Temperaturdifferenz zwischen Schmelzbad und massivem Gefüge führt zu einer Verkleinerung der prozessinduzierten Spannungen und damit zu einem defektfreien Gefüge. In weiteren Schritten wird u. a. untersucht, ob durch eine geeignete Anpassung der weiteren Verfahrensparameter die Vorheiztemperatur verkleinert werden kann.

Anwendungsfelder

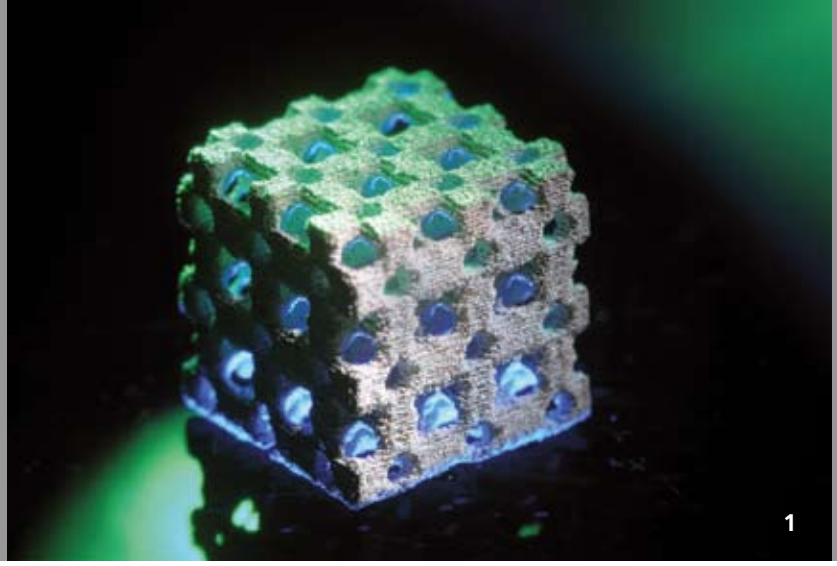
IN738LC wird in erster Linie im Turbinenbau, z. B. für Turbinenschaufeln, eingesetzt, sodass die Luftfahrt- und Energieindustrie das Hauptanwendungsfeld darstellen. Insbesondere die schnelle Herstellung von komplexen Funktionsprototypen verspricht deutlich kürzere und damit günstigere Entwicklungsprozesse. Grundsätzlich können die Ergebnisse auch auf andere rissempfindliche Legierungen übertragen werden und deren Verarbeitung mittels SLM ermöglichen.

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 SLM-Prozess bei einer Vorheiztemperatur von 900 °C.
4 Mikrostruktur von Probekörpern aus Inconel 738LC ohne Wärmenachbehandlung.



SELECTIVE LASER MELTING VON MAGNESIUM-LEGIERUNGEN

Aufgabenstellung

Magnesium und Magnesiumlegierungen werden aufgrund ihrer geringen Dichte vor allem im Leichtbau verwendet. Gleichzeitig ist Magnesium als essenzieller Teil des menschlichen Stoffwechsels körperverträglich und bietet aufgrund seiner Korrosions- und mechanischen Eigenschaften großes Potenzial, als bioresorbierbares Material für degradierbare Knochenersatzimplantate auch im lasttragenden Bereich eingesetzt zu werden. In Kombination mit der durch die generative Fertigung gegebenen Geometriefreiheit können gerade im Leichtbau und in der Medizintechnik Bauteile und Implantate mit einzigartigen Funktionseigenschaften hergestellt werden. Das Selective Laser Melting (SLM) ermöglicht z. B. die Herstellung von topologieoptimierten, der realen Belastung angepassten Bauteilen sowie von Implantaten mit definierten, interkonnektiven Porenstrukturen, die das Einwachsverhalten maßgeblich verbessern können. Durch die Entwicklung des SLM zur Verarbeitung von Magnesiumlegierungen sollen diese Werkstoff- und Verfahrensvorteile kombiniert werden.

1 Mittels SLM gefertigte Testgeometrie (Kantenlänge 6 mm) mit interkonnektiver Porenstruktur aus AZ91.

Vorgehensweise

Für die ersten Untersuchungen zur Erarbeitung einer geeigneten SLM-Prozessführung wird die Magnesiumlegierung AZ91 ausgewählt. Die Anlagentechnik wird gemäß der hohen Sauerstoffaffinität von Magnesium und Magnesiumlegierungen, insbesondere in der verwendeten Pulverform, angepasst. Eine weitere Herausforderung stellt die kleine Temperaturdifferenz zwischen Schmelz- und Verdampfungstemperatur für die Erarbeitung eines Prozessfensters dar.

Ergebnis

Die Modifizierung der Anlagentechnik ermöglicht durch eine Reduzierung des Sauerstoffgehalts der verwendeten Schutzgasatmosphäre auf 10 ppm die sichere Verarbeitung von Magnesiumpulvern. Bei diesen Prozessbedingungen können durch Anpassung der Verfahrensparameter einfache Probekörper aus AZ91 mit einer Dichte größer 99 Prozent gefertigt werden. Zusätzlich werden erste komplexe Geometrien mit interkonnektiven Porenstrukturen hergestellt.

Anwendungsfelder

Aufgrund der Herstellbarkeit von komplexesten Geometrien ist die generative Fertigung von Leichtmetallen wie Magnesium und Magnesiumlegierungen prädestiniert für Anwendungen im Leichtbau. Gleichzeitig wird durch die Möglichkeit, Magnesiumlegierungen als bioresorbierbare Werkstoffe einzusetzen, ein neues Anwendungsfeld für das SLM im Bereich von resorbierbaren, lasttragenden Knochenersatzimplantaten geschaffen.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Lucas Jauer
Telefon +49 241 8906-360
lucas.jauer@ilt.fraunhofer.de

PROZESSKETTEN ZUR FERTIGUNG UND REPARATUR

Aufgabenstellung

Laserbasierte Verfahren wie das Selektive Laserschmelzen (SLM) oder das Laserauftragschweißen (LA) werden bereits zur generativen Fertigung bzw. zur Reparatur von Turbomaschinenkomponenten in der Industrie eingesetzt. Je nach Applikation können SLM und LA konventionelle Verfahren wie Fräsen, Schleifen und Polieren zur Vor- und zur Endbearbeitung der Bauteile erfordern. Um die verschiedenen Prozessschritte zu verknüpfen, sollen die Prozesse durch das Einrichten einer gemeinsamen Plattform – dem CAx-Framework – zu einer Prozesskette zusammengefasst werden. Im Rahmen des Fraunhofer-Innovationsclusters »TurPro« sind für drei verschiedene Bauteile in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPT durchgängige Prozessketten entwickelt worden.

Vorgehensweise

Für die Realisierung einer durchgängigen Prozesskette werden Schnittstellen geschaffen, um CAD-Daten verlustfrei von Prozess zu Prozess zu übergeben. Dazu wird unter anderem ein Spannsystem für die verschiedenen Technologien verwendet, um den Aufwand für das Einmessen des Bauteils in das Maschinenkoordinatensystem möglichst gering zu halten. Die offline Planung der Werkzeugbahnen und Implementierung der Prozessstrategie wird für jede Technologie durch ein eigenes CAx-Modul umgesetzt. Für das SLM-Verfahren kann auf kommerzielle CAD/CAM-Programme zur Datenaufbereitung und Bahnplanung zurückgegriffen werden. Zur offline Bahnplanung der generativen Fertigung von Neubauteilen und zur Reparatur von Bauteilen durch LA werden in Kooperation mit dem Fraunhofer IPT eigene CAx-Module entwickelt. Im Fall der generativen Fertigung werden auf Basis des Soll-CAD-Modells Werkzeugbahnen erzeugt. Im Fall der Reparatur wird das vorbereitete Bauteil mit einem Laserscanner erfasst, ein Ist-CAD-Modell erstellt und mit dem Soll-CAD-Modell verglichen. Im Anschluss werden durch einen best-fit der CAD-Modelle Werkzeugbahnen für das LA erzeugt.

Ergebnis

Die Prozessketten sind für den generativen Aufbau einer Mikrogasturbine mit dem SLM-Verfahren, für den generativen Aufbau einer Kompressorschaufel in BLISK-Bauweise und für die Tip-Reparatur einer Gasturbinenschaufel mit dem LA-Verfahren realisiert worden.

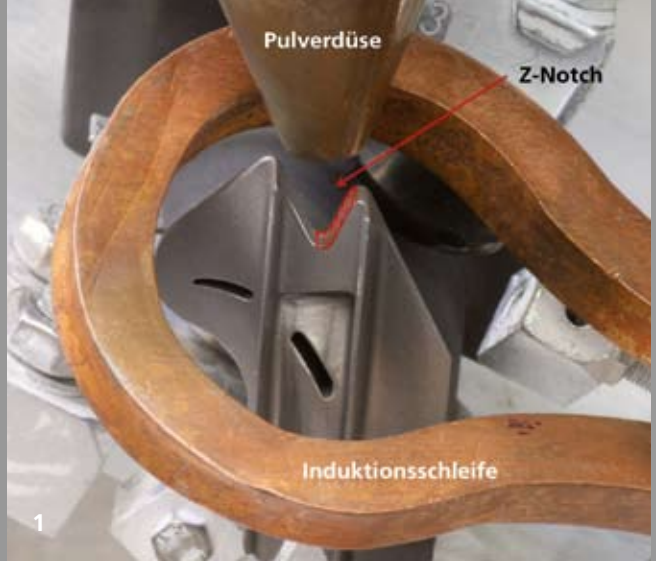
Anwendungsfelder

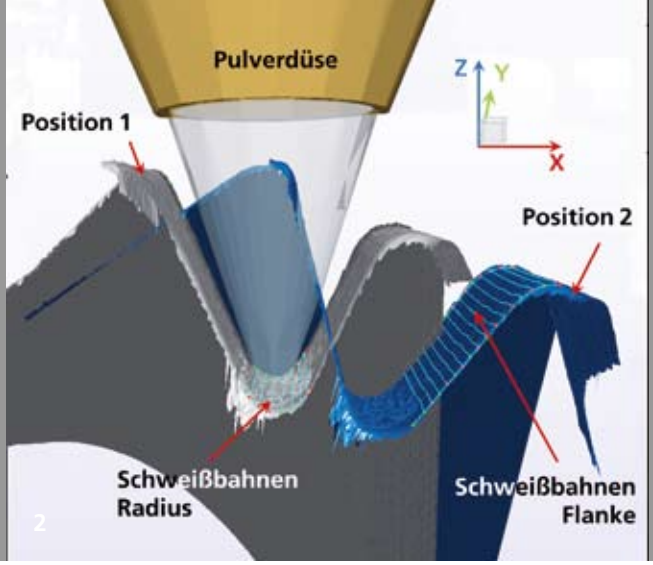
Die innerhalb von »TurPro« entwickelten Prozessketten adressieren vorrangig Turbomaschinenkomponenten in der Energie- und der Luftfahrtindustrie. Die Vorgehensweise kann jedoch auf Bauteile und Applikationen anderer Branchen angewendet werden.

Ansprechpartner

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

2 Links: Durch LA generativ aufgebaute Kompressorschaufeln in verschiedenen Nachbearbeitungszuständen. Rechts: Durch LA reparierte Tip einer Gasturbinenschaufel vor und nach der Endbearbeitung. Vorne: Durch SLM aufgebaute Komponenten einer Mikrogasturbine.





LASERAUFTRAGSCHWEISSEN KOMPLEXER GEOMETRIEN AN TURBINENSCHAUFELN

Aufgabenstellung

An Z-Notches von Turbinenschaufeln sollen im unteren Radius und auf einer Flanke Verschleißschutzschichten laserauftraggeschweißt werden (Bild 1 rot markierter Bereich). Die Turbinenschaufeln sind aus einer γ'-haltigen, rissanfälligen Nickelbasis-Superlegierung gefertigt. Beim Laserauftragschweißen müssen Risse vermieden werden. Als Verschleißschutzschicht soll eine Kobaltbasis-Legierung mit einer Härte ≥ 650 HV aufgeschweißt werden. Der Öffnungswinkel des Bereichs ist ca. 50 °, wodurch die Zugänglichkeit in großem Maße eingeschränkt ist und sich Herausforderungen für das Laserauftragschweißen und die Programmerstellung ergeben.

Vorgehensweise

Um Risse in der Schaufel zu vermeiden, wird zunächst eine Pufferschicht aus Inconel 625 laserauftraggeschweißt, und sowohl für die Pufferschicht als auch für die Verschleißschutzschicht aus der Kobaltbasis-Legierung werden Verfahrensparameter angewendet, die einen möglichst kleinen Energieeintrag in die Schaufel ermöglichen. Die Kobaltbasis-Legierung kann nicht rissfrei bei Raumtemperatur in der benötigten Dicke laserauftraggeschweißt werden, weshalb die Z-Notch lokal induktiv vorgewärmt wird (Bild 1). Zum Generieren der Schweißbahnen wird der relevante Bereich der Z-Notch optisch gescannt und die daraus resultierende Punktewolke in eine stl-Datei umgewandelt. Mit der hauseigenen CAM-Software werden Schweißbahnen auf diesen stl-Daten erzeugt und CNC-Programme erstellt. Durch den kleinen Öffnungswinkel der Z-Notch muss die Turbinenschaufel nach dem Schweißen des Radiusbereichs gedreht werden (Bild 2), um die Flanke laserauftragschweißen zu können, was beim Erstellen der CNC-Programme berücksichtigt wird.

Ergebnis

Auf den Radius und die Flanke von Z-Notches werden rissfreie Verschleißschutzschichten großer Härte laserauftraggeschweißt.

Anwendungsfelder

Geeignet ist dieses Verfahren insbesondere für Bauteile aus rissanfälligen Werkstoffen und/oder mit Freiformflächen, wie beispielsweise Reparaturen an Bauteilen aus Turbomaschinen oder dem Werkzeugbau.

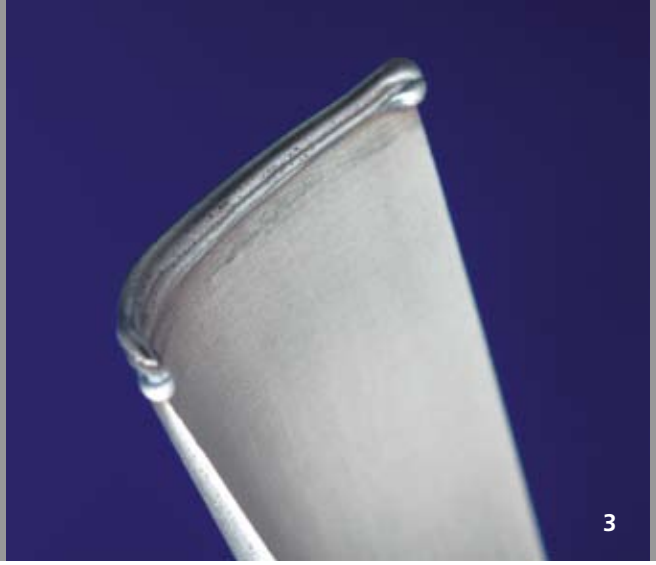
Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Stefanie Linnenbrink
Telefon +49 241 8906-575
stefanie.linnenbrink@ilt.fraunhofer.de

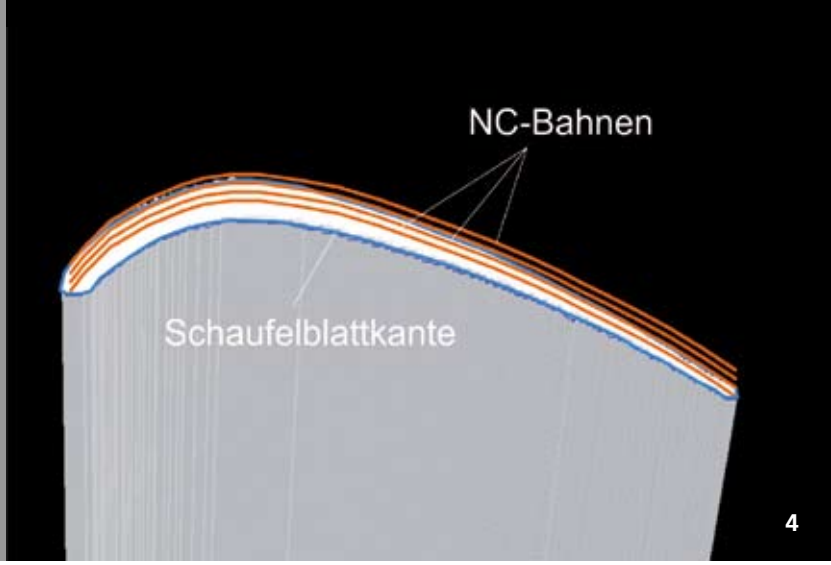
Dr. Andres Gasser
Telefon +49 241 8906-209
andres.gasser@ilt.fraunhofer.de

1 Versuchsaufbau (links) für Schweißposition 1 mit Pulverdüse und Induktionsschleife, zu schweißender Bereich ist rot schraffiert.

2 Programmerstellung (rechts) für zwei Schweißpositionen mittels hauseigener CAM-Software.



3



4

AUTOMATISIERTES LASERAUFTRAGSCHWEISSEN VON SCHAUFELSPITZEN

Aufgabenstellung

An den Spitzen (Tip) von Turbinen- und Kompressorschaufeln treten während des Betriebs Verschleißerscheinungen auf, die zu einer Reduktion der Schaufellänge und einer Zunahme der Strömungsverluste führen. Unterschreitet die Länge einen Grenzwert, darf die Schaufel nicht mehr eingesetzt werden.

Die Wiederherstellung des fehlenden Volumens an der in diesem Projekt betrachteten Hubschraubertriebwerksschaufelspitze erfolgte bisher durch manuelles Auftragen von Material durch WIG-Auftragschweißen. Das Schweißen wie auch die notwendige Nachbearbeitung sind sehr zeit- und dadurch kostenintensiv.

Das Laserauftragschweißen stellt ein alternatives Verfahren dar, welches einen automatisierten und konturnahen Materialauftrag und dadurch eine Reduktion der Nachbearbeitungszeit ermöglicht. Da die Schaufeln in der Geometrie variieren, ist zur effizienten Nutzung des Laserauftragschweißprozesses und zur Gewährleistung einer hohen Reproduzierbarkeit eine Automatisierung dieses Reparaturverfahrens notwendig.

Vorgehensweise

Die Entwicklung einer automatisierten, an die Geometrie der Schaufelspitze adaptierten Prozesskette wurde in folgende Arbeitspunkte unterteilt: Da die Schaufelgeometrie variiert, wird die Ist-Geometrie jeder Schaufelspitze mit einem Laserscanner erfasst. Anschließend wird der gescannte Datensatz ausgewertet und auf der Schaufelspitze eine Mittelpunktbahn mit einem am Fraunhofer ILT entwickelten Softwaremodul berechnet. Die Punkte fließen in das NC-Programm für die Steuerung ein. Bei der Prozessentwicklung des Verfahrens werden der Ablauf der Schaufelbeschichtung und die Verfahrensparameter ermittelt, auf Basis derer die NC-Programme zur automatisierten Steuerung der Beschichtung erstellt werden.

Ergebnis

Das Verfahren wurde an einem Schaufeltyp aus einem Nickelbasiswerkstoff realisiert, wobei ein konturnaher und den Spezifikationen entsprechender Laserauftrag mit einem Aufmaß von 0,2 mm erzielt wurde. Die Adaption der Verfahrensparameter an die sich entlang des Schaufelblattprofils ändernde Spurbreite konnte erfolgreich umgesetzt werden.

