

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2016**



COVER *Schwerelos schwebt eine Metamaterialprobe in einer Flüssigkeit. Hundertmal dünner als ein menschliches Haar wird ihr Glanz einzig durch unsichtbare Nanostrukturen erschaffen. Experten des Fraunhofer IOF und des Instituts für Angewandte Physik (IAP) zeigen mit dieser Probe, dass Metamaterialien auch in komplexen Geometrien anwendbar sind; sie heben damit die Nanophotonik in die dritte Dimension – weitere Informationen auf Seite 40. | Weightlessly, a sample of metamaterial is floating in a liquid. One hundred times thinner than a human hair, its brilliance is created entirely by invisible nanostructures. By means of this sample, experts of the Fraunhofer IOF and the Institute of Applied Physics (IAP) showed that metamaterials are also applicable to complex geometries, taking nanophotonics to a new level – the third dimension. Additional information on page 40.*

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2016**

VORWORT

PREFACE

Ein spannendes, turbulentes und erfolgreiches Jahr 2016 liegt hinter uns. Die Photonikbranche entwickelt sich nach wie vor ausgesprochen positiv – insbesondere die Bereiche Automotive und Consumer Electronics stellen entscheidende Zukunftsfelder mit hervorragenden Wachstumschancen dar. Dank der Innovationskraft unserer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler lässt sich festhalten, dass das Fraunhofer IOF federführend Projekte und gemeinsame Strategieprozesse der Branche gestaltet und in erheblichem Maße mitbestimmt.

Obwohl sich das Fraunhofer IOF nach fast einem Vierteljahrhundert zu den »Veteranen« der Fraunhofer-Gesellschaft zählen kann, hat es in keiner Art und Weise an Dynamik, Kreativität und Leistungsfähigkeit eingebüßt. Es reflektiert damit nicht nur die optimistische Stimmung der Photonikbranche, sondern trägt bedeutend dazu bei, dass die Vision der »Photonik als Schlüsseltechnologie« immer realer wird. Ich bin deshalb besonders erfreut, Ihnen einige der hervorragenden Beiträge, welche unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zur Erforschung des Lichts und seinen Anwendungen leisten konnten, vorstellen zu dürfen. Mit ihrer Arbeit haben sie im vergangenen Jahr eindrucksvoll unterstrichen, dass der Standort Jena zu den maßgeblichen Akteuren der deutschen Optikszenen gehört. Als Institutsleiter bin ich stolz darauf, Tag für Tag mit solch herausragenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zusammenarbeiten zu dürfen. An dieser Stelle möchte ich deshalb die Gelegenheit nutzen, um jeder und jedem von Ihnen meinen persönlichen Dank auszusprechen.

Die besagte Innovationskraft wird in der gesamten Fraunhofer-Gesellschaft wahrgenommen: So erhielten Dr. Peter Dannberg, Dr. Peter Schreiber und Marcel Sieler im vergangenen Jahr den Joseph-von-Fraunhofer-Preis für ihren LED-Arrayprojektor, der nach dem Vorbild von Insektenaugen aufgebaut ist und bereits als Lichtteppich in Automobilen der

An exciting, turbulent and successful 2016 is now behind us. The photonics sector has developed very positively - in particular the Automotive and Customer Electronics areas represent crucial future fields with excellent potential for growth. Thanks to the innovation of our scientists, it can be stated that Fraunhofer IOF is shaping leading projects and shared strategy processes in the industry and participating to a significant degree.

Although Fraunhofer IOF can be counted as a 'veteran' of the Fraunhofer Society after nearly a quarter of a century, it has in no way forfeited vibrancy, dynamism, creativity, or performance. This not only reflects the optimistic mood of the photonics industry, but also contributes significantly to making the vision of 'photonics as a key technology' increasingly real.

I am therefore particularly pleased to present you some of the excellent contributions that our scientists made on exploration of light and its applications. With creativity and great skill, they have highlighted that Jena is among the key players in the German optics scene. As the Institute director, I am proud to be able to work with such outstanding employees on a daily basis. At this point, I would like to take the opportunity to thank each and every one of you.

The previously mentioned is perceived throughout the entire Fraunhofer Society: Dr. Peter Dannberg, Dr. Peter Schreiber, and Marcel Sieler received the Joseph-von-Fraunhofer-Prize last year for their LED Array Projector, which was built according to the model of insect eyes and is already being produced as a light carpet in premium class cars. Such innovations are only possible with a particular degree of scientific and technological excellence and with excellent cooperation with partners from the industry. I offer my congratulations for this breakthrough and am confident that the array projectors will soon become part of our everyday life.



Premiumklasse verbaut wird. Solche Innovationen sind nur durch ein besonderes Maß an wissenschaftlicher und technologischer Exzellenz und eine hervorragende Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie möglich. Ich gratuliere zu diesem Durchbruch und bin voller Zuversicht, dass die Arrayprojektoren schon bald Teil unseres Alltags werden.

Weniger alltäglich aber mindestens ebenso beeindruckend sind Bilder und Messwerte, die uns im letzten Jahr von den Weltraummissionen GAIA und den Satelliten des Sentinel-Programms erreicht haben. Wissenschaftlerteams rund um Dr. Ramona Eberhardt, Dr. Ernst-Bernhard Kley und Dr. Uwe Detlef Zeitner machten den Erfolg dieser Missionen durch Innovationen in der Freiformtechnik, Systemintegration und Nanostrukturierung erst möglich. Der geschärfte Blick ins Weltall wird beispielsweise durch ein in Jena hergestelltes optisches Gitter möglich, dessen Prinzip mit klassischen Konzepten der Mikrooptik radikal bricht und deren Leistungsfähigkeit massiv steigert.