Anwendungsfelder

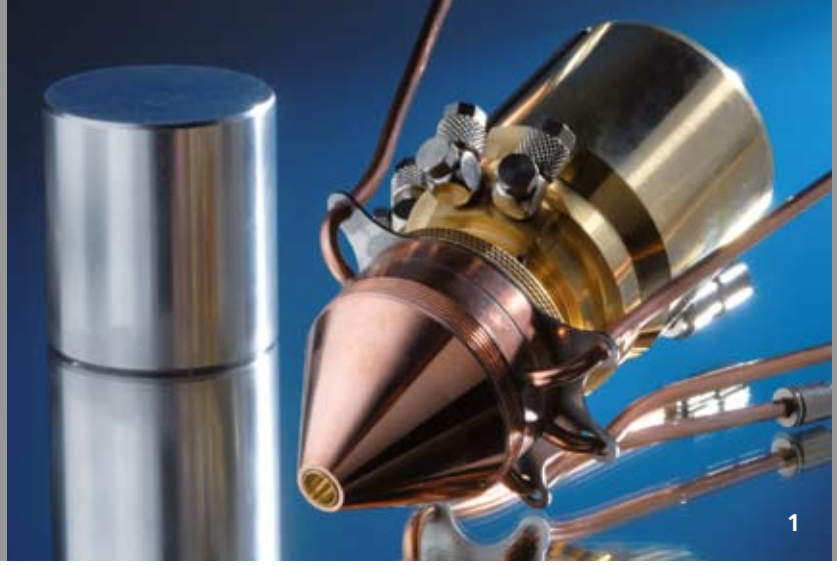
Dieses Verfahren ist zur automatisierten Reparatur der Schaufelspitzen an einer Vielzahl von Schaufeltypen, z. B. aus der Luftfahrt und der Energieerzeugung, geeignet.

Ansprechpartner

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

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

3 Laserauftraggeschweißte Schaufelspitze.
4 Digitalisierter Schaufeldatensatz mit NC-Bahnen.



KOAXIALE PULVERDÜSEN FÜR HÖHERE LASERLEISTUNGEN

Aufgabenstellung

Ein wichtiges Ziel beim Laserauftragschweißen ist die Erhöhung der Auftragrate. Dazu werden Laserleistungen im Multi-kW-Bereich angewendet. Diese hohen Laserleistungen erfordern die Entwicklung neuer robuster Pulverzufuhrdüsen. Bisherige koaxiale Pulverdüsen (Ringspaltdüsen) mit hohem Pulvernutzungsgrad (> 90 Prozent) am Fraunhofer ILT wurden für eine Laserleistung bis 2,5 kW ausgelegt. Für das Auftragschweißen wird eine koaxiale Pulverdüse entwickelt, die für Laserleistungen bis 5 kW ausgelegt ist, höhere Pulvermassenströme > 1,5 kg/h verarbeiten kann und einen Puvernutzungsgrad von > 90 Prozent erzielt.

Vorgehensweise

Im Rahmen der Entwicklung von Pulverdüsen für das Laserauftragschweißen wird zum einen der Abstand zwischen Pulverdüse und Werkstückoberfläche (Stand-Off) von 8 auf 13 mm vergrößert, um die Erwärmung durch reflektierte Laserstrahlung zu verringern. Zum anderen wird die Kühlung der Düse durch konstruktive Maßnahmen verbessert.

Ergebnis

Es wurden Versuche über 8 Stunden bei 5 kW Laserleistung und 2,8 kg/h Pulvermassenstrom durchgeführt. Die neu entwickelte Pulverdüse wird erfolgreich für das Beschichten von großen Hydraulikzylindern eingesetzt. Hierbei werden Beschichtungsgeschwindigkeiten von 6 - 8 m/min erreicht. Die Flächenraten betragen bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 6 m/min und einem Strahldurchmesser von 2,2 mm 132 cm^2/min, die Auftragsraten bei 50 Prozent Überlapp liegen bei dem erreichten Pulvernutzungsgrad von > 90 Prozent und einer Schichtdicke von 0,3 mm somit bei etwa 2 cm^3/min.

Anwendungsfelder

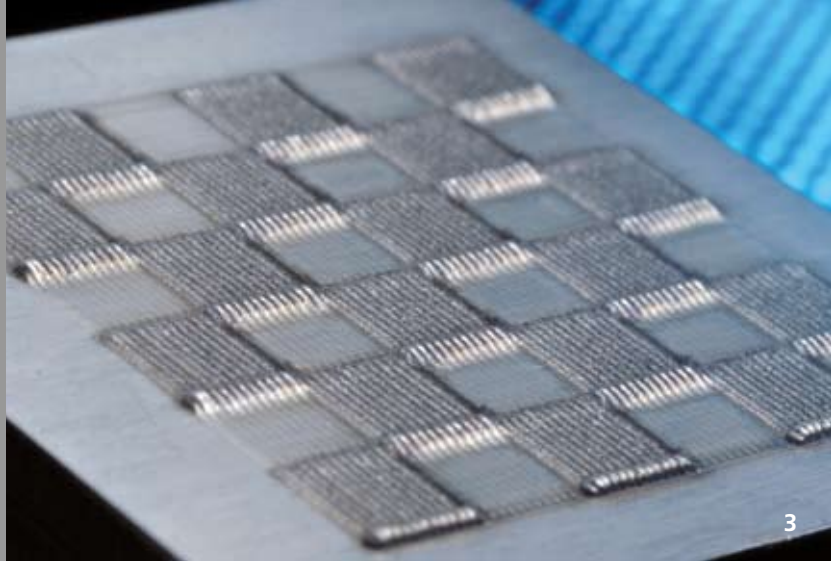
Potenzielle Anwendungen sind das Auftragschweißen von größeren Bauteilen, die ein robustes Equipment bei gleichzeitig hohem Pulvernutzungsgrad erfordern. Beispiele sind das Auftragschweißen von Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten auf zylinderförmigen Bauteilen wie Hydraulik- und Oilfield-Komponenten, wobei Beschichtungszeiten von mehreren Stunden realisiert werden müssen.

Ansprechpartner

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

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

1 Koaxiale Pulverdüse für höhere Laserleistungen.



SCHNELLER PULVERSCHALTER – SYSTEMTECHNIK FÜR DAS LASERAUFTRAGSCHWEISSEN

Aufgabenstellung

Beim Laserauftragschweißen ist es häufig erforderlich, den Beschichtungsprozess zu unterbrechen, damit das Bauteil abkühlen kann oder um den Beschichtungskopf an einer anderen Stelle zu positionieren. Während dieser Unterbrechungen muss der Pulverförderer entweder ausgeschaltet werden, was zu einer signifikanten Verlängerung der Prozesszeit führt, oder aber der Pulvergasstrom läuft während der Unterbrechung weiter. Das während dieser Tot-Zeiten geförderte Pulver kann aufgrund von Kontaminationen nur begrenzt wieder verwertet werden und führt zu einer Verunreinigung der Laseranlage sowie der Bauteile, die bearbeitet werden. Je nach Anwendung können bis zu 30 Prozent des Zusatzwerkstoffs verloren gehen. Aus diesen Gründen ist ein schneller Pulverschalter vorteilhaft, der in Bruchteilen einer Sekunde den Pulvergasstrom ein- und ausschalten kann. Das nicht für den Prozess genutzte Pulver kann in einem gesonderten Behälter aufgefangen und wieder verwertet werden.

Vorgehensweise

In Zusammenarbeit mit der am Fraunhofer ILT ansässigen Firma HD wurde ein schneller Pulverschalter (Bild 2) entwickelt, der es ermöglicht, sowohl den Pulvergasstrom ein- und auszuschalten als auch zwischen zwei Pulvergasströmen hin und her zu schalten. Somit kann auch ein mehrstündiger Beschichtungsprozess ohne Unterbrechung realisiert werden.

Ergebnis

Erste Versuche mit dem schnellen Pulverschalter ergeben eine Ein- und Ausschaltzeit für den Pulvergasstrom von ca. 300 ms. Der Pulverschalter wurde so konstruiert, dass beim Ausschalten kein Nachrieseln des Pulvers entsteht. Durch die entwickelte Konstruktion lassen sich auch zwei Pulvervorratsbehälter miteinander verbinden und somit ein störungsfreies Hin- und Herschalten zwischen den Pulvervorratsbehältern realisieren. Für eine automatisierte Bearbeitung wurde der Pulverschalter mit einem pneumatischen Schalter ausgerüstet, der den Pulverschalter über die Anlagensteuerung betreibt. In Bild 3 ist ein Schachbrettmuster zu sehen, bei dem der Pulvergasstrahl während des Prozesses ein- und ausgeschaltet wurde, ohne den Laserstrahl auszuschalten. Dadurch konnte die Bearbeitungszeit einer solchen Geometrie um den Faktor 10 verkürzt werden. Neben der Verkürzung der Bearbeitungszeit wird durch den schnellen Pulverschalter auch deutlich Zusatzwerkstoff eingespart.

Anwendungsfelder

Die Anwendungsfelder für den schnellen Pulverschalter sind im Bereich des Laserauftragschweißens und des thermischen Spritzens zu finden.

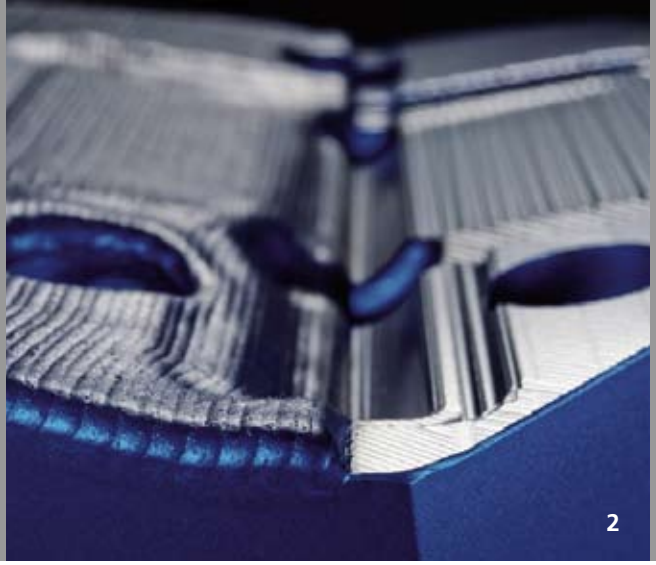
Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Gerhard Maria Backes
Telefon +49 241 8906-410
gerhard.backes@ilt.fraunhofer.de

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

2 Schneller Pulverschalter.

3 Schachbrettmuster, hergestellt durch schnelles Schalten des Pulvergasstrahls.



VERSCHLEISSSCHUTZ-SCHICHTEN MIT NANO-PARTIKULÄREN ZUSÄTZEN FÜR WERKZEUGE

Aufgabenstellung

Der Verschleißschutz von Formen und Werkzeugen gewinnt in der produzierenden Industrie aufgrund steigender Materialkosten und erhöhter Anforderungen an die gefertigten Bauteile immer mehr an Bedeutung. Neben dem Verschleißschutz von neuen Werkzeugen spielt die Reparatur von verschlissenen Bauteilen eine immer größere Rolle. In beiden Fällen muss ein an den Anwendungsfall angepasster Verschleißschutz realisiert werden. Hierbei ist ein Kompromiss zwischen hoher Festigkeit, ausreichender Zähigkeit und guter Verschleißbeständigkeit (Härte) zu finden.

Vorgehensweise

Um die thermophysikalische Passung zwischen Substrat und Schicht zu optimieren, wird als Beschichtungswerkstoff artgleiches Material verwendet. Die Modifikation der Eigenschaften erfolgt durch geringe Zusätze (< 2,5 Gew.-Prozent) an Nanopartikeln. Es werden Beschichtungen aus den Warmarbeitsstählen 1.2365 und 1.2714 mit Zusätzen von Aluminium- und Yttriumoxid (20 - 40 nm) sowie Titan-, Vanadium- und Wolframkarbid (Korngröße 80 - 250 nm) hergestellt. Die Beschichtungen werden hinsichtlich Gefüge, Porosität und Rissbildung metallographisch untersucht. Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften werden Zugversuche und Härtemessungen an Probekörpern durchgeführt.

Ergebnis

Die Analyse der Schichten zeigt, dass nanopartikuläre Zusätze von Titankarbid den größten Einfluss auf das Schweißgutgefüge hinsichtlich Kornfeinung besitzen. Die besten mechanischen Eigenschaften können mit einem Zusatz von Wolframkarbid erzielt werden. Die Zugfestigkeit beträgt mehr als 1700 MPa, bei einer Bruchdehnung von 12 Prozent und einer Härte von 946 HV0.3. Dies entspricht einer Härtesteigerung von ca. 60 Prozent durch einen Zusatz von 2,5 Gew.-Prozent Wolframkarbidpartikeln. Damit können durch Zugabe von Nanopartikeln Festigkeit und Härte gesteigert werden, gleichzeitig bleibt aber die Zähigkeit weitgehend erhalten.

Anwendungsfelder

Geeignet sind derartige Schichten insbesondere dort, wo neben Verschleiß auch thermische oder mechanische Ermüdung auftritt (Schmiedegesenke, Druckgießformen). Feldversuche mit beschichteten Schmiedegesenken sind derzeit in Vorbereitung.

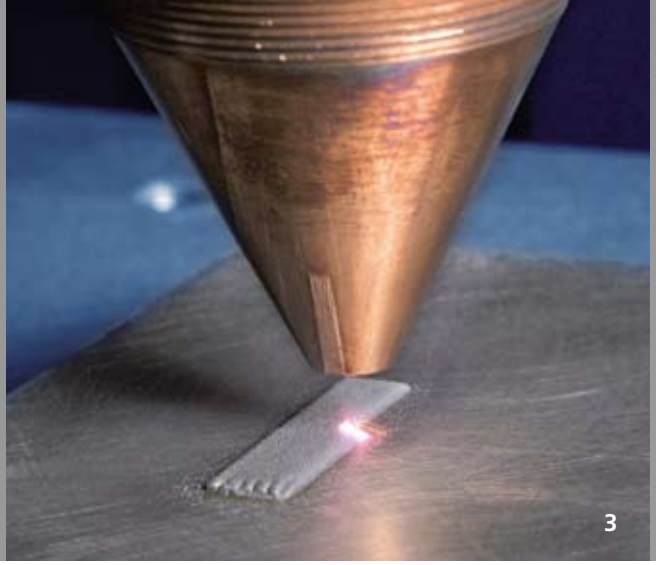
Ansprechpartner

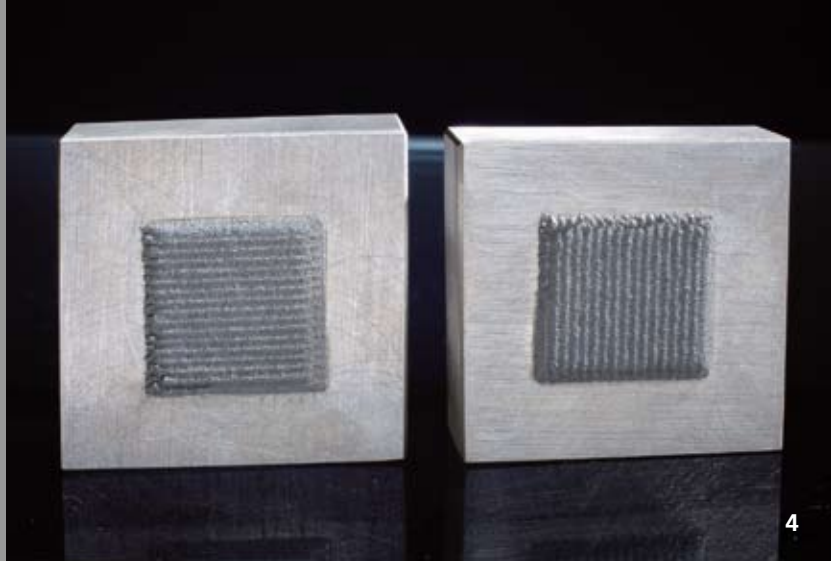
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Sörn Ocylok
Telefon +49 241 8906-567
soern.ocylok@ilt.fraunhofer.de

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

1 Laserauftragschweißen eines Werkzeugeinsatzes.

2 Beschichteter Werkzeugeinsatz.





VERSCHLEISSSCHUTZ VON MAGNESIUMLEGIERUNGEN MITTELS LASERAUFTRAG-SCHWEISSEN

Aufgabenstellung

Magnesium findet vielfältige Anwendungen besonders in der Automobil- und Luftfahrtbranche. Aufgrund seiner geringen Dichte, guten Dämpfungseigenschaften und der sehr guten maschinellen Verarbeitbarkeit im Vergleich zu Aluminium oder Stahl steigt die Nachfrage stetig. Ein Nachteil von Magnesiumlegierungen ist jedoch die geringe Verschleißfestigkeit. Aus diesem Grund werden mit Laserauftragschweißen verschiedene Schichten auf Magnesiumsubstrate aufgebracht.

Vorgehensweise

Im Laserauftragschweißprozess wird über eine Düse zugeführtes Pulver zusammen mit einer dünnen Schicht des Substrates aufgeschmolzen. Nach der Erstarrung entsteht eine schmelzmetallurgische Verbindung. Als Substrat wird die Legierung AZ31B verwendet. Schichten werden mit der Aluminiumlegierung AlSi20, einer Eisenbasislegierung (Metco42C) und einem Verbundwerkstoff aus Titankarbiden (TiC) und AlSi20 hergestellt. Der Auftragschweißprozess wird so eingestellt, dass die Aufmischungszone, in der spröde intermetallische Phasen entstehen können, möglichst klein ist (max. 100 µm).

Ergebnis

Die auftraggeschweißten Schichten sind riss- und porenfrei. Die Schichtdicke beträgt für einlagige Schichten ca. 1 mm. Zur Untersuchung des Verschleißschutzes wurden die verschiedenen Schichten einem Pin-on-Disc-Test unterzogen. Die Verschleißrate für das Substrat AZ31B beträgt $1{,}23*10^{-03}$ mm³/Nm. Mit einer AlSi20-Schicht kann die Verschleißrate um einen Faktor von 2,6 auf $4{,}76*10^{-04}$ mm³/Nm, mit einer AlSi20+TiC-Schicht um den Faktor 2,9 auf $4{,}16*10^{-4}$ mm³/Nm reduziert werden. Der größte Effekt wird mit der Eisenbasisschicht mit $1{,}69*10^{-04}$ mm³/Nm (Faktor 7,3) erzielt, die aber aufgrund ihres hohen Schmelzpunktes nicht direkt auf Magnesium aufgebracht werden kann, sondern eine Pufferschicht aus AlSi20 benötigt.

Anwendungsfelder

Magnesiumlegierungen finden u. a. als Material für Getriebe- oder Motorgehäuse Anwendung. Hier kann das Verfahren des Laserauftragschweißens bei Verschleiß als Reparaturverfahren eingesetzt werden, oder es werden vorbeugend verschleißbeanspruchte Bereiche beschichtet.

Ansprechpartner

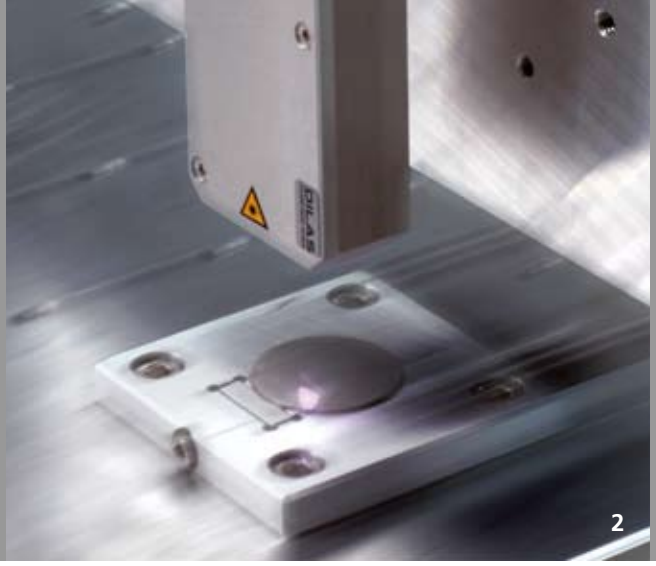
Dipl.-Ing. Gesa Rolink
Telefon +49 241 8906-365
gesa.rolink@ilt.fraunhofer.de

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

3 Laserauftragschweißen auf AZ31B.

4 AlSi20-Beschichtung auf AZ31B.

1



2

ERZEUGUNG KERAMISCHER DEKORATIONSSCHICHTEN MITTELS LASERVERFAHREN

Aufgabenstellung

Die Herstellung dekorierter Geschirr- und Sanitärkeramiken erfordert zusätzlich zu den für die Herstellung der Grundkeramik erforderlichen Glüh- und Glasurbränden einen weiteren Dekorbrand. Dieser wird bei Temperaturen > 700 °C in Durchlauföfen mit hoher thermischer Masse durchgeführt und ist daher sehr energieintensiv. Um dem in dieser Branche ohnehin vorhandenen hohen Kostendruck zu begegnen und einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, soll ein energieeffizientes Laserverfahren entwickelt werden, das durch die exakte örtliche und zeitliche Steuerbarkeit der Laserstrahlung den zu erwärmenden Bereich auf eine dünne Randzone beschränkt.