Damit solch exzellente Forschung und Entwicklung auch langfristig möglich bleibt, wurden im Jahr 2016 eine Reihe von Großprojekten neu angestoßen und wesentlich vorangebracht. Auf dem Gelände des Fraunhofer IOF entstand mit dem Fasertechnologiezentrum Jena einer der leistungsfähigsten Faserziehtürme der Welt. Er wird die Entwicklung moderner Faserlaserkonzepte weiter beschleunigen. Mit dem Verbundforschungsprojekt THEFA und dem Fraunhofer-Max-Planck-Kooperationsprojekt »PowerQuant« konnten zudem zwei Großprojekte zu den Themen Faser- und Quantentechnologie akquiriert werden. Die Kollaboration verdeutlicht, dass unser Institut im Stande ist, wertvolle Beiträge sowohl für Industriepartner als auch zur Grundlagenforschung beizutragen.

Es ist mir eine besondere Freude zu sehen, dass die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen ihr Interesse nicht nur auf ihre exzellente Forschung richten, sondern ihr Wissen auch

Less commonplace but at least as impressive are images and measurement values we have achieved in the last year in the GAIA space mission and the Sentinel Program satellites. Researchers around Dr. Ramona Eberhardt, Dr. Ernst-Bernhard Kley, and Dr. Uwe Detlef Zeitner made the success of these missions possible through innovations in freeform technology, system integration, and nano structuring. The sharpened view into space is possible thanks to optical grids produced in Jena, the principle of which radically breaks with classic concepts of micro optics and massively increases their performance.

So that such excellent research and development remains possible in the long term, a number of large projects were initiated and considerably advanced in 2016. On Fraunhofer IOF's site, one of the world's most efficient Fiber drawing towers was created with the Fiber Technology Centre Jena. It will further speed up the development of modern fiber laser concepts. With the joint research project THEFA and PowerQuant, a joint project between Fraunhofer-Gesellschaft and Max-Planck-Gesellschaft, two large projects on the topics of fiber and quantum technology could be acquired. The collaboration illustrates that our institute is capable of making valuable contributions for industry partners as well as for basic research.

It is particularly pleasing for me to see that the effort of the employees does not only result in their excellence in research. Their enthusiasm for further education and training has contributed to Jena gaining a global reputation for supporting young and aspiring scientists. This can be seen in the establishment of international and interdisciplinary trainee programs, for example the international graduate program 'Guided Light, Tightly Packed', which investigates new wave guide optics in cooperation with four Canadian research institutes. A further example is the interdisciplinary graduate research college '3D Technologies in human-machine interaction', in which doctoral and post

LÖSUNGEN MIT LICHT SOLUTIONS WITH LIGHT



an Andere weitergeben. Ihre Begeisterung für nachhaltige Lehre und Ausbildung hat dazu beigetragen, dass der Standort Jena einen Weltruf in der Förderung junger und angehender Wissenschaftler errungen hat. Dieses zeigt sich in der Einrichtung internationaler und interdisziplinärer Nachwuchsprogramme, zum Beispiel der internationalen Graduiertenschule »Guided Light, Tightly Packed«, welche in Zusammenarbeit mit vier kanadischen Forschungseinrichtungen neue Wellenleiteroptiken untersucht. Ein weiteres Beispiel ist das interdisziplinäre Graduiertenforschungskolleg »3D-Technologien in der Mensch-Maschine-Interaktion«, in welchem Doktoranden und Postdocs 3D-Technologien und deren Anwendungen erforschen.

Dass das Fraunhofer IOF und der Optikstandort Jena längst einen festen Platz in der »Champions League« der angewandten Photonikforschung haben, zeigt sich auch daran, dass es als erstes Institut der Fraunhofer-Gesellschaft überhaupt an einer Ausschreibung für Forschungsinfrastrukturen des Bundes teilnimmt. Der eingereichte Vorschlag »National Photonics Labs« (NPL) konnte sich bereits gegen konkurrierende Anträge aller großer deutscher Forschungsgesellschaften behaupten und unterstreicht die Position unseres Instituts als Vorreiter auf dem Gebiet der modernen Optik.

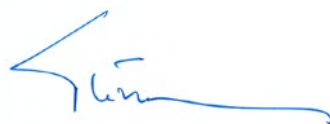
Das Jahr 2017 verspricht ebenso spannend und turbulent zu werden. Dieses Jahr steht zudem ein ganz besonderes Ereignis ins Haus: das Fraunhofer IOF feiert sein 25-jähriges Bestehen. Zeit, um Vergangenes Revue passieren zu lassen und an bisherige Erfolge anzuknüpfen. Lassen Sie mich in diesem Zusammenhang die Gelegenheit ergreifen, meinen Dank an alle Partnerinstitute, Forschungsförderer, Stiftungen, Konzerne und Firmen auszusprechen, die im vergangenen Jahr wieder auf die Innovationsfähigkeit des Fraunhofer IOF gesetzt haben. Ich freue mich darauf, weiterhin mit Ihnen Neues zu entdecken und gemeinsam kleine und große Erfolge zu feiern. Ohne Ihr Engagement wäre Photonik auf Weltniveau nicht denkbar.

doctoral candidates research 3D technologies and their applications.