Vorgehensweise

Durch enge Zusammenarbeit mit Herstellern von Beschichtungswerkstoffen für die Dekorindustrie findet eine wechselseitige Anpassung des Laserverfahrens und des Beschichtungswerkstoffs statt. Die Aufbringung dieses Werkstoffs erfolgt beispielsweise mittels Sprühen oder Tampondruck. Aufgabe des Fraunhofer ILT ist es, die Charakteristiken der laserinduzierten Temperaturverteilungen (z. B. Aufheiz-/Abkühlraten, Temperaturhaltezeiten, Temperatureindringtiefen usw.) gezielt so einzustellen, dass die für den jeweiligen Beschichtungs-werkstoff erforderlichen Brenntemperaturen energieeffizient erreicht werden, ohne eine Schädigung der beteiligten Glasurbestandteile und Pigmente zu verursachen.

Ergebnis

Durch Umsetzung einer quasilinienförmigen Bearbeitungsstrategie ist es gelungen, die aufgebrachten partikulären Beschichtungswerkstoffe in eine homogene, flächig geschlossene Beschichtung zu überführen und damit schwarze Dekorationen auf glasiertem Porzellan zu erzeugen.

Anwendungsfelder

Der direkte Anwendungsbereich liegt in der Dekoration von Geschirr- und Sanitärkeramiken. Darüber hinaus ist der Einsatz des entwickelten Laserverfahrens aber auch für die Erzeugung keramischer Verschleißschutzschichten denkbar und eröffnet somit ein weites Anwendungsfeld überall dort, wo Oberflächen vor Verschleiß geschützt werden sollen.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Dominik Hawelka
Telefon +49 241 8906-676
dominik.hawelka@ilt.fraunhofer.de

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

1 Mittels Laserverfahren eingebrannte schwarze Dekoration auf glasiertem Porzellanteller (Ø 15 cm).

2 Laserbehandlung mit linienförmigem Intensitätsprofil.

3

4

LASERBASIERTE HERSTELLUNG VON SILBERLEITERBAHNEN

Aufgabenstellung

Gedruckte Leiterbahnen auf flexiblen Substraten haben ein großes Potenzial in elektronischen Anwendungen. Drucktechniken erlauben es, Strukturen aus nanopartikulären Metalltinten (z. B. Kupfer, Silber) herzustellen. Dieses Verfahren ist im Vergleich zu herkömmlichen Techniken, wie Masken- oder Lithografieverfahren, sowohl flexibel und inlinefähig als auch ressourcen-, zeit- und kostensparend. Die notwendige thermische Nachbehandlung zum Trocknen, Versintern und partiellem Aufschmelzen der Partikelschicht wird mittels Laserverfahren durchgeführt, um die Verwendung von temperaturempfindlichen Substraten zu ermöglichen.

Vorgehensweise

Nanopartikuläre Silbertinte wird mittels Inkjetdruck auf temperaturempfindliche PET-Folie aufgebracht. Mittels Laserstrahlung einer Wellenlänge von 532 nm wird die gedruckte Schicht aufgeheizt, um durch Trocknung, Sinterung und partielles Aufschmelzen eine leitfähige Schicht zu erhalten. Trotz hoher Temperaturen in der Schicht erlauben die hohen erzielten Temperaturgradienten und die ortsselektive Einbringung der Energie bei der Laserbehandlung die Verwendung von temperaturempfindlichen Substraten, ohne diese zu schädigen.

Ergebnis

Silberleiterbahnen mit einer Breite von < 100 µm können auf temperaturempfindlicher PET-Folie sowie weiteren Substraten hergestellt werden. Durch den Ersatz von konventionellen Ofenprozessen durch thermische Lasernachbehandlung lässt sich eine Leitfähigkeit von über 50 Prozent des Bulkmaterials ohne Beschädigung des Substrats erzielen. Dabei wird auf der PET-Folie eine sehr gute Haft- und Biegefestigkeit erreicht. Bei einem Biegeradius bis zu 5 mm treten hierbei keine Risse in der Schicht auf.

Anwendungsfelder

Dieses Verfahren hat ein großes Anwendungsfeld in der Elektronik, speziell im Bereich flexibler Elektronik aufgrund der hohen Leitfähigkeit trotz temperaturempfindlicher Substrate. Zu den möglichen Anwendungsbereichen zählen z. B. Sensoren, RFID oder Displays.

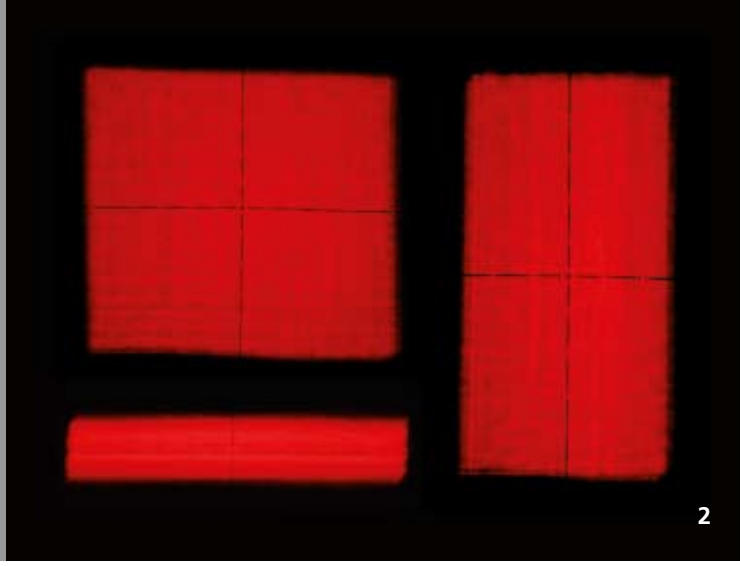
Ansprechpartner

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

3 Inkjetdrucker.

4 Demonstrator mit Silberleiterbahn.



ZOOM-HOMOGENISATOR-OPTIK FÜR DIE PROZESS-ANGEPASSTE CO_2-LASER-MATERIALBEARBEITUNG

Aufgabenstellung

Die zunehmende Flexibilisierung in den Produktionsumgebungen zur Lasermaterialbearbeitung erfordert optische Systeme zur Generierung von flexiblen Brennfleckgeometrien mit homogenem Intensitätsprofil. Bei der Verwendung der kommerziell verfügbaren Systeme für die CO_2-Lasermaterialbearbeitung können aktuell folgende Probleme identifiziert werden:

- Vorwiegend statisches Systemverhalten (fixe Brennfleckgeometrien)
- Verwendung von Kristalloptiken (ZnSe)
- Wellenlängenabhängigkeit

Vorgehensweise

Durch die Verwendung von zylindrisch-facettierten Optiken erfolgt die Integration der Eingangsverteilung zu einem rechtecksymmetrischen Intensitätsprofil hoher Homogenität. Der ausschließliche Einsatz von Metalloptiken erübrigt die Verwendung von Kristalloptiken (z. B. ZnSe) und ermöglicht zudem eine annähernde Unabhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlungsquelle. Durch die Integration von piezoelektrischen Trägheitsantrieben erfolgt die Verstellung der Optiken im gefalteten Strahlengang. Dies ermöglicht eine kontinuierliche, zweidimensionale Skalierung der Brennfleckgeometrie während des Bearbeitungsprozesses.

Ergebnis

Die Funktion zur Homogenisierung der Eingangsverteilung kann im sichtbaren Wellenlängenbereich sowie durch Einbrennversuche mit CO_2-Laserstrahlung erfolgreich verifiziert werden. Die Verwendung der piezoelektrischen Aktoren ermöglicht eine präzise Einstellung der Brennfleckgeometrie. Aktuell erfolgt die Realisierung eines Multi-kW-Bearbeitungskopfs auf Basis des entwickelten Konzepts.

Anwendungsfelder

Insbesondere für die Verarbeitung von endlos-glasfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen wird aufgrund des besseren Absorptionsgrads CO_2-Laserstrahlung eingesetzt. Die Verwendung des entwickelten Optikkonzepts ermöglicht eine optimierte Energieeinkopplung und infolgedessen eine verbesserte Energieeffizienz des Bearbeitungsprozesses.

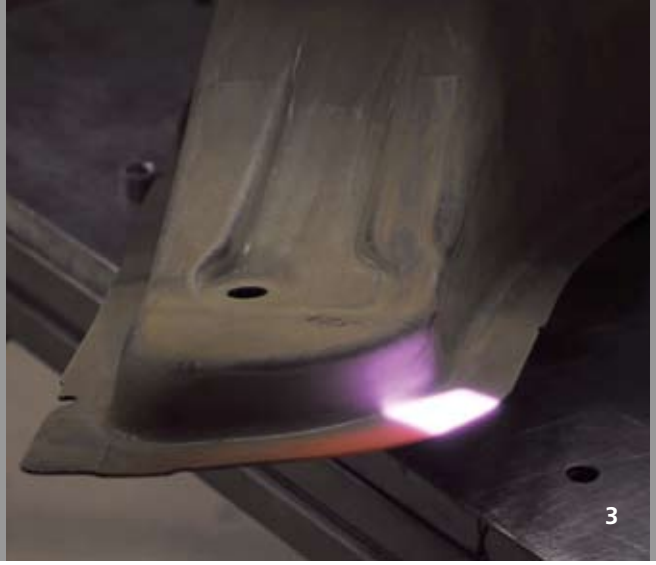
Ansprechpartner

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 Zoom-Homogenisator-Optik.

2 Angepasste Intensitätsverteilungen.



LOKALE WÄRMEBEHANDLUNG PRESSGEHÄRTETER BAUTEILE MIT LASERSTRAHLUNG

Aufgabenstellung

Leichtbau ist eine effektive Methode, um den Kraftstoffverbrauch und die CO_2-Emissionen in der Automobilindustrie zu reduzieren. Dabei werden aber gleichzeitig immer höhere Ansprüche an die Crashsicherheit des Fahrzeugs gestellt. Hochfeste Stähle erfüllen beide Anforderungen. Durch Presshärten können komplexe Bauteile warm umgeformt werden, die durch anschließendes Härten im gekühlten Werkzeug große Festigkeiten erreichen. Im Fall des weit verbreiteten Stahls 22MnB5 liegt die Zugfestigkeit warmumgeformter Bauteile bei bis zu 1600 MPa. Die mit dieser hohen Festigkeit einhergehende Versprödung ist aber nicht im gesamten Bauteil vorteilhaft oder zulässig. In Deformationszonen und Fügezonen ist für ein gutes Crashverhalten bzw. rissfreies Fügen ein duktiles Werkstoffverhalten erforderlich.

Im Rahmen des BMBF-Projekts »LOKWAB« (Förderkennzeichen 02PU2020) wurde die lokale Entfestigung mit Laserstrahlung an pressgehärteten Bauteilen zur Verbesserung des Crashverhaltens und nachfolgender Fügeoperationen untersucht.

Vorgehensweise

Zur Laserwärmebehandlung werden ein temperaturgeregelter, fasergekoppelter 12 kW Diodenlaser und eine Zoomoptik mit rechteckiger Laserspotgröße bis zu 52 x 52 mm^2 verwendet.

Ergebnis

Im wärmebehandelten Bereich wird das martensitische Gefüge modifiziert (Anlassen oder vollständige Umwandlung), wodurch die Bruchdehnung von 4 Prozent auf bis zu 19 Prozent steigt bei abnehmender Festigkeit. Um den Verzug zu minimieren, wurde eine geeignete Wärmebehandlungsstrategie (Abfolge, Lage und Dimension der Bahnen) entwickelt. Dabei konnte der maximale Verzug einer wärmebehandelten B-Säule von 10 auf 1,7 mm reduziert werden. Die AlSi-Korrosionsschutzschicht der Bauteile wird nicht von der Laserwärmebehandlung beeinflusst. Mit maximaler Laserleistung werden Flächenraten bis zu 15 cm^2/s erreicht.

Anwendungsfelder

Das Verfahren kann in der Automobilfertigung inline zur lokalen Entfestigung pressgehärteter Bauteile eingesetzt 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

3 Laserwärmebehandlung eines pressgehärteten Bauteils.
4 B-Säule mit farblich markierten Entfestigungszonen.

LASERMIKROPOLIEREN VON LAUFRÄDERN AUS TITAN

Aufgabenstellung

Viele dreidimensionale Freiformflächen werden zurzeit manuell poliert, da hierfür keine automatisierten Fertigungsverfahren zur Verfügung stehen. Bei Titanwerkstoffen kommt hinzu, dass diese bei der mechanischen Politur ein schmierendes Verhalten aufweisen, wodurch das Oberflächenfinish zusätzlich erschwert wird. Die manuellen Polierzeiten liegen hier oft bei über 10 min/cm².

Aus diesem Grund wird das automatisierte Laserpolieren für feingefräste Laufräder aus Titan Grade 2 der Firma MediKomp untersucht. Mittels gepulster Laserstrahlung 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.

Vorgehensweise

Zunächst werden an Flachproben geeignete Bearbeitungsparameter für die Laserpolitur ermittelt. Anschließend wird die Bearbeitung eines 3D-Laufrads in einem handelsüblichen CAM-System geplant. Die weitere Bearbeitung der Daten erfolgt mit einem am Fraunhofer ILT für den Laserpolierprozess entwickelten Technologiemodul. Mit den damit generierten NC-Daten können die Laufräder mit einer Laserpoliermaschine bearbeitet werden.

1 Laufrad aus Titan (Ø 43 mm, Grade 2) im feingefrästen Ausgangszustand (li) und im laserpolierten Zustand (re).

Ergebnis

Die Laufräder wurden mit einem Stablaser (λ = 1064 nm) mit Pulsdauern im Bereich von ca. 150 ns bei einer Flächenrate von 3,3 s/cm² poliert. Dabei wurde eine über das Bauteil homogene Oberfläche erreicht, deren Mikrorauheit bei der Politur von Ra = 0,15 µm auf Ra = 0,04 µm reduziert wurde.

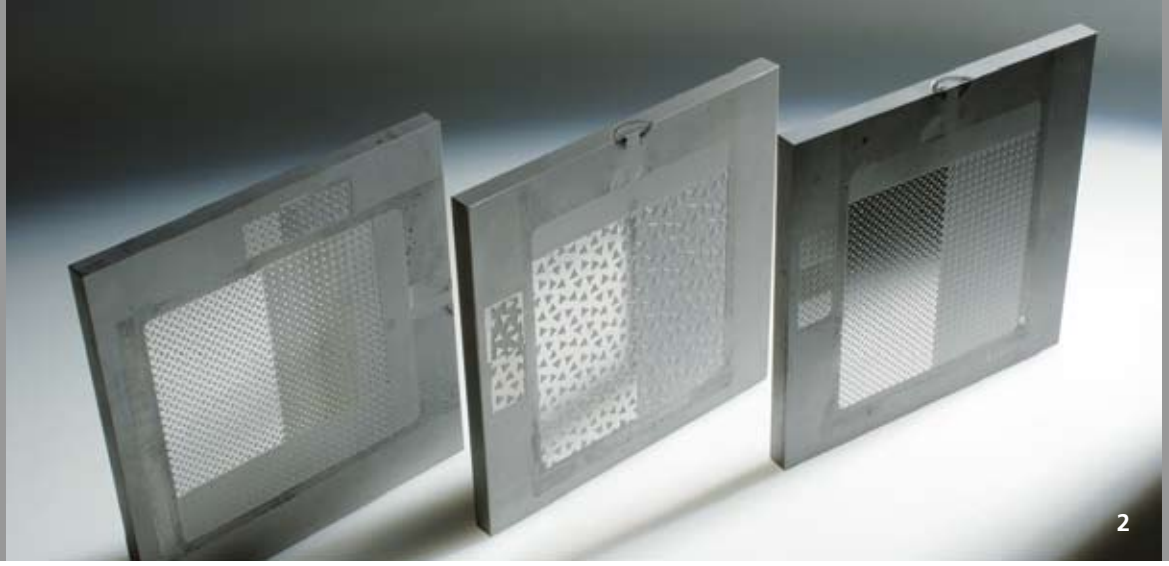
Anwendungsfelder

Neben der Politur von Titanwerkstoffen ist das Lasermikropolierverfahren für viele weitere Werkstoffe und Anwendungsgebiete geeignet. Insbesondere die Politur dreidimensionaler Freiformflächen kann durch das Verfahren automatisiert und wesentlich beschleunigt werden.

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



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 sind u. a. Optik und Haptik. Mit dem neuen Fertigungsverfahren selektive Laserpolitur (SLP) 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 SLP wird anhand von ebenen Werkzeugeinsätzen aus dem Werkzeugstahl 1.2343 mit einer breiten Palette unterschiedlicher Narbstrukturen untersucht. Dazu wird zuerst die komplette Oberfläche mittels eines optischen Sensorsystems mit einer Auflösung von 1040 dpi digitalisiert. Zur SLP kann sowohl gepulste als auch kontinuierliche Laserstrahlung verwendet werden. Bei der Bearbeitung wird der Laserstrahlfokus gemäß der Werkzeuggeometrie mäanderförmig über die Oberfläche geführt. Zusätzlich wird die Laserleistung entlang der Bearbeitungsbahnen in Abhängigkeit von den vorhandenen Strukturen (nur ausgewählte Bereiche werden laserpoliert) angepasst.

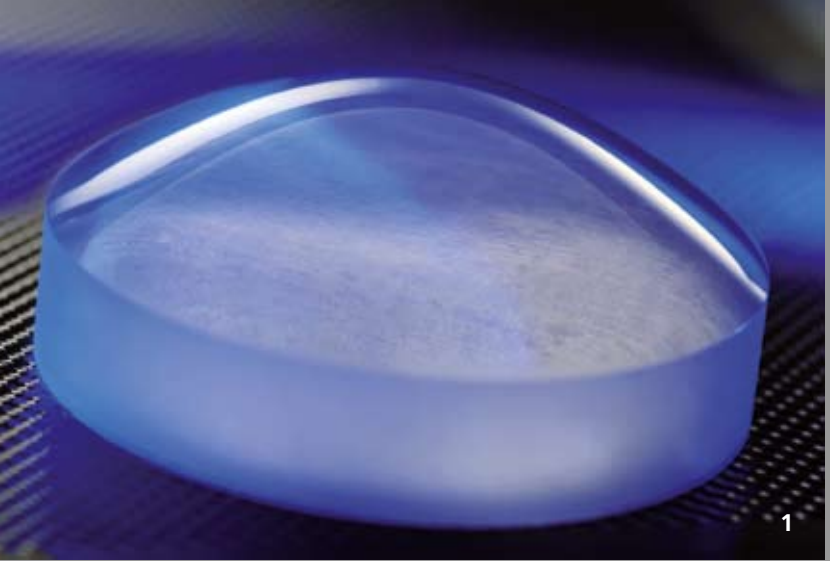
Ergebnis und Anwendungsfelder

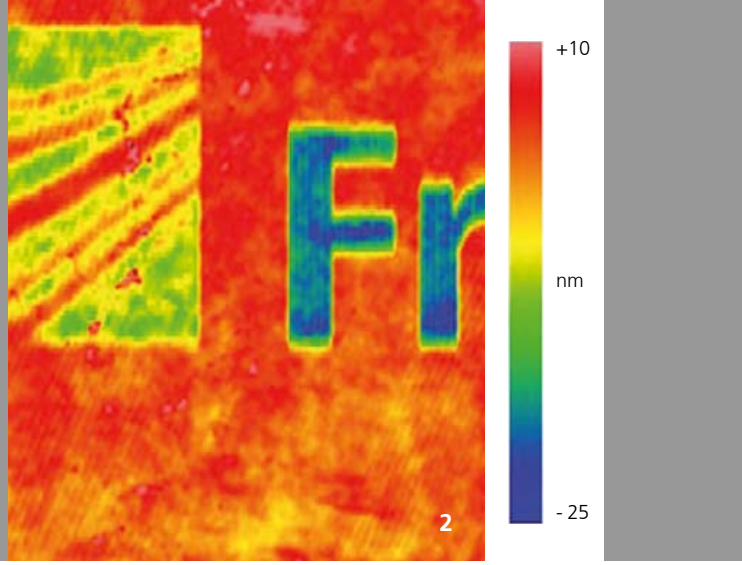
Durch die lokale Anpassung der Laserleistung wird der Glanz ausgewählter Strukturbereiche vergrößert und somit ein Zweiglanzeffekt erzeugt. Abhängig von den gewählten Bearbeitungsparametern variiert dabei der einstellbare Glanzgrad vom Ausgangszustand bis hin zu hohem Glanz. Der größte Glanzgrad wird durch eine aufeinanderfolgende Bearbeitung mittels kontinuierlicher und gepulster Laserstrahlung erzielt. Zur Demonstration des Verfahrens wurde eine breite Palette unterschiedlicher periodischer und nicht periodischer Strukturen auf ebenen Werkzeugeinsätzen aus dem Werkstoff 1.2343 selektiv laserpoliert und somit ein Strukturkatalog für die SLP erstellt. Darüber hinaus wurden von diesen Werkzeugeinsätzen Kunststoffteile mit Zweiglanzeffekt abgeformt. Die Bearbeitungszeit beträgt zur Zeit ca. 30 - 60 s/cm^2 bei einer Auflösung von 1040 dpi. Die kleinste auflösbare Struktur beträgt derzeit 150 µm im Durchmesser (Größe des Laserstrahlfokus). Wesentliche Ziele weiterer Forschungsarbeiten sind eine signifikante Vergrößerung der Prozessgeschwindigkeit (bis zu Faktor 100) und die Übertragung der Ergebnisse auf 3D-Werkzeuge mit hoher industrieller Anwendungsrelevanz, z. B. Prägewerkzeuge oder Armaturenträger für PKWs, sowie die Erprobung des Verfahrens im industriellen Umfeld.

Ansprechpartner

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

2 Selektiv laserpolierte, ebene Werkzeugeinsätze aus Werkzeugstahl 1.2343 mit unterschiedlich genarbten Oberflächen.





POLITUR UND FORM-KORREKTUR OPTISCHER KOMPONENTEN

Aufgabenstellung

Im Vergleich zu sphärischen Linsen vereinen asphärische oder freigeformte Optiken höhere Abbildungsqualität, kleinere Abmessungen und geringeres Gewicht, weshalb sie immer stärker nachgefragt werden. Bei der Politur von Optiken mit solchen Oberflächen weisen aktuell eingesetzte Polierverfahren jedoch lange Bearbeitungszeiten auf, wodurch die Herstellung in vielen Fällen unwirtschaftlich wird. Aus diesen Gründen werden am Fraunhofer ILT das Laserpolieren und die Laserformkorrektur von Optiken entwickelt, die sich insbesondere zur Bearbeitung von asphärischen und freigeformten Oberflächen eignen.

Vorgehensweise

Das Wirkprinzip des Laserpolierens beruht auf dem oberflächennahen Aufheizen des Glasmaterials auf knapp unterhalb der jeweiligen Verdampfungstemperatur. Dabei verringert sich die Viskosität, wodurch die Rauheit ausfließen kann. Die Glättung der Oberfläche erfolgt durch die Oberflächenspannung, wobei im Gegensatz zu konventionellen Polierverfahren kein Material entfernt wird. Durch eine Anpassung der Verfahrensparameter können sowohl flache als auch nahezu beliebig gekrümmte Oberflächen in identischer Zeit bearbeitet werden.

1 Laserpolierte Asphäre aus BK7.

2 Weißlichtinterferometeraufnahme des selektiven Materialabtrags zur Formkorrektur.

Eine dem Laserpolieren nachfolgende, ebenfalls laserbasierte Formkorrektur entfernt selektiv kleinste Mengen an überflüssigem Glasmaterial durch Verdampfung und soll auf diese Weise die Formgenauigkeit vergrößern.

Ergebnis

Durch das Laserpolieren werden bereits für Beleuchtungsoptiken ausreichende Rauheiten erreicht, die Flächenrate von 1 cm²/s liegt dabei um mindestens eine Größenordnung oberhalb der mit konventioneller Politur erreichbaren. Mittels Formkorrektur kann Glasmaterial mit einer vertikalen Auflösung von unter 10 nm selektiv abgetragen werden. Derzeit wird das Verfahren für den Einsatz auf laserpolierten Oberflächen angepasst. Durch die Kombination beider Prozesse sollen in Zukunft auch abbildende Optiken mit höheren Anforderungen bezüglich der Oberflächenrauheit bearbeitet werden können.

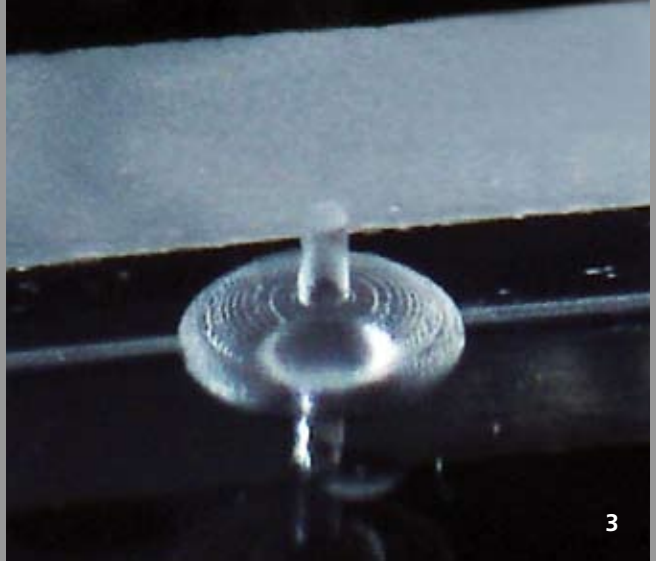
Anwendungsfelder

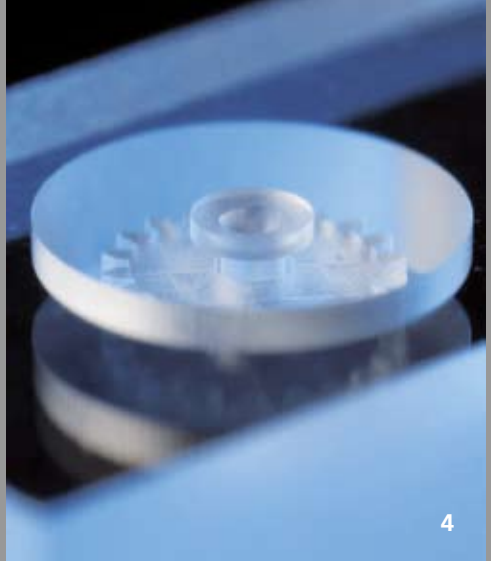
Hauptanwendungsgebiet ist die schnelle und kostengünstige Politur und Formkorrektur von nichtsphärischen optischen Komponenten in kleiner bis mittlerer Stückzahl. Dabei kann der Prozess auch mit konventionellen Bearbeitungsverfahren kombiniert werden. Weiterhin wird eine komplett laserbasierte Optikfertigung entwickelt, wobei vor dem Polierprozess die Formgenerierung durch Materialabtrag mittels Laserstrahlung erfolgt.

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





MONTIERTE MIKROBAUTEILE AUS GLAS

Aufgabenstellung

Für mikromechanische Systeme werden Mikrobauteile mit maskenbasierten oder abformenden Verfahren hergestellt, welche für Prototypen und kleine Stückzahlen oft nicht geeignet sind. Das anschließende Zusammensetzen der Mikrobauteile zu einem mikromechanischen System ist aufwendig, wenn die Bauteile klein und komplex sind. Daher ist die Herstellung von bereits zusammengebauten mikromechanischen Systemen insbesondere für Prototypen und Kleinserien vorteilhaft. Ziel ist eine individualisierte Produktion von komplexen Strukturen durch digitale photonische Produktion, also die laserbasierte Fertigung direkt aus digitalen Daten (CAD). Für transparente Werkstoffe ist ein für die digitale photonische Produktion geeignetes Verfahren das laserinduzierte selektive Ätzen.

Vorgehensweise

Das selektive laserinduzierte Ätzen ist ein zweistufiger Prozess: Im ersten Schritt wird das für die Laserstrahlung transparente Material im Inneren modifiziert. Dafür wird ultrakurz gepulste Laserstrahlung (500 fs - 5 ps) fokussiert (1 - 2 µm). Durch die Bewegung des Fokus wird ein zusammenhängendes Volumen modifiziert, welches Kontakt zur Außenfläche des Werkstücks aufweist. Im zweiten Schritt wird das modifizierte Material selektiv durch nasschemisches Ätzen entfernt. Für die digitale photonische Produktion von komplexen Bauteilen werden aus den digitalen CAD-Daten die Bahndaten für den Laserfokus erstellt und mittels CAM-Software das Mikroscannersystem synchron gesteuert. Das Mikroscannersystem und die Bauteile sollen durch ein ausgegründetes Unternehmen zukünftig kommerziell verfügbar werden.

Ergebnis

In Quarzglas wird ein Zahnrad von 4 mm Durchmesser hergestellt, welches nach dem Ätzen drehbar auf seiner Achse montiert ist (Bild 4). Ähnlich diesem Demonstrator können komplexe mikromechanische Systeme wie beispielsweise Getriebe auf der Basis von CAD-Daten hergestellt werden. Für Anwendungsfelder in der Mikrofluidik wird beispielsweise ein dreidimensionaler Mikromischer mit vier Kanälen und einer beweglichen Glaskugel im Inneren des Mischvolumens hergestellt (Bild 3).

Anwendungsfelder

Anwendungsfelder sind die Mikromechanik für individuell und bereits montiert gefertigte Mikrokomponenten sowie die Mikrofluidik, in der Hohlstrukturen zum Einsatz kommen.

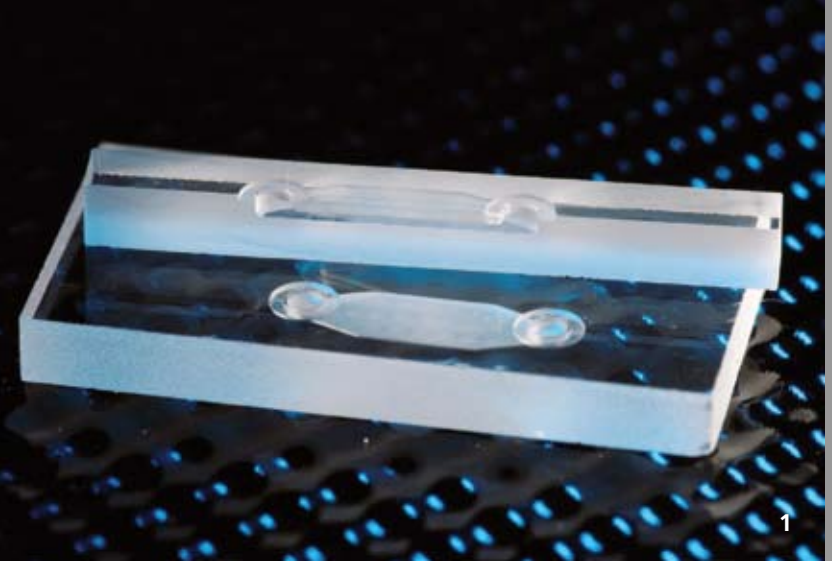
Ansprechpartner

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

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

3 Bewegliche Glaskugel im Mikromischer.

4 Bewegliches, montiertes Zahnrad in Glas.



HOCHGESCHWINDIGKEITS-MIKROSCANNER

Aufgabenstellung

Neue Hochleistungs-fs-Slabverstärker mit 150 W bis 1 kW Leistung und Repetitionsraten > 5 MHz ermöglichen eine Produktivitätssteigerung für die digitale photonische Produktion – die direkte Herstellung von Teilen aus CAD-Daten mittels Laserstrahlung ohne Masken und Abformwerkzeuge. Zur Umsetzung dieses Potenzials für die Herstellung von 3D-Mikrobauteilen mit 1 µm Präzision ist die Entwicklung einer Mikrofokussierung mit schneller Strahlablenkung und CAM-Software erforderlich.

Vorgehensweise

Ein modularer Hochgeschwindigkeitsmikroscanner ist auf Basis von akustooptischer Strahlablenkung, Galvospiegeln und Linearachsen aufgebaut worden. Zusätzlich ist eine CAM-Software zur synchronen Steuerung der Laserleistung, der unterschiedlichen Strahlablenkungsmodule und der Linearachsen entwickelt worden. Das System wird zukünftig durch ein ausgegründetes Unternehmen kommerziell verfügbar sein. Für die digitale photonische Produktion von mikrostrukturierten 3D-Bauteilen werden aus den 3D-CAD-Daten 2D-Bahndaten berechnet, welche nacheinander kontrolliert durch die CAM-Software mit den Modulen des Mikroscanners umgesetzt werden (Bild 1).

Ergebnis

Das Werkstück wird im Hochgeschwindigkeitsmikroscanner hinter der mit einem Laserschutzfenster versehenen Schiebetür eingespannt (Bild 2). Für den Einsatz mit vorhandener 3-Achsanlage wird der Hochgeschwindigkeitsmikroscanner alternativ an der z-Achse montiert. Das System enthält ein Mikroskop mit einer Kamera zur Ausrichtung des Werkstücks und zur Kontrolle des Bearbeitungsergebnisses. Für einen Fokusradius von 1 µm wird ein telezentrisches Objektiv mit 10 mm Brennweite eingesetzt und auf einem Bahnradius von 400 µm eine Bahngeschwindigkeit von bis zu 12 m/s erreicht, sodass Repetitionsraten von bis zu 5 MHz räumlich getrennt werden.

Anwendungsfelder

Der Hochgeschwindigkeitsmikroscanner ermöglicht die produktive Herstellung von 3D-Mikrobauteilen mittels des selektiven laserinduzierten Ätzens (ISLE) unabhängig von der Losgröße und der Produktkomplexität. Weitere Anwendungsfelder sind z. B. die Mikrostrukturierung durch Materialabtrag, 2-Photonen-Polymerisation sowie das Mikroschweißen mit großer Geschwindigkeit.

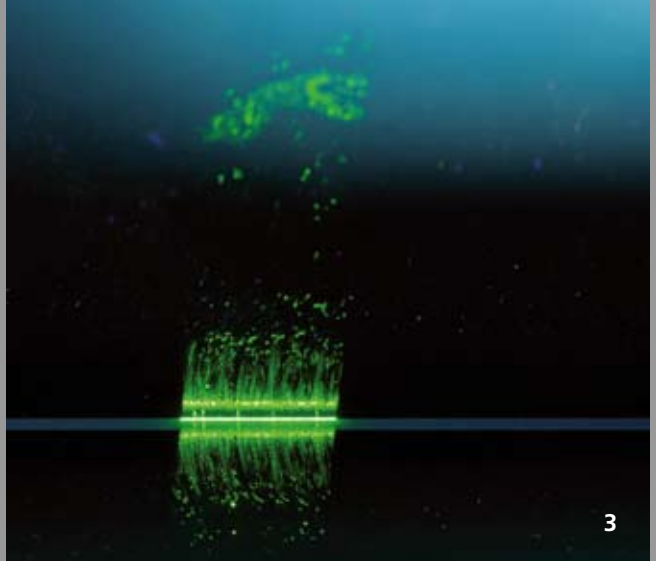
Ansprechpartner

Dr. Jens Gottmann
Telefon +49 241 8906-406
jens.gottmann@ilt.fraunhofer.de

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

1 3D-Mikrokanal in Quarzglas durch ISLE.

2 Hochgeschwindigkeitsmikroscanner.



3

4

LASERABTRAG FÜR DIE STRUKTURIERUNG DÜNNER, FUNKTIONALER SCHICHTEN

Aufgabenstellung

Viele neuartige Produkte basieren auf dünnen Schichten aus leitenden, halbleitenden oder isolierenden Materialien. Sie weisen Dicken im Nano- und Mikrometerbereich auf und müssen im Wesentlichen elektrische und optische Funktionen erfüllen. Eine konkurrenzfähige Prozesstechnik für die Strukturierung solcher Schichten erfordert hohe Geschwindigkeiten, geringe Strukturgrößen und die Anwendbarkeit auf große Formate. Drucken bei hohen Geschwindigkeiten erlaubt Strukturgrößen bis ca. 10 µm. In Kombination mit der Laserstrukturierung lässt sich die Auflösung und die Produktivität deutlich verbessern.

Vorgehensweise

Partikel aus Ablösungen bestrahlter Schichten, thermische Schädigung benachbarter Bereiche sowie Aufwürfe im Randbereich des Abtrags müssen vermieden werden. Daher werden bei der Prozessentwicklung Parameter wie Gasatmosphäre, Wellenlänge, räumliche und zeitliche Pulsform und nachträgliche Reinigung berücksichtigt. Besonders die Strukturierung des transparenten, leitfähigen Indium-Zinn-Oxids (ITO) führt zu Randaufwürfen, die für nachfolgende Beschichtungen kritisch sind. Die Verwendung von Ultrakurzpulslasern oder Excimerlasern mit Wellenlängen im tiefen UV-Bereich erlaubt physikalische Prozesse, die auf anderen Wegen nicht erreichbar sind.

Ergebnis

Durch die Verwendung angepasster Wellenlängen, Pulsdauern und Abtragsstrategien lassen sich Strukturgrößen im Mikrometerbereich mit vernachlässigbaren Aufwurfhöhen realisieren. Extrem hohe Strukturierungsgeschwindigkeiten von einigen Hundert Metern pro Sekunde werden durch die Verwendung von Polygonscannern oder durch parallele Bearbeitung mittels Mehrfachstrahlteilung ermöglicht.

Anwendungsfelder

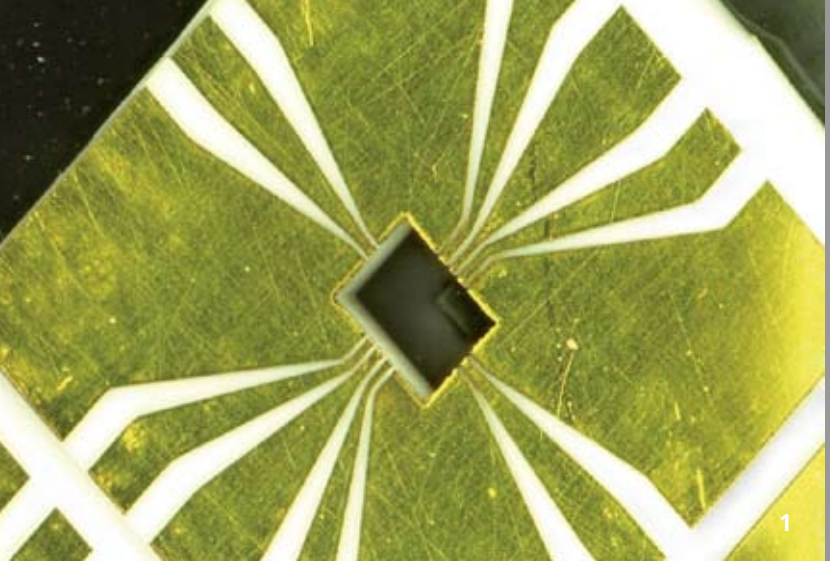
Die hochaufgelöste Strukturierung dünner Schichten ist besonders für die organische Elektronik von großer Bedeutung. So können beispielsweise OLEDs, multifunktionale RFID-Tags und hochaufgelöste flexible Displays auf diese Weise strukturiert werden. Auch für die monolithische Serienverschaltung von Dünnschicht-Solarmodulen sind diese Verfahren von großem Interesse.