The Fraunhofer IOF and Jena have been holding a fixed place in the 'Champions League' of applied photonics research for many years. This is underlined by being the first institute of the Fraunhofer-Gesellschaft which participated in the call for National Research Infrastructures. The submitted proposal, 'National Photonics Labs' (NPL), was already able to compete against proposals from all large German research institutions and highlights the position of our Institute as a pioneer in the area of modern optics.

The year 2017 promises to be as exciting and turbulent. This year there will also be a particularly special event: Fraunhofer IOF celebrates its 25th anniversary. It is time to look back on the past and build on previous successes. I'm looking forward to making new discoveries with you and celebrating small and big successes.

Let me take the opportunity to express my thanks to all partner institutes, research sponsors, foundations, and companies who have again supported Fraunhofer IOF's capability for innovation in the past year. Without your engagement, world class photonics would be inconceivable.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Direktor des Fraunhofer IOF | Director of the Fraunhofer IOF

LEFT Graduiertenforschungskolleg »3D-Technologien in der Mensch-Maschine-Interaktion«. | Interdisciplinary graduate research college '3D Technologies in human-machine interaction'.

INHALT

Das Institut im Profil	8
Ausgewählte Ergebnisse 2016	34
Optische Komponenten und Systeme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	36
RGB-Projektor mit vier Freiformen auf einem Substrat	38
Volumen-Metamaterialien	40
Tiefe mikrooptische Strukturen mit LED-basierter Grautonlithographie	42
Dynamischer Fokusspiegel für die Lasermaterialbearbeitung	44
Optische Komponenten für den EnMAP Hyperspektral-Imager	46
Integrierte nichtlineare Optik in Lithiumniobat Dünnschichten	48
Mask Aligner Lithografie mit Laserbeleuchtung	50
Mikrooptische Teleskoparrays für LED-Lichtquellen	52
GRISM-Herstellung für Spektroskopie im Weltraum	54
Drahtgitterpolarisatoren für den fernen ultravioletten Spektralbereich	56
Feinmechanische Komponenten und Systeme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	58
Neuartiges Drahtablenksystem für die Elektronenstrahl-Lithographie	60
Referenzkörper für die on-board Kalibrierung der MTG imager optics	62
Freiformspiegelmodule zur vereinfachten Systemintegration	64
Funktionale Oberflächen und Schichten – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	66
Organisch-anorganische Funktionsschichten durch Ko-Verdampfung (OrKo)	68
Benetzungsanalyse oleophober Glasoberflächen unter Wasser	70
Strukturtreue nanoporöse SiO ₂ -Schichten mit maßgeschneiderter Brechzahl	72
Erste Schritte einer neuen Generation der EUV-Lithographie	74
Photonische Sensoren und Messsysteme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	76
Körpervermessung in Bewegung: High-Speed-3D-Detektion	78
3D-Lippenableser – 3D-Gesichtserfassung für die Spracherkennung	80
Multiaperturkamera für videobasierte Präsenzerkennung	82
Mikro-Computertomographie zur Analyse biologischer Präparate	84
Roboter-gestützte Streulichtsensorik zur Oberflächenanalyse	86
In-line holografische Messung zur Charakterisierung optischer Fasern	88
Femtosekunden-CARS für die Gasspektroskopie	90
XUV Nanoskopie im Labormaßstab	92
Lasertechnik – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	94
Leistungsstarke Faserlaser bei 1 µm und 2 µm	96
Bekämpfung von Modeninstabilitäten in Hochleistungsfaserlasern	98
Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces und die Fraunhofer-Gesellschaft	100
Namen, Daten, Ereignisse	106

CONTENT

Profile of the institute	8
Selected results 2016	34
Optical components and systems – Scientific results from the business field	36
RGB Projector with four freeforms on a single substrate	38
Voluminous Metamaterial	40
Deep micro-optical elements by LED-based grayscale lithography	42
Dynamic focus-shifting mirror for laser processing	44
Optical components for the EnMap hyperspectral imager	46
Integrated nonlinear optics with lithium niobate thin films	48
Mask Aligner Lithography with Laser Illumination	50
Micro-optical telescopic arrays for LED light sources	52
GRISM manufacturing for spectroscopy in space	54
Wire-grid polarizers for the far-ultraviolet spectral range	56
Precision engineering components and systems – Scientific results from the business field	58
Novel wire deflection system for electron beam lithography	60
Reference elements for the on-board calibration of Infrared Optics	62
Freeform mirror modules for easy system integration	64
Functional surfaces and layers – Scientific results from the business field	66
Organic-inorganic functional coatings by Co-Evaporation (OrKo)	68
Wetting analysis of oleophobic glass surfaces immersed in water	70
Conformal nanoporous SiO ₂ films with adjustable refractive index	72
The first step for a new lithography generation	74
Photonic sensors and measuring systems – Scientific results from the business field	76
Body measurement in motion: high-speed 3D detection	78
3D Lip Reading – 3D face scanning for speech recognition	80
Multiaperture imaging system for presence detection	82
Micro computed tomography for the analysis of biological preparations	84
Robot assisted light scattering sensor for surface assessment	86
In-line holographic measurements for the metrology of optical fibers	88
Femtosecond-CARS for gas analysis	90
Table-top Nanoscale imaging with XUV light	92
Laser technology – Scientific results from the business field	94
High Power Fiber Lasers at 1 μm and 2 μm	96
Mitigation of mode instabilities in high-power fiber laser systems	98
Fraunhofer Group Light & Surfaces and Fraunhofer-Gesellschaft	100
Names, dates, activities	106



DAS INSTITUT IM PROFIL PROFILE OF THE INSTITUTE

Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative Lösungen mit Licht für die Zukunftsfelder Energie & Umwelt, Information & Kommunikation, Gesundheit, Produktion sowie Sicherheit & Mobilität. Dazu verknüpft es angewandte Forschung und Entwicklung mit exzellenter Grundlagenforschung zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zur Anwendung. Dabei wird die gesamte photonische Prozesskette abgebildet, vom Systemdesign bis zur Fertigung von Prototypen. Herausragende Ergebnisse der Grundlagenforschung sowie strategische Kooperationen mit Partnern aus der Industrie belegen die Forschungsstärke des Fraunhofer IOF. Die Arbeiten erfolgen sowohl im Rahmen öffentlich finanzierter Vorlaufforschung als auch im direkten Auftrag der Wirtschaft.

Das Fraunhofer IOF steht in der Tradition der Jenaer Optikpioniere Carl Zeiss, Ernst Abbe und Otto Schott. Es ist regional verankert, pflegt vielfältige Kooperationen mit Unternehmen sowie Forschungs- und Bildungseinrichtungen am Standort und trägt als wissenschaftliches Zentrum der Optikregion Jena durch Innovationen, Personal- und Wissenstransfer sowie Ausgründungen zur regionalen Entwicklung bei. Gleichzeitig ist das Fraunhofer IOF national und international ausgerichtet und pflegt ein Netzwerk mit Partnern aus Europa, Nordamerika und Asien. Das Fraunhofer IOF misst sich an internationalen Standards, daher sind vertrauensvolle Zusammenarbeit und ein internationaler Austausch in Forschung und Entwicklung unabdinglich.

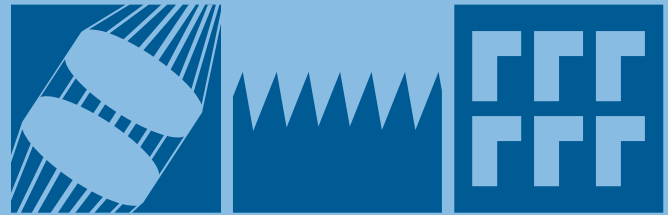
Das Institut ist in den fünf Geschäftsfeldern Optische Komponenten und Systeme, Feinmechanische Komponenten und Systeme, Funktionale Oberflächen und Schichten, Photonische Sensoren und Messsysteme sowie Lasertechnik tätig. Die enge Verzahnung der Geschäftsfelder erlaubt die Erarbeitung von Systemlösungen für unsere Kunden. Im Abschnitt der wissenschaftlichen Beiträge werden ausgewählte Forschungsinhalte der einzelnen Geschäftsfelder vorgestellt.

The Fraunhofer IOF develops innovative solutions with light for the future of energy & environment, information & communication, healthcare, production, and safety & mobility. It combines applied research and development with high quality fundamental research to control light – from its generation and manipulation to its actual use – covering the entire process chain from system design to the manufacture of prototypes. Outstanding basic research findings and strategic cooperation arrangements with various partners in industry demonstrate the research strengths of the Fraunhofer IOF. Its work is carried out as part of publicly-funded initial research initiatives as well as on the direct commission of industry.

The Fraunhofer IOF follows the tradition of the Jena-based optics pioneers Carl Zeiss, Ernst Abbe and Otto Schott. It has a regional focus, maintains diverse cooperation arrangements with both businesses as well as research and educational institutions at its location. As a scientific center of the Jena optics region it contributes to regional development with innovation, staff and knowledge transfer and spin-off ventures. At the same time, the Fraunhofer IOF is both national and international in its orientation and maintains a network of partners in Europe, North America and Asia. The Fraunhofer IOF adheres to international standards; close cooperation and international knowledge transfer in research and development are indispensable elements of this.

The institute works in the five business fields of Optical Components and Systems, Precision Engineering Components and Systems, Functional Surfaces and Layers, Photonic Sensors and Measuring Systems, and Laser Technology. The close links between the business fields make it possible to develop system solutions for customers. The business fields at the Fraunhofer IOF are separately presented and described in the section of scientific articles.

KOMPETENZEN COMPETENCES



Design und Simulation

Zentrale Kompetenz und Basis aller Entwicklungen am Fraunhofer IOF sind Optik- und Mechanikdesign sowie die Simulation und Analyse optischer und optomechanischer Systeme, einschließlich thermischer und thermo-optischer Effekte. Für die Bearbeitung der vielfältigen Anforderungen stehen umfangreiche Design- und Modellierungswerkzeuge zur Verfügung. Aufgabenspezifische Add-ons erlauben die Simulation und Optimierung von komplexen Systemen.