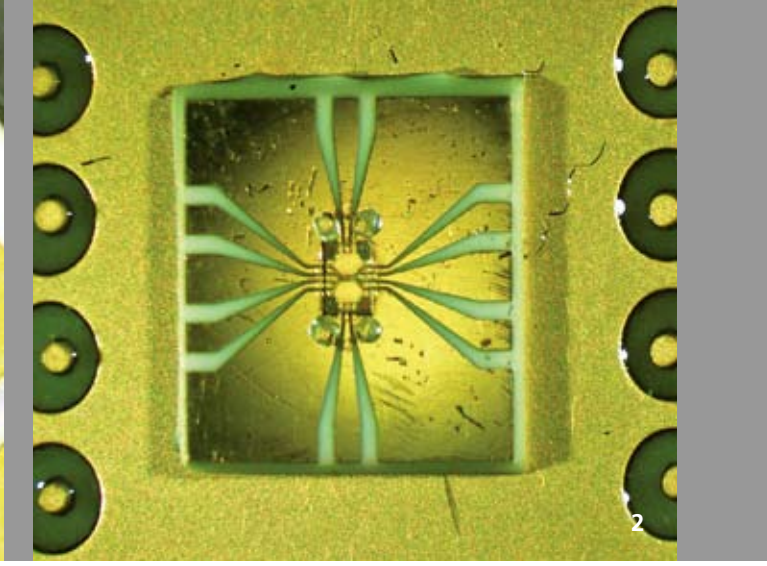
Ansprechpartner

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

3 Strukturierung dünner metallischer Schichten mit einem ps-Laser.
4 Strukturierung von amorphen Siliziumschichten auf Glas.





STRUKTURIERUNG VON HOCHFREQUENZ-KERAMIKSUBSTRATEN

Aufgabenstellung

Der Trend zu Höchstfrequenzbauteilen mit immer höheren Bitraten bis 100 GBit/s erfordert Substrate und Leiterplattenstrukturen, die die notwendigen elektrischen Eigenschaften und gleichzeitig die für die hohen Frequenzen geringen Wellenleiterstrukturen aufweisen. Die verwendeten Hochfrequenzbauelemente arbeiten bei Frequenzen bis über 50 GHz und müssen möglichst verlustarm über Bandleiter mit den Wellenleitern auf dem Substrat verbunden werden. Für die Fertigung der Schaltkreise besteht die Aufgabe darin, erstens passgenaue Vertiefungen in den Keramiksubstraten herzustellen und zweitens die Leiterbahnstrukturen mit Leiterbahnbreiten von 70 µm und Abständen von 30 µm zu realisieren.

Vorgehensweise

Die verwendeten Chips haben Abmessungen von 1 mm x 1 mm bei einer Dicke von 0,6 mm. Zur Reduzierung der Länge der Bonddrähte bzw. Bondbändchen muss sich der Chip auf einer Ebene mit der Substratoberfläche befinden, sodass im Substrat exakte Vertiefungen erzeugt werden müssen. Mittels Abtrag mit Ultrakurzpulslaserstrahlung bei Pulsdauern von 10 ps können sowohl die Chipaufnahme erzeugt als auch die Leiterbahnen direkt aus der Kupferbeschichtung abgetragen werden. Dabei beträgt der Spalt zwischen Chip und Träger weniger als 50 µm, sodass sich Bonddrahtlängen auf etwa 100 µm reduzieren lassen.

Ergebnis

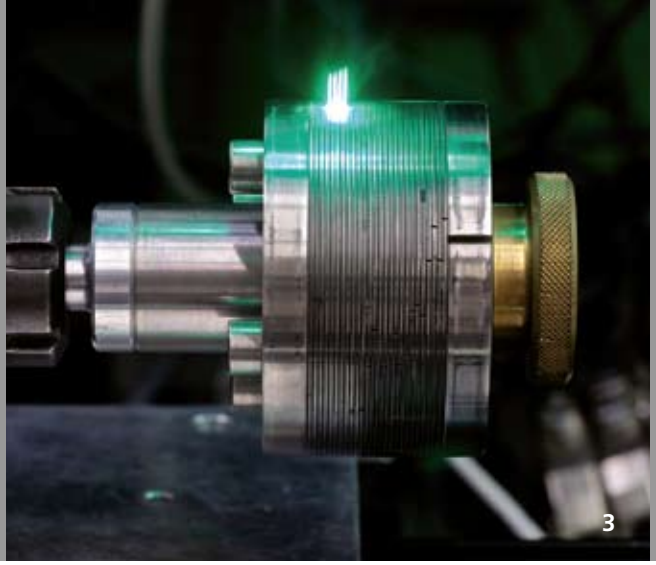
Mit Ultrakurzpulslasern können sowohl Keramik- als auch Kupferbeschichtung rückstandsfrei abgetragen werden. Der Einsatz der Laserabtragtechnik mit ultrakurzen Pulsen ermöglicht die Herstellung des Lochs und der Leiterbahnstrukturen in einer Aufspannung, in einer Maschine und mit einem Laser mit lediglich angepassten Bearbeitungsparametern. Jeder einzelne Chipträger ist etwa 5 x 5 mm groß. Auf einem größeren Substrat werden mehrere Chipträger in einem Durchgang hergestellt und mit dem Laser geritzt. Anschließend lassen sich die Chipträger durch Brechen einfach vereinzeln. Durch die mittlerweile verfügbare höhere Laserleistung bis zu 100 W eignet sich das Verfahren nicht nur zum Prototyping, sondern aufgrund der geringen Abmessungen der Strukturen auch für die Serienfertigung von Hochfrequenzleiterplatten.

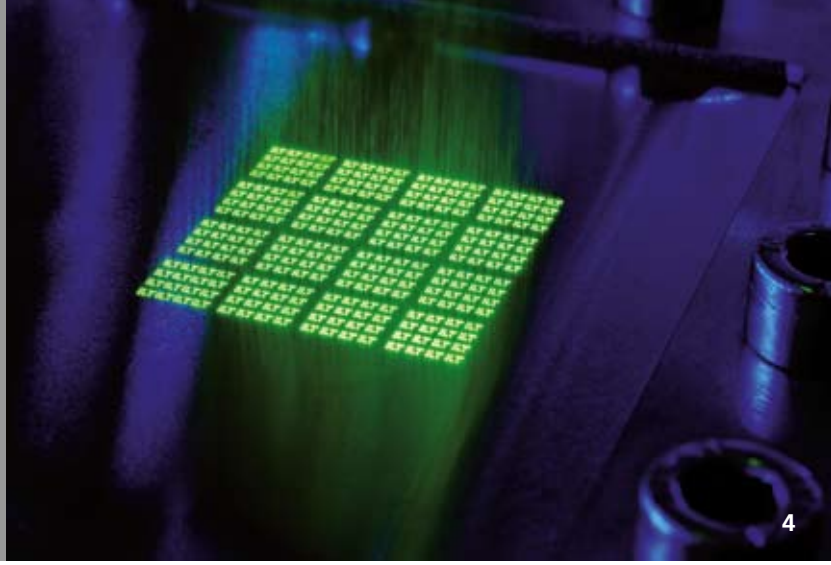
Ansprechpartner

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

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

1 Laserstrukturiertes metallisiertes Keramiksubstrat mit Chipkavität.
2 Substratträger mit eingesetztem Chip.





PROZESSBESCHLEUNIGUNG BEIM LASERABTRAG MIT MULTISTRAHLOPTIKEN

Aufgabenstellung

Bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern (UKP-Lasern) stehen aufgrund der ständigen Weiterentwicklung der Laserstrahlquellen immer höhere mittlere Laserleistungen zur Verfügung. So sind heute industrietaugliche UKP-Laserquellen mit Ausgangsleistungen im Bereich von 50 - 100 W kommerziell verfügbar, Laserquellen mit Leistungen bis zu 1000 W und mehr werden in den kommenden Jahren den Markt erobern. In vielen Anwendungen sind oft kleine Spotdurchmesser zur Erzielung hoher Genauigkeiten bzw. kleiner Strukturierungsdimensionen gefragt. Mit einer Erhöhung der mittleren Laserleistung bei kleiner Spotgeometrie kann jedoch aufgrund von zu großem Energieeintrag nur bedingt eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit bei gleichbleibender Bearbeitungsqualität erzielt werden. Um die Prozessgeschwindigkeit hier dennoch zu erhöhen, sind Technologien erforderlich, mit denen die Laserleistung schnell auf große Flächen verteilt werden kann.

Vorgehensweise

Neben der Möglichkeit der schnellen Strahlablenkung mit z. B. Polygonscannern kann die verfügbare Energie auch auf mehrere Teilstrahlen aufgeteilt werden. Dafür wurde ein Multi-Strahl-Scansystem auf Basis von diffraktiv optischen Elementen in Kombination mit einem schnellen Galvanometerscanner entwickelt und aufgebaut.

Ergebnis

Mit dem entwickelten System wird die zur Verfügung stehende Pulsenergie auf bis zu 100 Teilstrahlen aufgeteilt, um in der Bearbeitungsebene ein Laserspotraster mit fester Periode zu bilden. Mit dem System lässt sich die Prozessgeschwindigkeit so um einen Faktor 100 und mehr erhöhen. Mit der Möglichkeit, Ultrakurzpuls-Hochleistungssysteme auch mit sehr hohen Pulsenergien im Bereich von 1 mJ zu betreiben, werden somit hochpräzise Bearbeitungsverfahren auch für große Bauteile ermöglicht und wirtschaftlich darstellbar.

Anwendungsfelder

Die Anwendung des optischen Systems zielt auf aktuelle Fragestellungen aus dem Bereich Werkzeugtechnik mit der Herstellung von Lichtleit- und Streustrukturen oder anderweitiger funktionaler Oberflächen. Mit dem anwendungsübergreifenden Scanansatz ist der Einsatz des optischen Systems auch für andere Bereiche der Lasermaterialbearbeitung wie z. B. Laserfügen, Laserschneiden oder Laser Rapid Manufacturing vorstellbar.

Ansprechpartner

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

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

3 Parallelbearbeitung von Kolbenringen zur Verschleißreduktion.
4 Mit einem diffraktiv optischen Element erzeugte Multispot-Strahlverteilung.

CHARAKTERISIERUNG SCANNERBASIERTER FERTIGUNGSSYSTEME

Aufgabenstellung

Alle Fertigungsprozesse in der laserbasierten Mikromaterialbearbeitung sind auf ein hohes Maß an Präzision in der Positionierung des Laserstrahls angewiesen. Besonders bei Abtragprozessen wird zur Erzeugung definierter Abtragtiefen die zu bearbeitende Kontur mehrfach mit dem Laserstrahl abgefahren und dadurch das Abtragvolumen schichtweise erzeugt. Treten Fehler bei der Positionierung des Bearbeitungsstrahls auf, führt deren Aufsummierung über die Anzahl der Abtragschichten zu qualitätsrelevanten Bearbeitungsfehlern. Fehler können beispielsweise durch thermische Drift in der Scanneroptik oder auch Fehlpositionierungen und unzureichende Bildfeldkalibrierungen auftreten.

Vorgehensweise

Zur Bestimmung der Systemfehler wird ein kamerabasiertes Messsystem eingesetzt, mit dem der Versatz des Laserstrahls relativ zum Werkstück ermittelt werden kann. Eine Kamera wird hierzu koaxial in den Bearbeitungsstrahlengang eingekoppelt und beobachtet damit das Werkstück über alle Komponenten der Strahlformungskette hinweg. Algorithmen der Bildverarbeitung ermitteln die Verschiebung des Beobachtungspunktes relativ zu einer feststehenden Referenzplatte. Die gesteuerten Größen des Ablenkungssystems werden parallel aufgezeichnet und für den Vergleich mit den Messdaten bereitgestellt.

Ergebnis

Der Vergleich der gesteuerten mit der realen Bewegung erlaubt die Bestimmung des dynamischen Verhaltens der gesamten Strahlführungs- und -formungskette. Aus den ermittelten Daten werden Korrekturfaktoren für die Erstellung der Bearbeitungsstrategie extrahiert oder Informationen für die Abstimmung der Systemkomponenten aufeinander gewonnen.

Anwendungsfelder

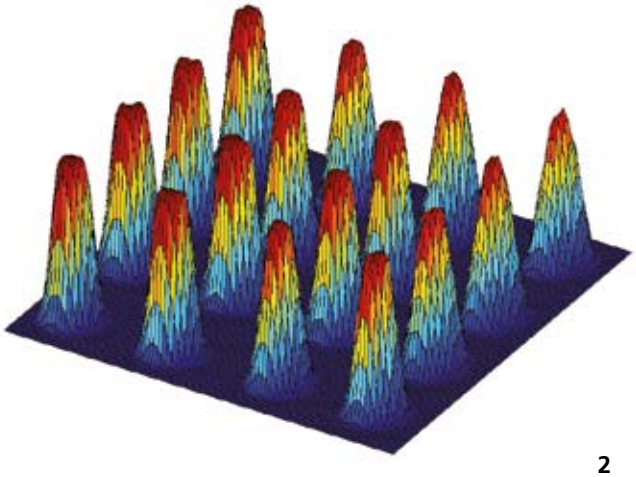
Das System eignet sich für die Charakterisierung von scannerbasierten Fertigungssystemen und erlaubt die Bestimmung dynamischer Kenngrößen wie Bahn- und Konturgenauigkeit. Die Hinzunahme einer geeigneten Laserquelle erlaubt die Absicherung produktionsrelevanter Eigenschaften von Fertigungssystemen, von der Laserquelle bis zur Einkopplung der Energie ins Werkstück.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Fiedler M.Sc., SFI (IWE)
Telefon +49 241 8906-390
wolfgang.fiedler@ilt.fraunhofer.de

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

1 Kamerabasiertes Scanner-Messsystem.



2

3

VERMESSUNG VON MULTISTRAHLOPTIKEN

Aufgabenstellung

Die Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung ermöglicht eine Vielzahl neuer Bearbeitungsprozesse auf Basis kurzer Wechselwirkungszeiten. Die geringe örtliche Ausdehnung des Laserfokus von wenigen Mikrometern zusammen mit der ultrakurzen Pulsdauer steht jedoch in vielen Fällen im Widerspruch zu einer hohen Produktivität. Ein Ansatz zur Steigerung der Bearbeitungsrate ist der Einsatz diffraktiver optischer Elemente zur Teilung eines Laserstrahls in eine Vielzahl von Teilstrahlen. Die Einhaltung der geforderten Eigenschaften der Teilstrahlen ist dabei eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Bearbeitung mit hoher Qualität und Reproduzierbarkeit. Bisherige Strahlanalysesysteme sind jedoch nur in der Lage, einzelne Strahlen mit hoher Genauigkeit exakt zu vermessen.

Vorgehensweise

Für die Bearbeitung mittels Ultrakurzpulslaserstrahlung und Spotgeometrien < 10 µm sowie Mehrfachstrahlen wurde ein Analysesystem realisiert, mit dem sowohl die absolute Lage der Einzelstrahlen als auch die Größe der Einzelstrahlen detektiert und vermessen werden kann. Ein Flächensensor mit 2 µm kleinen Pixeln wird über ein Umlenksystem unter der Bearbeitungsoptik platziert und misst prozessrelevante Eigenschaften der einzelnen Teilstrahlen. Mittels Bildverarbeitung und speziell auf die Laserfoki angepasster Algorithmen werden relevante Eigenschaften der Laserstrahlen aus den Messsignalen extrahiert.

Ergebnis

Die Visualisierung der aufbereiteten Messdaten erlaubt einen direkten Rückschluss auf Positionsfehler in der Ebene und Profil- und Intensitätsabweichungen im Feld. Mit diesen Informationen wird die Ausrichtung der im Strahlengang verwendeten optischen Komponenten justiert und das Bearbeitungsergebnis verbessert.

Anwendungsfelder

Das Multispot-Messsystem eignet sich zur Bestimmung der Eigenschaften multipler Teilstrahlen in Fertigungssystemen zur Mikromaterialbearbeitung. Der Einsatz zur Justage und zur Kontrolle des optischen Systems für multiple Strahlen trägt so zum schnellen Rüsten von Fertigungssystemen ebenso bei wie zur regelmäßigen Sicherung der Fertigungsbedingungen im Produktionsbetrieb.

Ansprechpartner

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

Dipl.-Ing. Peter Abels
Telefon +49 241 8906-421
peter.abels@ilt.fraunhofer.de

2 Messsignal der Teilstrahlen.

3 Sensoraufbau mit Abschwächer.

1

2

LASERMATERIAL-BEARBEITUNG MIT SCHALLGESCHWINDIGKEIT

Aufgabenstellung

Die aktuellen Entwicklungen bei Ultrakurzpulslasern erreichen immer neue Rekorde bezüglich Laserleistung und Pulsrate. Zur Erzeugung hochqualitativer Bearbeitungsergebnisse müssen die einzelnen Laserpulse separiert werden, um eine Überhitzung des Materials und eine Interaktion der einzelnen Pulse zu vermeiden. Bei Pulsfrequenzen im Multi-MHz-Bereich reicht die Scangeschwindigkeit von Galvanometerscannern nicht mehr aus, wodurch bei Beibehaltung eines möglichst geringen Pulsüberlapps diese Laser nur mit reduzierter Leistung verwendet werden können.

Vorgehensweise

Zur Realisierung einer hohen Scangeschwindigkeit im Bereich > 100 m/s und eines schnellen Abtrags mit hochrepetierenden Ultrakurzpulslasern wurde ein Bearbeitungssystem mit einem schnellen Polygonscanner und einem schnellen Strahlmodulator realisiert. Bei Polygonscannern rotiert ein Polygonspiegel mit hoher, konstanter Drehzahl, wodurch sich die maximale Bearbeitungsgeschwindigkeit um ein Vielfaches erhöht. Dies ermöglicht einen geringen Pulsüberlapp für ein optimales Ergebnis bei Ausnutzung der vollen Laserleistung. Ein auf den Polygonspiegel auftreffender Laserstrahl wird entlang einer Linie abgelenkt. Das Verschieben dieser Linie für eine flächige Bearbeitung erfolgt durch das Verfahren des Werkstücks. Der Laserstrahl wird synchronisiert zur Position des Polygons und der Achse moduliert. Die Datenausgabe erfolgt im Takt der Laserpulse.

Ergebnis

Mit dem realisierten Polygonscannersystem zur flächigen Bearbeitung können bei einem typischen Spotdurchmesser von 20 µm Scangeschwindigkeiten von bis zu 360 m/s erreicht werden, wodurch sogar Pulse bei einer Pulsfrequenz von 18 MHz voneinander getrennt werden. Durch Optik und Achssystem ist die Bearbeitungsfläche auf 200 x 200 mm^2 begrenzt.

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.