Mikro- und Nanostrukturierung

Die Erzeugung und Replikation optischer Mikro- und Nanostrukturen ist Grundlage für moderne komplexe optische Systeme. Die am Institut vorhandene technologische Basis erlaubt die Fertigung und Charakterisierung von High-End mikro- und nanooptischen Elementen höchster Auflösung auf bis zu 12"-Substraten.

Materialien der Optik und Photonik

Die Nanostrukturtechnik ermöglicht die Entwicklung von Materialien mit neuartigen optischen Eigenschaften, wie beispielsweise photonische Kristalle und Metamaterialien. Die Erforschung dieser Materialien erfolgt unter anderem im Zentrum für Innovationskompetenz »ultra optics®«.

Beschichtung und Oberflächenfunktionalisierung

Funktionale Beschichtungen und Oberflächen sind wesentliche Bestandteile optischer Systeme. Umfangreiche Kompetenzen bestehen im Design optischer Schichtsysteme, in der Entwicklung von Beschichtungs- und Strukturierungsverfahren für unterschiedliche Anwendungen und in der Charakterisierung von Oberflächen und Schichten.

Ultrapräzisionsbearbeitung

Das Fraunhofer IOF stellt mittels Ultrapräzisionsbearbeitung Metallspiegel, Gitter, kunststoffbasierte Linsen und Linsenarrays her. Eingesetzt werden Diamantwerkzeuge zur Bear-

Design and simulation

The core area of expertise and the basis of all development at Fraunhofer IOF is optical and mechanical design and the simulation and analysis of optical and optomechanical systems, including thermal and thermo-optical effects. Wide-ranging design and modelling tools, together with task-specific add-ons, enable the simulation and optimization of systems.

Micro- and nanostructuring

The generation and replication of optical micro- and nanostructures are basis for modern and complex optical systems. The technological equipment available at the institute enables the production and characterization of high-end micro- and nanooptical elements of highest resolution on substrates up to 12".

Optics and photonics materials

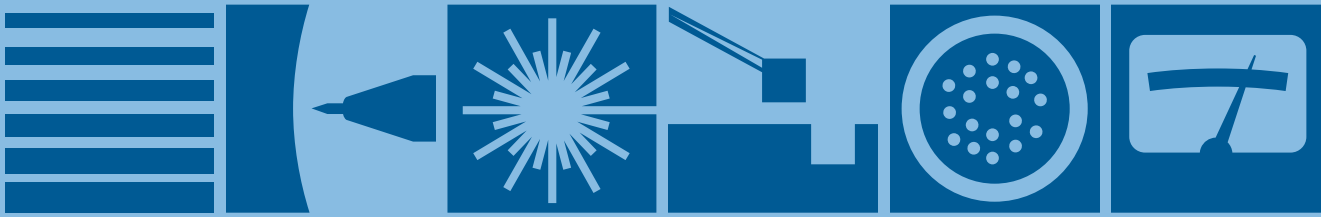
Nanostructure technology enables the development of new materials for optics and photonics, such as photonic crystals and metamaterials. The investigation of these materials is carried out at the Center for Innovation Competence "ultra optics®".

Coating and surface functionalization

Functional coatings and surfaces are essential elements of optical systems. We offer extensive expertise in the design of optical layer systems, in the development of coating and structuring processes for diverse applications, and in the characterization of surfaces and layers.

Diamond-based ultra-precision processing

The Fraunhofer IOF manufactures metal mirrors, gratings and plastic-based lenses and lens arrays using ultra-precision processing. For this purpose diamond tools are used to process metal, crystal and plastic optics for application in the wavelength range from 14 μm to 13.5 nm.



beitung von Metall-, Kristall- und Kunststoffoptiken für die Anwendung im Wellenlängenbereich von 14 μm bis 13,5 nm.

Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung

Ultrakurzpuls laser mit Pulsdauern von wenigen Pikosekunden oder Femtosekunden besitzen hohes Einsatzpotenzial zur hochpräzisen Strukturierung verschiedener Materialien. Aufgrund der kurzen Energiedeposition, in einem Zeitbereich der unterhalb der thermischen Relaxationszeit liegt, lässt sich ein Abtrag praktisch ohne mechanische oder thermische Schädigung des Werkstücks erzielen.

Mikromontage und Systemintegration

Das Fraunhofer IOF besitzt umfangreiches Know-how in der Entwicklung von Technologien zur hybriden Integration unterschiedlicher Komponenten für den hochpräzisen Aufbau komplexer optomechanischer und optoelektronischer Mikro- und Makrosysteme. Dies umfasst Montagetechnologien (Positionieren, Justieren), Fügetechnologien (Kleben, Laserlöten, Plasmabonden, Laserspleißen, Justierdrehen) und Integration.

Laserentwicklung und nichtlineare Optik

Für die Entwicklung von Hochleistungs-Faserlasern mit beugungsbegrenzter Strahlqualität bestehen am Fraunhofer IOF Kompetenzen in Faserdesign, Optikdesign und Thermo-optik, in der Aufbau- und Verbindungstechnik für Faserlaser und in der Entwicklung effizienter Fasereinkoppler und Strahlführungssysteme.

Messverfahren und Charakterisierung

Das Fraunhofer IOF entwickelt optische Messverfahren und -systeme nach kundenspezifischen Anforderungen. Schwerpunkte sind die Charakterisierung optischer und nichtoptischer Oberflächen, Schichten, Komponenten und Systeme im Mikro- und Subnanometerbereich sowie die 3D-Formfassung.

Materials processing using ultrashort laser pulses

Ultrashort pulse lasers with pulse durations of a few picoseconds or femtoseconds show great potential for highly-precise structuring of a wide range of materials. Due to the short energy deposition in the time range below the thermal relaxation time, a material removal can be achieved with practically no mechanical or thermal damage.

Micro-assembly and system integration

The Fraunhofer IOF possesses extensive expertise in the development of technologies for the hybrid integration of diverse components with high precision for the setup of complex optomechanical and opto-electronic micro- and macrosystems. This encompasses assembly technologies (positioning, aligning), joining technologies (bonding, laser soldering, plasma bonding, laser splicing, alignment turning), and integration.

Laser development and non-linear optics

For the development of high-power fiber lasers with diffraction-limited beam quality, Fraunhofer IOF possesses expertise in fiber design, optics design and thermo-optics, in assembly and packaging technology for fiber lasers and in the development of efficient fiber couplers and beam guidance systems.

Measurement methods and characterization

The Fraunhofer IOF develops optical measurement methods and systems to customer requirements. Key areas include the characterization of optical and non-optical surfaces, layers, components and systems in the micrometer and sub-nanometer range and in 3D shape acquisition.

ORGANISATION ORGANIZATION



HEAD OF INSTITUTE



Director
Prof. Dr. Andreas
Tünnermann



Deputy director
Prof. Dr. Norbert
Kaiser



Consultant
Prof. Dr.
Wolfgang Karthe

ADMINISTRATION



Administration
Elke Heuer



**Strategy, marketing,
coordination**
Dr. Kevin Fücksel

BUSINESS FIELDS



**Optical components
and systems**
Dr. Uwe Detlef
Zeitner



**Precision engineering
components and
systems**
Dr. Ramona
Eberhardt



**Functional optical
surfaces and layers**
Prof. Dr. Norbert
Kaiser



**Photonic sensors and
measuring systems**
Prof. Dr. Gunther
Notni

COMPETENCES



**Design and
simulation**
Prof. Dr. Herbert
Gross



**Micro and nano-
structuring**
Dr. Ernst-Bernhard
Kley



**Coating and surface
functionalization**
Prof. Dr. Norbert
Kaiser



**Micro-assembly and
system integration**
Dr. Erik
Beckert



**Diamond-based
ultra-precision
processing**
Dr. Stefan
Risse



**Laser development
and non-linear
optics**
Prof. Dr. Jens
Limpert



**Materials processing
using ultrashort laser
pulses**
Prof. Dr. Stefan
Nolte



**Measurement
methods and
characterization**
Prof. Dr. Gunther
Notni

STRATEGIC PROJECTS

ultra optics®
Center of innovation
competence
Prof. Dr. Andreas Tünnermann



3Dsensation
Innovation alliance
Prof. Dr. Andreas
Tünnermann



Holistic concept and
simulation of modern
optical systems
Prof. Dr. Herbert Gross

KoSimO

KURATORIUM ADVISORY COMMITTEE



Technical services
Wieland Stöckl



Laser technology
Prof. Dr. Stefan
Nolte



Optics and photonics
materials
Prof. Dr. Thomas
Pertsch

fo⁺
Freeform Optics Plus

Dr. Ramona
Eberhardt



VORSITZENDER | CHAIR

- Dr. Michael Mertin | JENOPTIK AG, Jena

MITGLIEDER | MEMBERS

- Christian Amann | BMW Group, München
- Dr. Klaus Bartholmé | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena
- Petra Bogdanski | Mahr GmbH, Jena
- Dr. Hans Eggers | Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
- Robert Fetter | Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Erfurt
- Dr. Roland Langfeld | Schott AG, Mainz
- Manfred Lieke | Astrium GmbH Satellites, Friedrichshafen
- Prof. Dr. Roland Sauerbrey | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden
- Dr. Wolfgang Rupp | Carl Zeiss SMT GmbH, Oberkochen
- Dr. Christian Schmitz | TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen
- Prof. Dr. Christian Spielmann | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Optik und Quantenelektronik, Jena
- Thomas Thöniß | Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG, Göttingen
- Dr. Berit Wessler | OSRAM GmbH, München
- Dr. Werner Wilke | VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

EHRENMITGLIEDER | HONORARY MEMBERS

- Dr. Franz-Ferdinand von Falkenhausen
- Prof. Dr. Wolfgang Karthe

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

THE INSTITUTE IN FIGURES

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2016 ist gegenüber dem Vorjahr um 9 % gestiegen, wobei die Aufwendungen für Personal und Sachausgaben gleichermaßen um 9 % gestiegen sind. Basis des Betriebshaushalts ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag erreichte abermals mehr als 11 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel betrugen ebenfalls 11 Millionen Euro.

Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2016 wurden insgesamt 7,8 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

Personal

Mit erhöhtem Betriebshaushalt konnten 2016 etliche neue Arbeitsplätze geschaffen werden. Die Zahl der Mitarbeiter erhöhte sich gegenüber 2015 um 7,3 %. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zu-

Operating budget

Compared with the previous year the operating budget increased in 2016 by 9 %, with expenditures for staff keeping and material costs grow both by 9 %. The basis is still the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached again more than 11 million euros. The received public funding reached also 11 million euros.