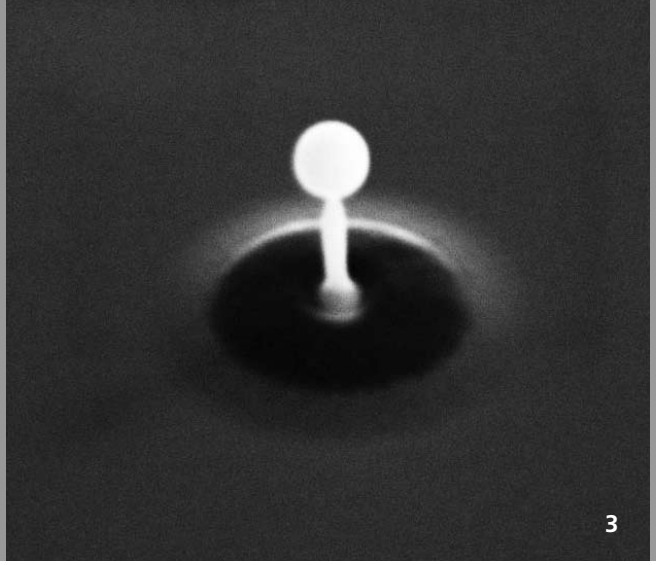
Ansprechpartner

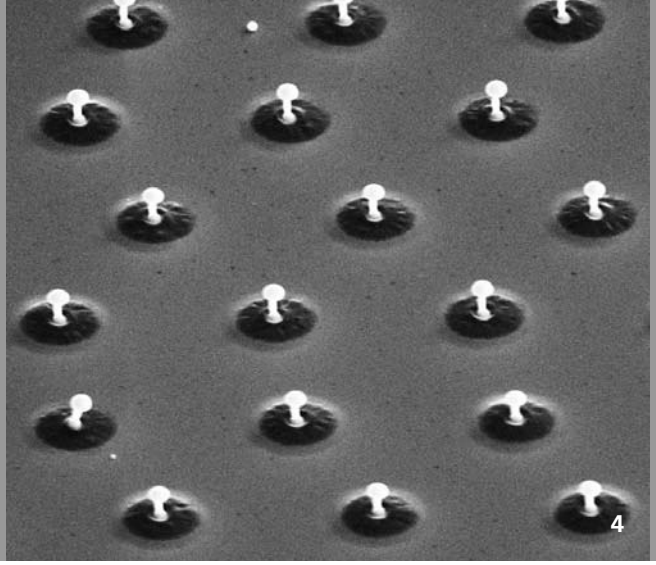
Dipl.-Ing. Oliver Nottrodt
Telefon +49 241 8906-625
oliver.nottrodt@ilt.fraunhofer.de

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

1 Projektion einer Bearbeitungsschicht.

2 Polygon-Bearbeitungsoptik.





NANOANTENNEN

Aufgabenstellung

Die Verstärkung von evaneszenten Nahfeldern durch den Einsatz von optischen Antennen wird z. B. in der optischen Rasternahfeld-Mikroskopie (s-SNOM) und in der oberflächenverstärkten Infrarot-Spektroskopie (SEIRA) ausgenutzt. SEIRA ist ein optisches Messverfahren zur Detektion der für ein Molekül charakteristischen Absorptionsbande. Um Signale von einzelnen Molekülen beziehungsweise Molekülen in geringer Konzentration, wie zum Beispiel in Dünnfilmen, detektieren zu können, muss das von diesen Molekülen ins Fernfeld rückgestreute Licht verstärkt werden. Mithilfe des s-SNOM-Messverfahrens können die chemischen und strukturellen Eigenschaften einer Probe mit einer Sensitivität von unter 20 nm optisch aufgelöst werden, was fundamental für analytische Applikationen in der Biologie und der Chemie ist.

Vorgehensweise

Ultrakurze Laserpulse werden mittels eines Mikroskopobjektivs auf 30 nm dünne Goldfilme fokussiert. Durch die großen Intensitäten, welche aufgrund der kurzen Pulsdauer von 100 fs schon bei Pulsenergien von einigen 10 nJ erzielt werden, wird ein ultraschnelles Aufschmelzen des Goldfilms über seine gesamte Dicke induziert. Die Dynamik der Schmelze führt zu einem Materialtransport (Jet) aus der Mitte des bestrahlten Bereichs in die Höhe. Aufgrund der sehr kleinen eingebrachten Energiemenge erstarrt der Goldjet in der Aufwärtsbewegung und bildet eine stabile Antenne (Bild 3).

Ergebnis

Nanojets als optische Antennen z. B. für SEIRA- oder s-SNOM-Anwendungen können mit einem Durchmesser von weniger als 100 nm hergestellt werden. Durch geeignete Wahl der Fokussierung, der Pulsenergie und der Goldfilmdicke kann die Größe der Nanoantennen sehr genau kontrolliert werden. Dadurch ist eine Anpassung z. B. auf die charakteristischen Absorptionsbande bestimmter Moleküle bei der SEIRA-Spektroskopie möglich.

Anwendungsfelder

Nanojets als optische Antennen können in den analytischen Bereichen der Chemie, der Biologie und des Maschinenbaus eingesetzt werden. Die Verstärkung evaneszenter Nahfelder ermöglicht die optische Detektion mit einer räumlichen Auflösung im Bereich von 10 nm und die Detektion kleinster Konzentrationen bis hin zu einzelnen Molekülen.

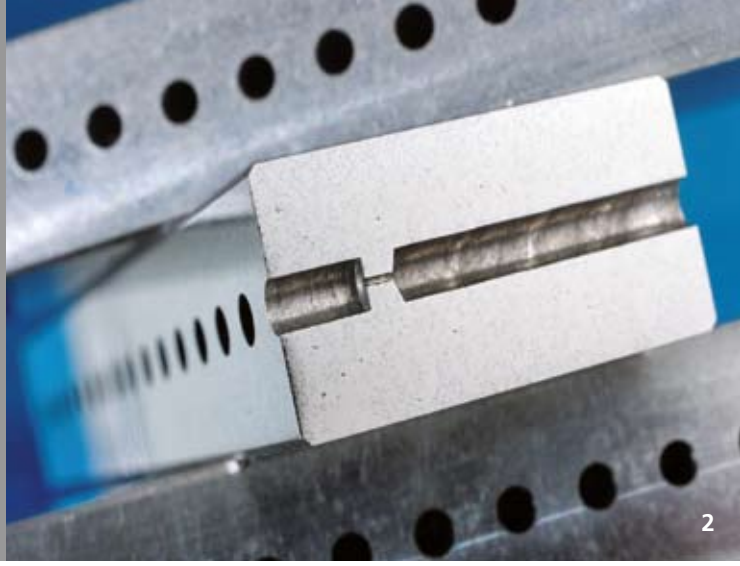
Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Martin Reininghaus
Telefon +49 241 8906-376
martin.reininghaus@ilt.fraunhofer.de

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

3 Einzelner Nanojet.

4 Nanojetfeld.



LASERSTRAHLBOHREN VON HOCHDRUCKDÜSEN

Aufgabenstellung

Aktuell werden in mobilen Klimaanlagen zur Fahrzeugklimatisierung Kältemittel mit teils umwelt- und gesundheitsschädlichen Eigenschaften verwendet. Als langfristige Alternative ist der Einsatz des natürlichen Kältemittels CO_2 möglich, welches als technisches Nebenprodukt kostengünstig und nahezu unbegrenzt verfügbar ist. Aufgrund größerer erforderlicher Druckverhältnisse von bis zu 300 bar ist eine Neuauslegung der Regelungseinheit erforderlich. Die Düsenbohrung mit einem Durchmesser von 300 µm kann aufgrund des inhomogenen Gefüges des verwendeten Leichtbauwerkstoffs AlSi17Cu4Mg und der technischen Anforderungen an die Geometrie der Bohrung nicht mechanisch gefertigt werden. Das Verfahren Laserstrahlbohren stellt potentiell eine geeignete Alternative dar.

Vorgehensweise

Um die geforderten Spezifikationen bezüglich geometrischer und metallurgischer Qualität zu erreichen, werden Versuche mit kurz- und ultrakurzgepulster Laserstrahlung durchgeführt (Pulsdauern im µs- bis ps-Bereich). Die experimentelle Versuchsdurchführung erfolgt nach der Methode der statistischen Versuchsmethodik (SVM), sodass der Versuchsaufwand möglichst klein ist.

Ergebnis

Durch den Einsatz von ultrakurzgepulster Laserstrahlung können folgende geometrische und metallurgische Eigenschaften der Düsenbohrungen erreicht werden:

- Durchmessertoleranz ± 5 µm
- Konizität < 10 Prozent
- Schmelzfilmdicke < 10 µm
- Oberflächenrauheit R_a < 5 µm
- Vermeidung eines Schmelzbarts am Bohrungseintritt und -austritt

Anwendungsfelder

Bei einem zu erwartenden gesetzlichen Verbot der aktuell eingesetzten, teils gefährlichen Kältemittel in mobilen Klimaanlagen stellt die neu entwickelte Regelungseinheit für CO_2-betriebene Klimaanlagen eine geeignete Alternative dar. Der Prozessschritt Laserstrahlbohren kann in eine automatisierte Fertigungsanlage integriert werden.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des EFRE cofinanzierten operationellen Programms für NRW im Ziel »Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung« gefördert.

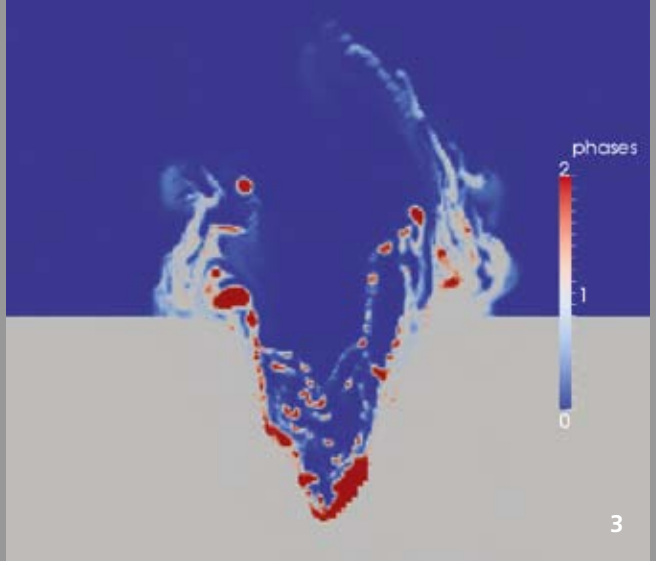
Ansprechpartner

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

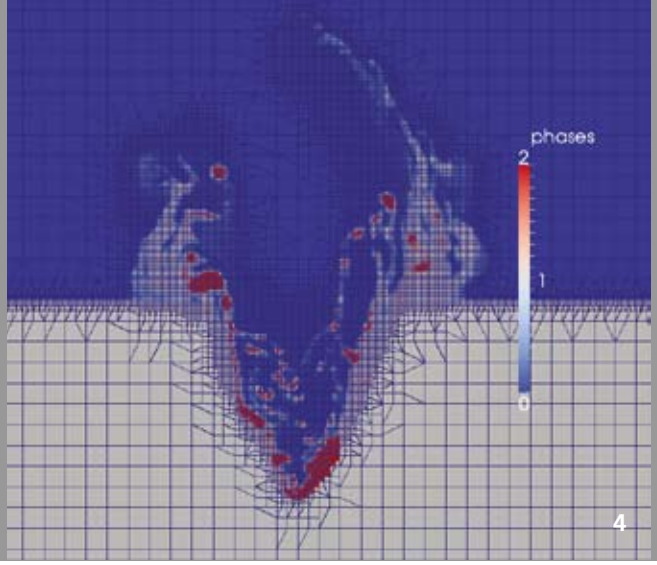
Dr. Ingomar Kelbassa
Telefon +49 241 8906-143
ingomar.kelbassa@ilt.fraunhofer.de

1 Laserstrahlbohren.

2 Längsschliff einer Düsenbohrung.



3



4

MODELLIERUNG UND SIMULATION DES SCHMELZABTRAGENS

Aufgabenstellung

Das Bohren/Abtragen mit Schmelze ist das effizienteste Verfahren zur Herstellung von Bohrungen mit großem Aspektverhältnis in Materialien mit schmelzflüssiger Phase. Das komplexe Verhalten der Schmelze und die Einflüsse von Verdampfung, Oberflächenspannung und Prozessgasen bleiben Gegenstand der Forschung.

Vorgehensweise

Zur Optimierung von Produktivität und Qualität ist ein operatives Modell erforderlich, das die wesentlichen physikalischen Phänomene beschreibt, die für den Abtrag und die Schmelzströmung verantwortlich sind.

Ergebnis

Ein Finite-Volumen-CFD-Code mit Volume-of-Fluid(VoF)-Verfahren zur Berechnung der freien Oberflächen wurde implementiert. Für die Phasenübergänge (Schmelzen, Verdampfen) wurde ein Enthalpie-Modell erstellt. Die Strahlungspropagation innerhalb der Bohrung basiert auf einem Advektions-Verfahren (geometrische Optik), wird jedoch auf ein Beam-Propagation-Verfahren (Wellenoptik) erweitert. Ein Continuous-Surface-Force(CSF)-Modell wird angewendet, um den Rückstoßdruck der Verdampfung und andere Oberflächenkräfte wie die Oberflächenspannung zu modellieren.

Besonderes Augenmerk wurde auf eine adaptive Vernetzung gelegt, die insbesondere an Phasengrenzen notwendig ist, um die entstehenden feinen Strukturen darzustellen, die auf dem Mechanismus der Filmströmung mit Oberflächenspannung und der Verdampfung beruhen.

Anwendungsfelder

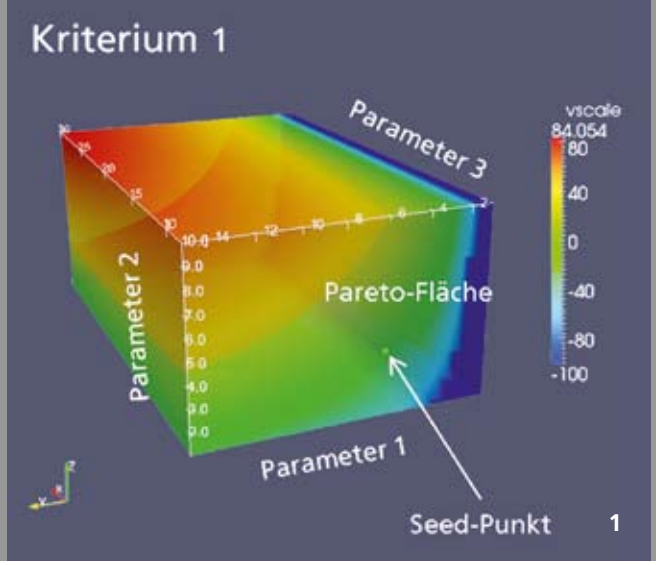
Die vorgestellte Simulation beschreibt die Absorption von Laserstrahlung an Werkstückoberflächen, die thermische Diffusion und Konvektion sowie den durch Verdampfung angetriebenen Schmelzfluss. Die Simulation ist frei von Einschränkungen an die geometrische Form der entstehenden Bohrung und kann z. B. mehrfach zusammenhängende schmelzflüssige Gebiete beschreiben. Sie kann daher überall zum Einsatz kommen, wo Werkstoffe durch Laserstrahlung geschmolzen werden und deren Schmelze teilweise durch Verdampfung angetrieben wird. Sie ist zunächst für die Anwendung beim Bohren mit Laserstrahlung entwickelt worden.

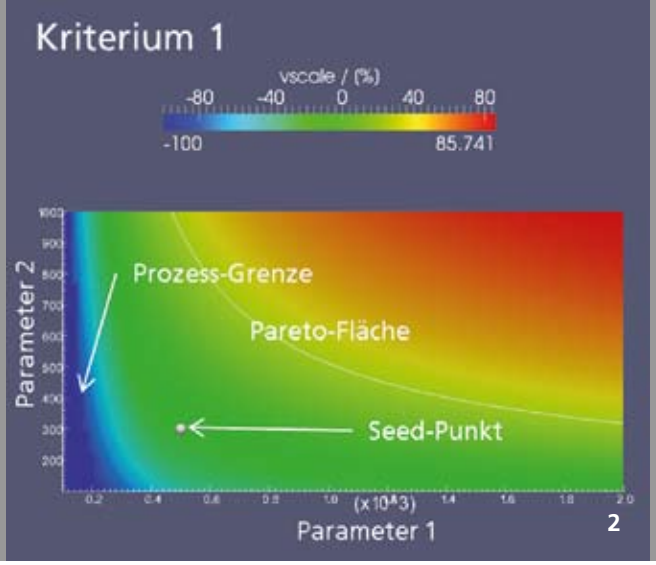
Ansprechpartner

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 Simulation der Phasen: fest (grau), flüssig (rot) und gasförmig (blau).
4 Simulationsergebnis mit Darstellung der adaptiven Vernetzung.





METAMODELLIERUNG

Aufgabenstellung

Für die anwendungsnahe Nutzung wissenschaftlicher Ergebnisse aus Simulation und Experiment besteht die Anforderung, die Ergebnisse aus Simulationen und Experimenten übersichtlich zusammenzusetzen, sodass die Daten explorierbar werden.

Vorgehensweise

Die Metamodellierungstechnik erlaubt es, einzelne Simulationsergebnisse zu einem Prozessmodell zusammenzufassen, mit experimentellen Daten zu hinterlegen und nachfolgend übersichtlich und explorierbar darzustellen. Darüber hinaus lassen sich die Daten des Metamodells auch direkt an einer Fertigungsmaschine abrufen und zur Steuerung einsetzen. Exemplarisch wird dies im Rahmen des Exzellenzclusters »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer« der RWTH Aachen University am Beispiel einer Laserschneidmaschine durchgeführt. Neben Verfahren der mehrdimensionalen Funktionsapproximation kommen dabei zur Metamodellierung sowohl Methoden des »Design of Experiment« (DOE) als auch Verfahren der mehrdimensionalen Optimierung zur Anwendung.

Ergebnis

Eigene Tools zur Visualisierung von Response-Surfaces (MeMoViewer) sowie Plug-Ins für den bekannten Graphik-Standard VTK (Visualization Toolkit) wurden entwickelt. Algorithmen zur lokalen Invertierung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Parametern und Kriterien (sog. inverses Problem) sind implementiert und für die exemplarisch betrachteten Prozessmodelle abrufbar. Im Folgenden wird damit das im Exzellenzcluster erarbeitete Konzept der »Virtual Production Intelligence« (VPI) umgesetzt.

Anwendungsfelder

Anwendbar ist die genannte Vorgehensweise bei jeder Art der Modellierung/Modellbildung zur Analyse und Optimierung eines statischen oder dynamischen Systems. Sie stellt dem Anwender eine Prozesslandkarte zur Verfügung, mit deren Hilfe er in der Lage ist, im hochdimensionalen Parameterraum zu navigieren, um spezifische Points-of-Interest aufzusuchen, die ohne eine solche Hilfestellung schwerer aufzufinden wären.

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

Darstellung eines beispielhaften hochdimensionalen Prozessmodells:

1 In dreidimensionalen Schnitten des Parameterraums.

2 In zweidimensionalen Schnitten des Parameterraums.

TECHNOLOGIEFELD **MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK**

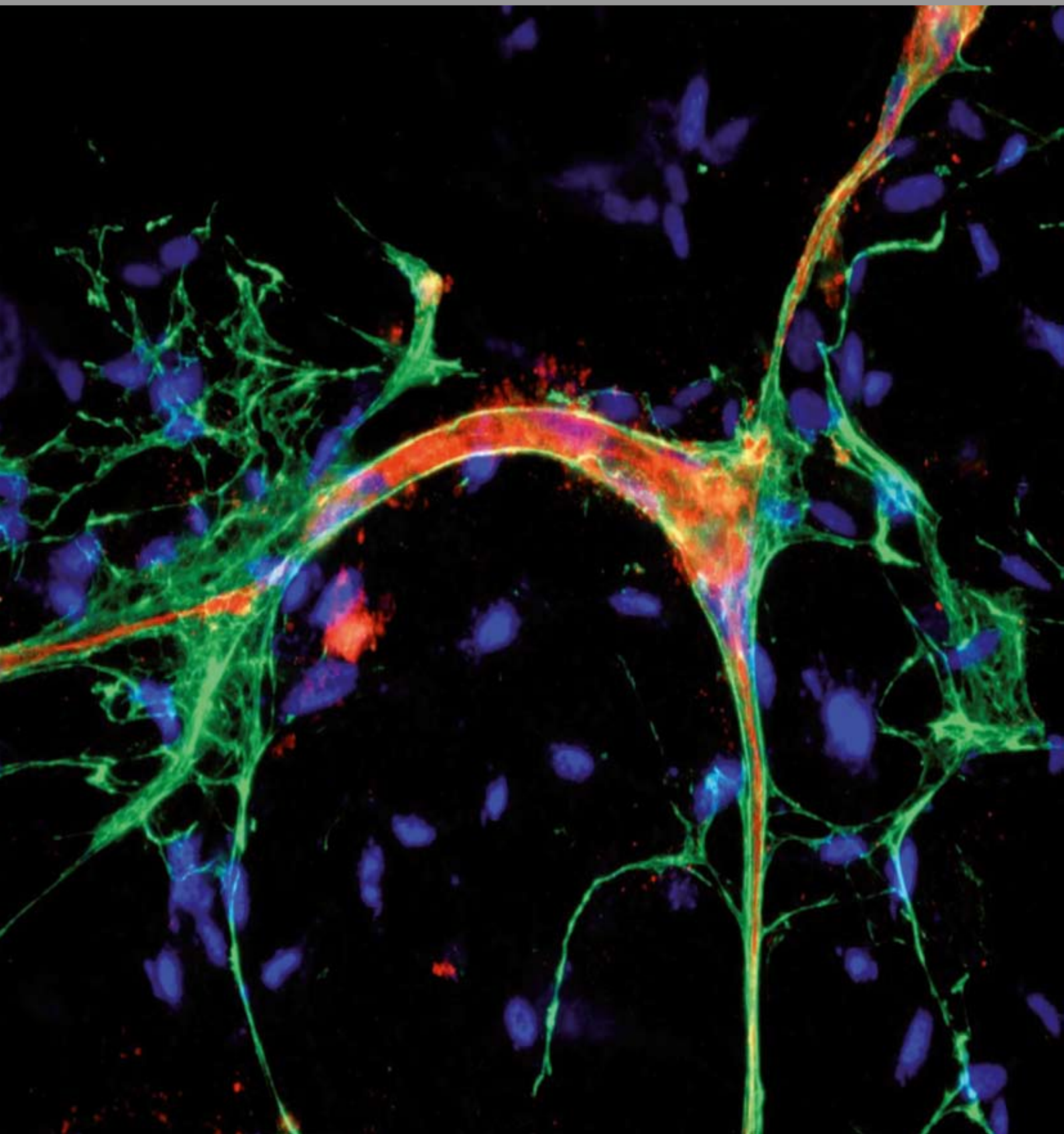
Gemeinsam mit Partnern aus den Life Sciences erschließt das Technologiefeld Medizintechnik und Biophotonik neue Einsatzgebiete des Lasers in Therapie und Diagnostik sowie in Mikroskopie und Analytik. Mit dem Selective Laser Melting Verfahren werden generativ patientenindividuelle Implantate auf der Basis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

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

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

FORSCHUNGSERGEBNISSE 2012

MEDIZINTECHNIK UND BIOPHOTONIK

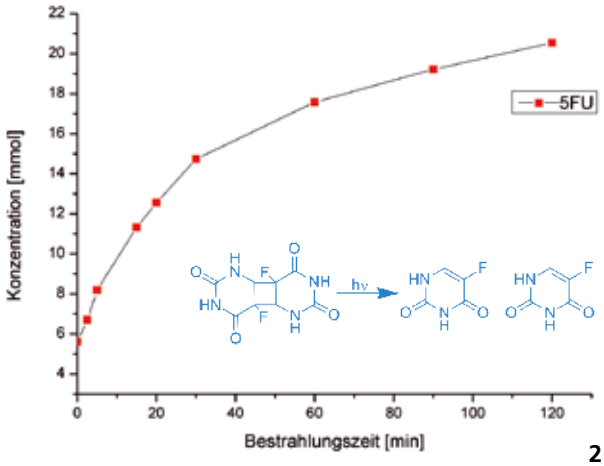


INHALT

Laserinduzierte Wirkstofffreisetzung zur Tumorreduktion	118
Modellierung der antimikrobiellen photodynamischen Therapie	119
Herstellung künstlicher Gewebe	120
Zellpositionierung und automatisiertes Zell-Imaging	121
Biochemische Analytik in Mikrotiterplatten	122

Aus vaskularen Strukturen isolierte Perizyten (Immunofluoreszenz), Quelle: Universität East Anglia.

1



2

LASERINDUZIERTE WIRKSTOFFFREISETZUNG ZUR TUMORREDUKTION

Aufgabenstellung

Die gezielte Freisetzung von Wirkstoffen aus Implantaten (Drug Delivery) ist Gegenstand intensiver Forschung. Die Entwicklung innovativer Medizinprodukte, ausgerüstet mit intelligenten Drug-Delivery-Systemen zur zeitlich und örtlich steuerbaren Wirkstoffabgabe, stellt einen komplett neuartigen Therapieansatz für viele Bereiche der Medizin dar. Mittels solcher Medizinprodukte wird eine dem Therapieverlauf angepasste Medikation möglich, die unerwünschte Nebenwirkungen für die Patienten minimiert.

Vorgehensweise

Zur Umsetzung dieses Ansatzes wurde im Rahmen eines innerhalb der Exzellenzinitiative der RWTH Aachen University geförderten Forschungsvorhabens ein Konzept entwickelt, mittels spezieller optisch adressierbarer Mikrogele das Medium Licht zur zeitlichen und örtlichen Steuerung der Wirkstofffreisetzung zu nutzen. Beispielhaft sollte die Machbarkeit dieses Konzepts und des neuen Therapieansatzes zur Tumorreduktion im Gastrointestinaltrakt aufgezeigt werden. Die Basis dieser lichtgesteuerten Medikamentierung bildet ein Scaffold aus Polymerfasern, welche mit wirkstoffbeladenen photoschaltbaren Mikrogelkapseln ausgerüstet sind. Die Freisetzung des Wirkstoffs 5-Fluorouracil (5FU) erfolgt selektiv durch Laserbestrahlung.

1+2 Photospaltungsreaktion zur Freisetzung des Wirkstoffs 5FU.

Ergebnis

Der Wirkstoff 5FU wurde durch [2+2] Cycloaddition dimerisiert und an ein Cyclodextrin-(CD-)Mikrogel gebunden. Dieses CD-Mikrogel wurde in Polymerfasern versponnen, sodass wirkstoffbeladene Fasern resultieren. Der Wirkstoff 5FU kann photochemisch bei Wellenlängen von 254 - 266 nm aus dem CD-Mikrogel freigesetzt werden, was durch Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC) der Photolyseprodukte nachgewiesen wurde. Das polymere Freisetzungssystem erwies sich in Cytotoxizitätstests als unbedenklich. Weitere Untersuchungen sollen die Wirksamkeit des freigesetzten Chemotherapeutikums auf ausgewählte Tumorzellen belegen.

Anwendungsfelder

In der Medizintechnik zeichnet sich ein Trend des Zusammenwirkens von Medizinprodukt und Pharmazie ab. Die fehlende steuerbare Wirkstoffabgabe ist ein Defizit etablierter Produkte. Neben der effektiven und schonenden Krebsbehandlung versprechen lokale Therapien in der Wundversorgung durch gezielte Abgabe von entzündungshemmenden Wirkstoffen sowie in der regenerativen Medizin durch gesteuerte Abgabe von Wachstumsfaktoren einen Mehrwert.

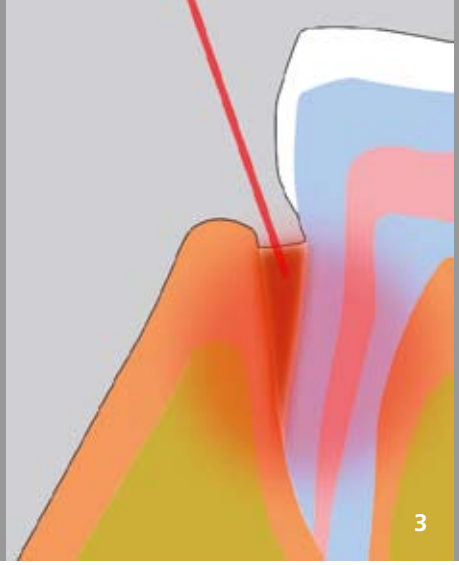
Ansprechpartner

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

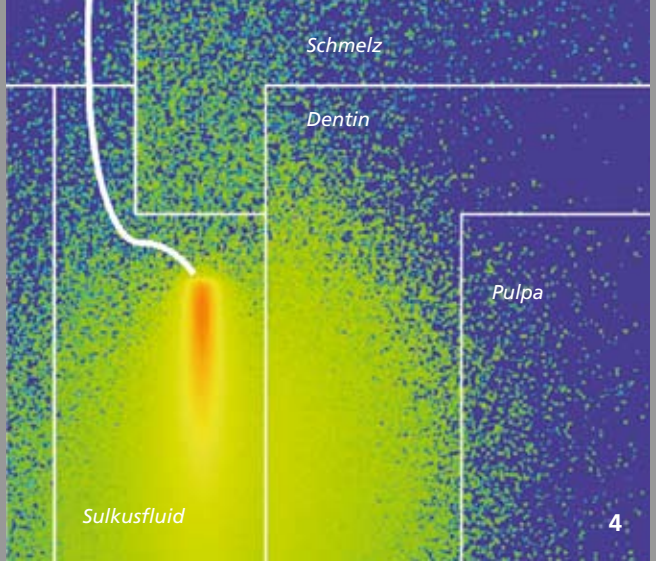
Dr. Arnold Gillner
Telefon +49 241 8906-148
arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de

Projektpartner

- *Funktionale und Interaktive Polymere, RWTH Aachen (FIP)*
- *Lehrstuhl für Textiltechnik, RWTH Aachen (ITA)*
- *Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Transplantationschirurgie, Universitätsklinikum der RWTH Aachen (UKA)*



3



4

MODELLIERUNG DER ANTIMIKROBIELLEN PHOTODYNAMISCHEN THERAPIE

Aufgabenstellung

Die antimikrobielle Photodynamische Therapie (aPDT) findet in leichten Fällen der Parodontitis und als Ergänzung zu den konventionellen mechanischen oder anti-infektiven Behandlungsformen Anwendung. Ihr Potenzial wird aufgrund fehlender Kenntnisse der physikalischen und chemischen Abläufe bei der aPDT derzeit nicht ausgeschöpft. Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung der empirischen klinischen Forschungsmethoden um eine mathematisch-physikalische Modellierung, die das Verständnis der aPDT verbessert.

Vorgehensweise

Eine Phänomenologie des Wirkprinzips der laserinduzierten aPDT wird in der Literatur angegeben: Durch einen photoaktiven Wirkstoff werden bei Bestrahlung mit kleiner Laserleistung im mW-Bereich die für die Progression der Erkrankung verantwortlichen Leitkeime infolge einer biochemischen Reaktion zerstört. Die Konzentrationen der an der aPDT beteiligten Stoffe werden in einem aus der Tumortherapie bekannten räumlich homogenen Modell in Ratengleichungen beschrieben. Aus der Lösung dieser Gleichungen wird der Therapieerfolg berechnet und in Abhängigkeit der Behandlungsparameter und Anfangskonzentrationen vorhergesagt. Dabei dient die lokale Intensität der Laserstrahlung im Zahnhalteapparat als Eingangsgröße für die Ratengleichungen und wird zuvor räumlich verteilt simuliert.

Ergebnis

Erste Ergebnisse ermöglichen Rückschlüsse auf die Konzentrationen der beteiligten Stoffe, die zu Beginn der Behandlung vorliegen müssen, damit die Therapie erfolgreich durchführbar ist. Weiterhin motiviert die Struktur der Ratengleichungen eine Trennung der Zeitskalen, auf denen die einzelnen Prozesse der Therapie ablaufen. Diese Trennung der Zeitskalen motiviert eine Vorgehensweise zur Steuerung und Beobachtung der ablaufenden Prozesse während der Therapie.

Anwendungsfelder

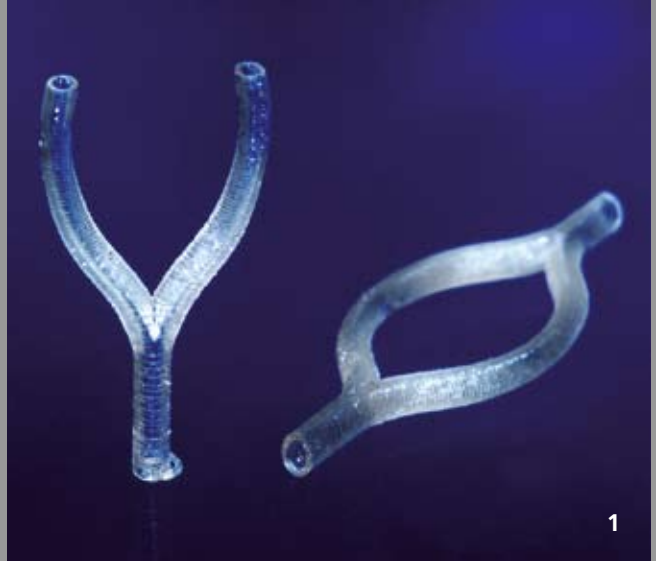
Mithilfe der dargestellten Untersuchungen wird das langfristige Ziel einer modellgestützten Therapie verfolgt. Neben der Parodontitisbehandlung bieten die Tumortherapie und Behandlungen in der Dermatologie attraktive Anwendungsmöglichkeiten.

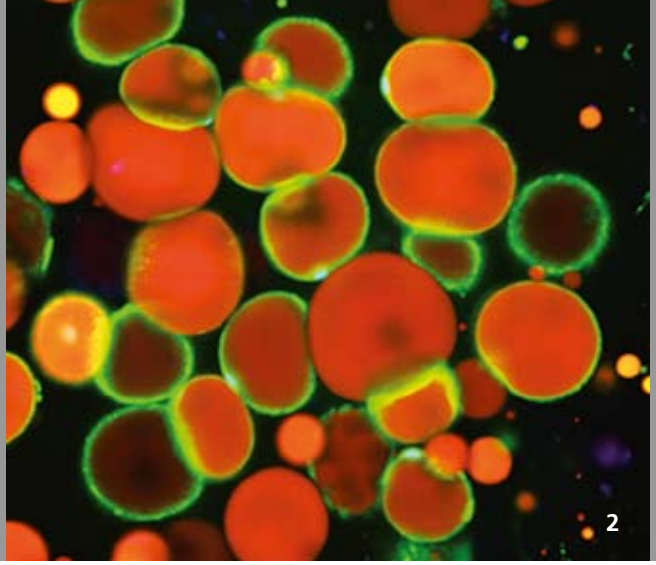
Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Lisa Bürgermeister
Telefon +49 241 8906-610
lisa.buergermeister@ilt.fraunhofer.de

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

3 Schematische Darstellung des Zahnhalteapparats.
4 Simulierte Intensitätsverteilung im Modell des Zahnhalteapparats.





HERSTELLUNG KÜNSTLICHER GEWEBE

Aufgabenstellung

Für die Herstellung von Weichgewebe im Labor als medizinischer Gewebeersatz oder als Testsystem für Pharmazeutika und Kosmetika müssen neben einem biologisch aktiven Stützgerüst, einer Biologisierung durch Zellen weitere wissenschaftliche und technologische Hürden genommen werden, um eine langzeitstabile und biologisch aktive Gewebestruktur zu erhalten. Ein wesentlicher Punkt hierbei ist eine Vaskularisierung des Zellkonstrukts, um eine ausreichende Nährstoffversorgung und einen Abtransport von Stoffwechselprodukten zu ermöglichen. Das multidisziplinäre Konsortium des EU-Projekts ArtiVasc 3D widmet sich der Entwicklung vaskularisierten Weichgewebes für die Entwicklung von künstlichem Gewebeersatz. Die künstliche Vaskularisierung erlaubt es, diese Weichgewebe dicker als wenige Millimeter zu machen und das umgebende Gewebe mit Nährstoffen zu versorgen.

Vorgehensweise

Für die Entwicklung eines solchen künstlichen Gewebes ist das Zusammenspiel verschiedener Komponenten essenziell. Deshalb arbeiten biologische Projektpartner daran, Adipozyten, Endothelzellen und Perizyten zu charakterisieren, um diese dann auf speziell entwickelten Biopolymeren zu kultivieren. Die Adipozyten werden auf elektrogesponnenen Fasern und in speziell entwickelten Hydrogelen kultiviert, um Fettgewebe nachzuahmen. Für die Vaskularisierung werden Endothelzellen und Perizyten auf mithilfe von Inkjetverfahren und laserbasierter Stereolithographie und Multiphotonenpolymerisation hergestellten verzweigten Gefäßen kultiviert.

1 Laserstrukturierte, verzweigte Gefäße aus elastischem Polymer, Innendurchmesser: 5 mm.

2 Primäre humane subkutane Adipozyten, gewachsen in Kollagen I Hydrogel (Quelle: Fraunhofer IGB).

Ergebnis

Derzeit ist es gelungen, die verschiedenen Zellkulturen zu etablieren. Adipozyten konnten auf Vliesen und in Hydrogelen kultiviert werden. Für die Herstellung eines komplexen Vaskularisierungsnetzwerks aus Versorgungsgefäßen und Kapillaren konnten mit laserbasierten Polymerisierungsverfahren verzweigte elastische Gefäße hergestellt werden, an denen in Zukunft Zellversuche durchgeführt werden können.

Anwendungsfelder

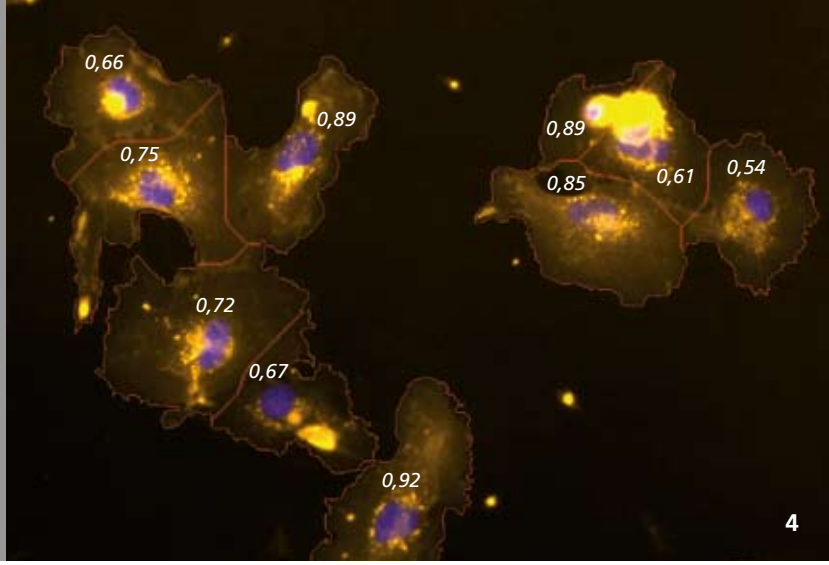
Das hier entwickelte angestrebte künstliche Gewebe kann im Rahmen der Pharmaforschung dazu beitragen, den Einsatz von Tierversuchen zu reduzieren. In später geplanten Umsetzungen ist die Anwendung der entwickelten Verfahren für die Herstellung von medizinischem Gewebeersatz sowie für künstliche Blutgefäße vorgesehen.

Ansprechpartner

Dipl.-Biol. Nadine Seiler
Telefon +49 241 8906-605
Nadine.Seiler@ilt.fraunhofer.de

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

3



4

ZELLPOSITIONIERUNG UND AUTOMATISIERTES ZELL-IMAGING

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. Daher verfolgt ein Kooperationsprojekt zwischen Max-Planck und Fraunhofer das Ziel, die für die Differenzierung von hämatopoetischen (blutbildenden) Stammzellen notwendigen Voraussetzungen anhand von mehrschichtigen, dreidimensionalen Stammzell-Systemen zu erforschen. Die hämatopoetische Stammzelle sitzt in einer hoch definierten Umgebung im Knochenmark. Um diese Umgebung nachzubauen, wird eine Technologie benötigt, mit welcher derartige zelluläre Strukturen hochpräzise in vitro nachgebaut werden können. Neben der genauen Zellpositionierung stellt die automatisierte Auswertung der Zellverbände eine Hauptaufgabe für das Fraunhofer ILT dar.

Vorgehensweise

Laser Induced Forward Transfer (LIFT) ist eine vielseitige Technologie. Es werden gezielt Zellen von einem Transferträger auf einen Empfängerträger übertragen. Die so aufgebauten Zellsysteme sollen auf der Basis hochauflösender Mikroskopie-aufnahmen durch geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen automatisiert analysiert werden. Dabei werden sowohl Fluores-zenzaufnahmen wie auch Hellfeldaufnahmen verwendet.

Ergebnis

Am Fraunhofer ILT wurde eine LIFT-Anlage entwickelt, mit der es möglich ist, die zu übertragenden Zellen kamerabasiert auszusuchen und diese Zellen auf ein Substrat zu übertragen. Diese Zellen können in eine 3D-Matrix übertragen werden und ein zellbasiertes Testsystem kann aufgebaut werden. Erste Tests zeigten, dass HEK-293-Zellen den LIFT-Transfer gut vertragen. Erste Ansätze zur Zellsegmentierung auf Basis von Hellfeldaufnahmen lieferten gute Ergebnisse zur Detektion der Zellaußenkontur. Eine Herausforderung stellt jedoch die Abgrenzung benachbarter Zellen dar. Erst mithilfe der fluoreszenzgefärbten Zellkerne lässt sich die Zellsegmentierung vervollständigen.