Investments

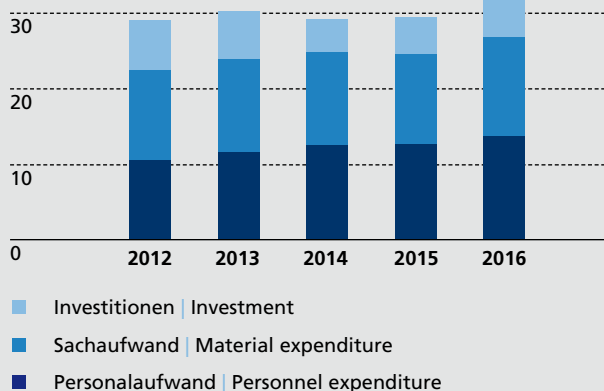
The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 7.8 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2016.

Staff

The enhanced operating budget gave us the possibility to create new jobs in 2016. The total number of employees increased by 7.3 % compared to 2015. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher

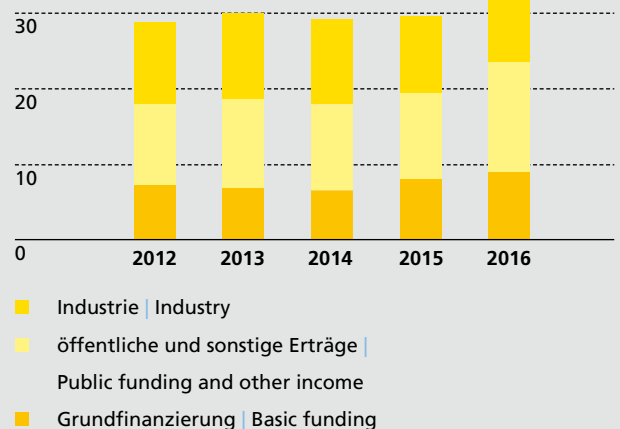
Fraunhofer IOF

Gesamthaushalt | Budget (Mio. €)



Fraunhofer IOF

Ertrag | Revenue (Mio. €)



sammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Ernst-Abbe-Hochschule Jena.

Das FSU-IAP 2016 in Zahlen

Die Mitarbeiter des IAP konnten für 2016 Drittmittel in Höhe von 9,8 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2016 6 Professoren, 31 wissenschaftliche und 16 technische Mitarbeiter sowie 89 Doktoranden und 60 Studenten.

Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

education, in particular the Friedrich Schiller University Jena and the Ernst Abbe University Jena.

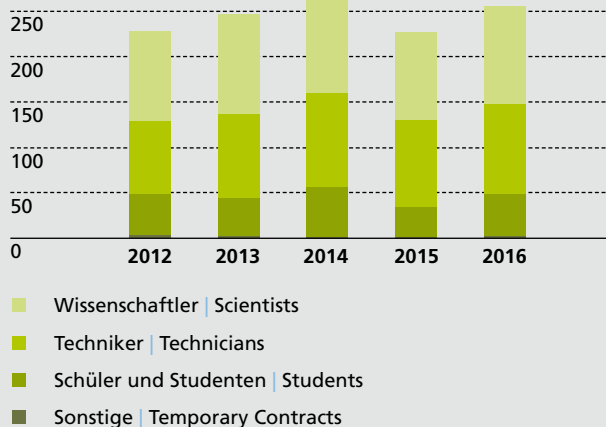
The FSU-IAP in figures 2016

Employees at IAP acquired external funds worth 9.8 million euros in 2016 (see table). A total staff of 6 professors, 31 research assistants, 16 technical assistants, 89 doctoral candidates, and 60 students were working at IAP in 2016.

The majority of completed theses are listed in the attachment.

Fraunhofer IOF

Mitarbeiter (Vollzeitäquivalente) | Staff (full-time equivalent)



FSU-IAP

Drittmiteleinahmen IAP 2016 |

Contract research revenue IAP 2016

Fördergeber Contracts with	Zuwendung Funds T€
BMBF	4.183
DFG	1.634
EU	870
Thüringen Thuringia	322
Stiftungen Foundations	401
Industrie Industry	2.362

PHOTONICS – MADE IN JENA



NEUES LEISTUNGSZENTRUM IN JENA

NEW HIGH PERFORMANCE CENTER IN JENA

Gemeinsam mit Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik eröffnete Prof. Dr. Reimund Neugebauer, Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, am 6. April 2016 das neue Leistungszentrum Photonik am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena. »Die Eröffnung des Leistungszentrums Photonik ist der Beweis für die herausragende Zusammenarbeit von Fraunhofer, der Industrie sowie der Universität und anderen Forschungseinrichtungen am Standort Jena«, sagte der Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft. »Das trifft den Kern des Modells: Fraunhofer will die nachhaltige Entwicklung von Forschungsstandorten voranbringen, um die internationale Strahlkraft führender Regionen – hier Jena mit dem Schlüsselthema Optik – zu verstärken und die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft auszubauen«, so Neugebauer. In einer Podiumsdiskussion unter der Leitung von Prof. Dr. Oliver Mauroner (Hochschule Mainz) diskutierten die Redner gemeinsam mit dem Leiter des Leibniz-Instituts für Photonische Technologien, Prof. Dr. Jürgen Popp, über die Herausforderungen und neue Konzepte in der Zusammenarbeit von Wirtschaft und Wissenschaft.