Anwendungsfelder

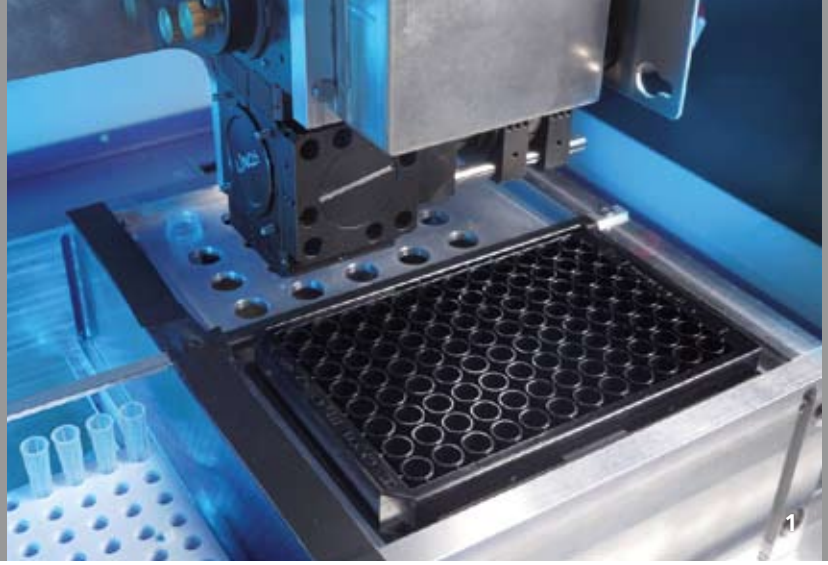
Mit der Kombination aus hochpräziser Zellpositionierung in 3D-Matrizen und automatisierter Bildanalytik können mit dem neuen System komplizierte Zellsysteme aufgebaut und analysiert werden. Dadurch lassen sich in vitro Testsysteme aufbauen, die beispielsweise zum Testen und zur Entwicklung von Leukämiemedikamenten eingesetzt werden können.

Ansprechpartner

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

Dipl.-Biol. Dominik Riester
Telefon +49 241 8906-529
Dominik.Riester@ilt.fraunhofer.de

3 Handlingsystem der LIFT-Anlage.
4 Erkennung der Zellaußenkontur (Quelle: Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin, Münster).



BIOCHEMISCHE ANALYTIK IN MIKROTITERPLATTEN

Aufgabenstellung

Verschiedenste Analyte können hochspezifisch auf der Basis von antikörperbasierten biochemischen Assays nachgewiesen und quantifiziert werden, wie z. B. Hormone, Toxine, pharmakologische Wirkstoffe etc. Für eine automatisierte Assay-Analytik in Mikrotiterplatten müssen kleinste Flüssigkeitsmengen appliziert und miteinander vermischt werden. Anschließend erfolgt – je nach Assay – eine optische Auslesung, beispielsweise in Form einer Fluoreszenzmessung. Der gründlichen Vermischung der Flüssigkeiten kommt eine wichtige Rolle zu, da Inhomogenitäten zu falschen Messergebnissen führen können.

Vorgehensweise

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Demonstrators für die quantitative und hochempfindliche Assay-Analytik in Mikrotiterplatten. Mit dem System sollen automatisiert Flüssigkeiten pipettiert, homogenisiert und optisch vermessen werden. Die Homogenisierung erfolgt mithilfe eines Piezo-Ultraschallwandlers, der die Mikrotiterplatte in Schwingung und die in den Töpfchen befindlichen Flüssigkeiten in Bewegung versetzt. Inhomogenitäten sowie Ausbleicheffekte während der optischen Messung können so vermieden werden.

Ergebnis

Am Fraunhofer ILT wurde gemeinsam mit Verbundpartnern aus Industrie und Wissenschaft ein Demonstrator für eine automatisierte Multitoxinanalytik aufgebaut. Sowohl die Pipettierung der Assay-Komponenten mit einer elektronischen Pipette als auch die optische Messung der Fluoreszenzpolarisation erfolgen automatisch. Die in einer Mikrotiterplatte zusammengefügten Assay-Komponenten – Probenextrakt, Fluoreszenzfarbstoff und Antikörper – werden durch Ultraschall vermischt und homogenisiert.

Anwendungsfelder

Vorrangiges Einsatzgebiet ist die Lebensmittelanalytik, insbesondere die Mykotoxinanalytik für Getreideprodukte. Prinzipiell lässt sich mit dem entwickelten Demonstrator jeder Analyt, gegen den ein spezifisch bindender Antikörper verfügbar ist, nachweisen.

Ansprechpartner

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

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

1 Optik und Mikrotiterplatte für die Assay-Analytik.

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.

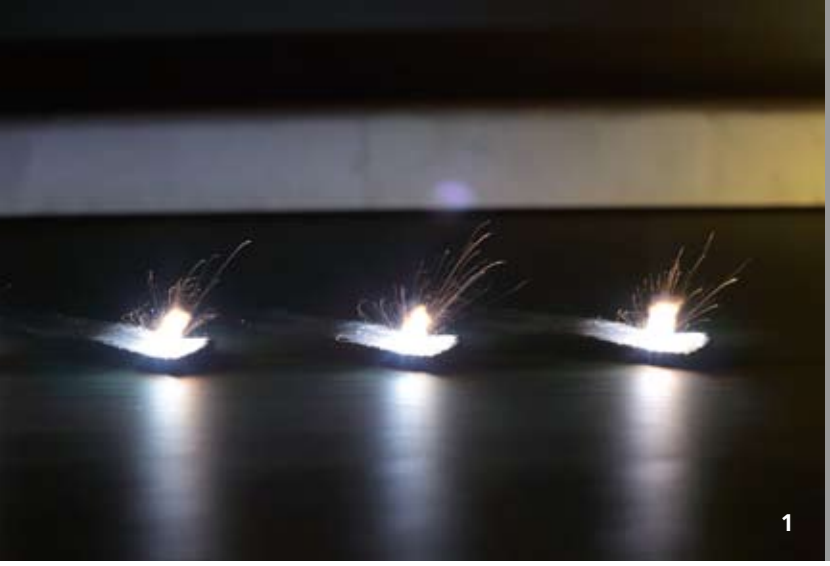
In der EUV-Technik entwickeln die Experten Strahlquellen für die Lithographie, die Mikroskopie, die Nanostrukturierung oder die Röntgenmikroskopie. Auch optische Systeme für Applikationen der EUV-Technik werden berechnet, konstruiert und gefertigt.

LASERMESSTECHNIK UND EUV-TECHNOLOGIE

INHALT

Aluminiumlegierungen mit Laseranalyse sortieren	126
Schnelle Isotopenanalyse von Wischproben	127
Breitband-Nahfeldmikroskopie zur Materialcharakterisierung	128
Nanostrukturierung mit EUV-Laborbelichtungssystem (EUV-LET)	129

Laser-Direktanalyse metallischer Stoffströme im Hochdurchsatz.



ALUMINIUMLEGIERUNGEN MIT LASERANALYSE SORTIEREN

Aufgabenstellung

Die Herstellung von Aluminium aus Primärrohstoffen ist um ein Vielfaches energieintensiver als das Einschmelzen von Altmetall, sodass die Rückgewinnung sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gründen vielversprechend ist. Aluminium wird in einer Vielzahl von Legierungen eingesetzt. Wird eine undefinierte Mischung dieser Legierungen eingeschmolzen, ist anschließend zumeist eine starke »Verdünnung« mit reinem Primäraluminium erforderlich, um die Spezifikationen zur Herstellung eines bestimmten Werkstoffs erreichen zu können. Um hingegen niedrig legiertes Aluminium direkt aus Sekundärrohstoffen gewinnen zu können, ist eine effiziente Sortierung des Materials erforderlich.

Vorgehensweise

In Zusammenarbeit mit Tomra Sorting Solutions wurde ein transportabler Demonstrator entwickelt, der die gesamte Prozesskette von der Aufgabe der zu recycelnden Schrottstücke bis zur Ausschleusung beinhaltet, siehe Bild 1. Die einzelnen Schrottstücke werden auf einem Förderband mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s transportiert. Eine 3D-Objekterkennung bestimmt die Positionen der Stücke auf dem Band. Ein gepulster Laserstrahl wird auf die Teile fokussiert, verdampft eine kleine Materialmenge und überführt diese in den Plasmazustand. Das vom Plasma emittierte Licht wird über einen Lichtwellenleiter zu einem Spektrometer geführt, siehe Bild 2. Die Laser-Emissionsspektrometrie (engl. LIBS) klassifiziert die Schrottstücke in Echtzeit in bis zu vier Fraktionen. Je nach Größe der einzelnen Stücke beträgt der Durchsatz bis zu 4 t/h.

Ergebnis

Bei Produktionsschrotten ist eine quantitative Laseranalyse jedes einzelnen Stücks möglich. Testchargen mit Produktionsproben aus acht handelsüblichen Al-Knetlegierungen werden mit hoher Richtigkeit identifiziert. Für die Verarbeitung eines gemischten Probensatzes wurde die Gewinnung von hochwertigen 3xxx und 6xxx kompatiblen Fraktionen aus einem gemischten Probensatz von ca. 200 Stücken Schredderschrott unterschiedlicher Al-Knetlegierungen untersucht.

Anwendungsfelder

Die Laseranalyse zur Sortierung klassifiziert unterschiedliche Metalle mit einer Multi-Elementanalyse. Dabei können sowohl verschiedene Metalle wie Stahl, Messing, Zink und Titan getrennt als auch eine feine Differenzierung einzelner Legierungen erreicht werden.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Patrick Werheit
Telefon +49 241 8906-308
patrick.werheit@ilt.fraunhofer.de

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

1 Langzeitbelichtung über 3 Messungen.

2 PARILAS-Demonstrator.

SCHNELLE ISOTOPEN-ANALYSE VON WISCHPROBEN

Aufgabenstellung

Für die Überprüfung und Überwachung kerntechnischer Anlagen führen internationale Organisationen routinemäßige Kontrollen durch. Bei einem häufig angewendeten Verfahren werden in den Anlagen Wischproben genommen, um die gesammelten Partikel im Labor zu analysieren. Kleinste Materialmengen darin können den Inspektoren wichtige Hinweise auf die angewandten Verfahrensprozesse liefern. Um die Proben effizient analysieren zu können, wird ein schnelles Prüfverfahren für eine vorgeschaltete Klassifizierung des gesammelten Probenmaterials benötigt.

Vorgehensweise

Im Rahmen einer Studie für das deutsche Unterstützungsprogramm für die Internationale Atomernergiebehörde IAEA entwickelt das Fraunhofer ILT ein Messverfahren für eine isotopensensitive Prüfung von geringen Materialmengen auf Wischproben. Das Verfahren verwendet die scannende Mikroanalyse mit Laser-Emissionsspektrometrie. Ein Laserstrahl wird über die Wischprobe geführt und analysiert ortsaufgelöst das darauf befindliche Material. Die induzierte Emission wird mit hoher Auflösung spektroskopisch untersucht und ermöglicht damit den empfindlichen Nachweis und gleichzeitig eine Isotopentrennung geringster Spuren von Uran.

Ergebnis

Das entwickelte Verfahren eröffnet die Möglichkeit, innerhalb kurzer Bearbeitungszeit die Materialverteilung auf einer Wischprobe ohne deren Präparation zu analysieren. Spuren von wenigen Mikrogramm je Quadratzentimeter sind ausreichend, um den Anreicherungsgrad von Uranpartikeln zu bestimmen.

Anwendungsfelder

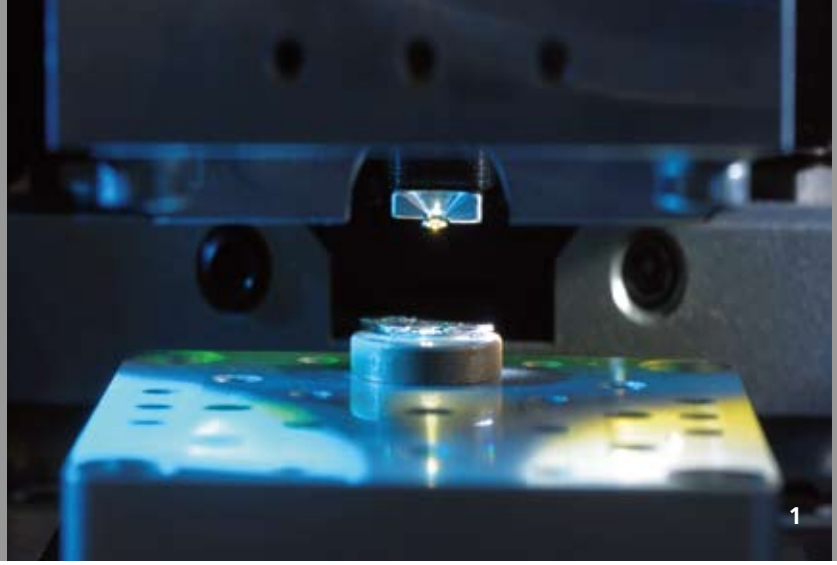
Die Schnelligkeit des Laserverfahrens erlaubt es, sich anschließende weitere Analysemethoden effizienter einzusetzen und dadurch bei auffälligen Überprüfungsergebnissen in kürzerer Zeit zu reagieren. Das Verfahren ist so konzipiert, dass bei einem minimalen Aufwand für die Probenhandhabung eine Querkontamination zwischen einzelnen Proben ausgeschlossen wird und flexibel auf die unterschiedliche Beschaffenheit der Proben reagiert werden kann.

Ansprechpartner

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

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

3 Gewinnung einer Wischprobe in einer Industrieanlage (Quelle: IAEA).



BREITBAND-NAHFELD-MIKROSKOPIE ZUR MATERIAL-CHARAKTERISIERUNG

Aufgabenstellung

Das Halbleitermaterial Galliumnitrid wird im Bereich der Hochleistungs- und Hochfrequenzelektronik verwendet. Die Eigenschaften der Bauelemente hängen dabei von der Verspannung der Kristallstruktur ab. Wünschenswert ist die Charakterisierung dieser Verspannungen mit einer Ortsauflösung unterhalb der optischen Beugungsgrenze.

Vorgehensweise

Mit einem Nahfeldmikroskop (SNOM) können Infrarot-Spektren mit einer Ortsauflösung von wenigen 10 nm aufgenommen werden. Neben der Unterscheidung einzelner Materialien können auch Kristalleigenschaften wie Polytype und Verspannungen zerstörungsfrei untersucht werden. Für das Streulicht-Nahfeldmikroskop wird ein am Fraunhofer ILT entwickeltes, breitbandig abstimmbares Lasersystem verwendet. Von einer Probe können sowohl Übersichtsbilder bei einer festen Zentralwellenlänge aufgenommen werden als auch Spektren an einzelnen Messpunkten. Der Abstimmbereich des Breitbandlasers wurde auf etwa 8,9 µm bis 14,5 µm erweitert. Dieser große Spektralbereich ermöglicht die Charakterisierung unterschiedlicher Materialien, wie z. B. Siliziumkarbid und Galliumnitrid.

Ergebnis

Mit dem Breitband-Nahfeldmikroskop wurden erste Messungen an Galliumnitrid durchgeführt. Geplant ist die Untersuchung von verspannten Galliumnitridproben.

Anwendungsfelder

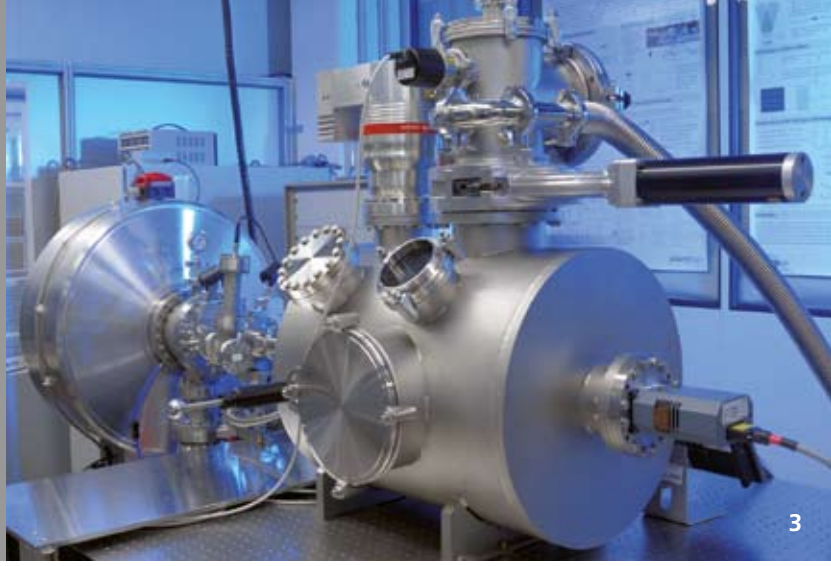
Die Nahfeldmikroskopie hat vielfältige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Charakterisierung von opto-elektronischen Bauelementen, z. B. LEDs, Transistoren aus Galliumnitrid und Siliziumkarbid sowie Nanokompositmaterialien, z. B. Textilfasern, und nanoskopischen Einschlüssen. Am Fraunhofer ILT wird ein SNOM-Applikationslabor aufgebaut, in dem diese Fragestellungen untersucht werden sollen.

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 Blick in das Nahfeldmikroskop mit der Halterung der beleuchteten Spitze und der darunter liegenden Probe.



NANOSTRUKTURIERUNG MIT EUV-LABORBELICHTUNGS-SYSTEM (EUV-LET)

Aufgabenstellung

Für viele industrielle Anwendungen der Nanotechnologie wird eine Herstellungsmethode benötigt, die es ermöglicht, nanoskalige, periodische Strukturen über große Flächen mit geringem Zeit- und Kostenaufwand zu realisieren. Die Entwicklung kurzwelliger Strahlungsquellen eröffnet neue Lösungsansätze in diesem Bereich.

Vorgehensweise

Unter Verwendung von gasentladungsbasierten Strahlungsquellen für extrem ultraviolette Strahlung (EUV, λ = 5 nm - 15 nm) werden eigens entwickelte Transmissionsmasken, die ihrerseits mit entsprechenden periodischen Strukturen versehen sind, belichtet. Hinter der Transmissionsmaske entstehen in definierten Abständen Selbstbilder der Transmissionsmaske. Diese werden dann in einem fotosensitiven Medium aufgenommen und nach einer Entwicklungsprozedur sichtbar gemacht, vergleichbar zur traditionellen Fotografie. Aufgrund der einzigartigen Strahlungscharakteristik der EUV-Quelle ist es sowohl möglich, die Maskenstrukturen zu reproduzieren als auch diese um einen Faktor 2 zu verkleinern.

Ergebnis

Am Fraunhofer ILT wurde auf Grundlage vorhergehender Untersuchungen eine EUV-Belichtungsanlage für Probengrößen bis 100 mm Durchmesser realisiert (EUV-LET – Laboratory Exposure Tool). Mithilfe von hochpräzisen Positionierungs- und Ausrichtungssystemen ist es möglich, den Abstand zwischen Maske und zu strukturierender Probe mit 10 nm Präzision zu kontrollieren. Innerhalb einer Belichtungszeit von ca. 1 Minute können periodische Nanostrukturen über Felder bis zu 4 mm² auf der zu belichtenden Probe erzeugt werden. Die nachgewiesene Auflösung des EUV-LET erreicht 10 nm. Die ersten Ergebnisse bestätigen das Potenzial des EUV-LET bezüglich der Auflösung, Flexibilität und industriellen Umsetzung.

Anwendungsfelder

Für diverse Forschungseinrichtungen aus dem Bereich der Nanotechnologie bietet das EUV-LET die Möglichkeit, großflächig periodische Strukturen zu erzeugen. Mithilfe einer solchen Nanostrukturierungsanlage kann ebenfalls der wachsende Markt der Nanostrukturierung effektiv bedient werden, was besonders für kleine und mittlere Unternehmen relevant ist.

Ansprechpartner

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

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

2 Belichtungsstation EUV-LET.
3 Reinraum-Prozessierungsbank.

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