Für Wirtschafts- und Wissenschaftsminister Wolfgang Tiefensee ist das Leistungszentrum Photonik ein Beleg für die herausragende Stellung Jenas im Bereich der Photonik-Forschung und das beste Beispiel einer win-win-Situation für Wirtschaft und Wissenschaft: »Durch die Entscheidung der Fraunhofer-Gesellschaft für Jena kann die photonische Forschung in eine ganz neue Liga gehoben werden. So wird der Jenaer Beutenberg mit dem Leistungszentrum immer mehr zur Zugspitze der deutschen Forschungslandschaft«. Das Leistungszentrum Photonik in Jena stellt sich der Herausforderung, innovative Lösungen mit Licht für wichtige Zukunftsfelder zu entwickeln und fördert deren Umsetzung und Anwendung in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Hierzu verknüpft das Leistungszentrum anwendungsorientierte Forschung mit wissenschaftlich exzellenter Grundlagenforschung zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zur Anwendung. Leistungszentren sind ein Werkzeug, exzellente Forschungsergebnisse nahtlos in der Industrie umzusetzen.

Prof. Dr. Reimund Neugebauer, president of the Fraunhofer Society, inaugurated the new High Performance Center of Photonics under the presence of partners from industry, science, and politics on April 6, 2016 at the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering in Jena.

»The opening of the High Performance Center of Photonics underlines the outstanding cooperation of Fraunhofer, local industry, the university and other research institutes located in Jena« said Prof. Reimund Neugebauer. »At the heart of its mission, Fraunhofer aims to support the sustainable growth of research clusters – with Jena's focus on optics – by increasing their international impact and visibility, and to push the competitiveness of the German economy«, Neugebauer explained. Prof. Dr. Oliver Mauroner, University of Applied Sciences Mainz, led the panel discussion that followed. Together with Prof. Dr. Jürgen Popp, Director of the Leibniz Institute of Photonic Technology, the speakers discussed challenges and new concepts of cooperation between industry and science.

According to Wolfgang Tiefensee, the Thuringian Minister of Economics and Science, the High Performance Center of Photonics is evidence for the exceptional position of Jena in photonics research and the best example of a win-win-situation for industry and science. »The decision of the Fraunhofer Society enables photonics research in Jena to be pushed to a completely new level. This helps to elevate Jena's Beutenberg to the pinnacle of the German research landscape«.

The Center addresses the challenges of photonics: the development of innovative solutions with light for important cutting-edge fields by supporting their application in science, industry and society. It combines applied research and development with fundamental science, ranging from the creation and manipulation of light to its application. High performance centers are a means of putting excellent scientific results smoothly into industrial practice.

LEFT Prof. Dr. Reimund Neugebauer.



WECHSEL IM FÜHRUNGSTEAM DER MIKROOPTIK NEW MANAGEMENT TEAM OF MICROOPTICS

Seit 1999 leitete Dr. Andreas Bräuer die Abteilung Mikrooptische Systeme und hat die Entwicklung des Fraunhofer IOF seitdem entscheidend mitgeprägt. Am 1. Januar 2017 übergab er seine Tätigkeit als Abteilungsleiter an Dr. Uwe Detlef Zeitner und Prof. Dr. Robert Brunner, die nun eine gemeinsame Spitze bilden. Im Gespräch erzählen sie von herausragenden Momenten, zukünftigen Schwerpunkten und Herausforderungen in der Mikrooptik.

Herr Dr. Bräuer, Sie haben achtzehn Jahre lang die mikrooptische Abteilung des Fraunhofer IOF geleitet. An welche Momente erinnern Sie sich besonders gut?

Unser Team hat eine stattliche Zahl an Preisen erhalten, auf die wir durchaus stolz sein können, zum Beispiel den Deutschen Zukunftspreis 2007, den wir gemeinsam mit OSRAM für die Entwicklung der Optik für Dünnschicht-LEDs erhalten haben. Besonders freut mich beispielsweise, dass es unserer Abteilung gelungen ist, die Mikroprojektionstechnologie bis zur Anwendungsreife zu entwickeln. Eine von uns entwickelte Mikrooptik wird für automobilen Anwendungen in Serie produziert, und bereits seit 2015 als »Lichtteppich« im BMW 7er verbaut.

From 1999, Dr. Andreas Bräuer managed the department of microoptical systems and left his mark on the development of Fraunhofer IOF. On January 1, 2017 he handed over the task to Dr. Uwe Detlef Zeitner and Prof. Dr. Robert Brunner, who will now share the responsibility. During the interview, they shared remarkable moments, future primary emphasis and possible challenges of microoptics.

Dr. Bräuer, you have managed the microoptical department of Fraunhofer IOF for 18 years. Which moments will you look back on with fond memories?

Our team has received a remarkable number of awards of which we can be really proud; for example the Deutscher Zukunftspreis 2007, which we received for the development of optics for thin-film LEDs together with OSRAM. I am very pleased that our team accomplished the development of an applicable micro projection technology. One of our microoptical technologies has been applied in a volume market in the automotive industry. Since 2015, BMW has used the "light carpet" in its 7 series.



Welchen Herausforderungen mussten Sie sich während Ihrer Zeit als Abteilungsleiter stellen?

Meine Anfangszeit als Abteilungsleiter war natürlich aufregend. Wir sind bis zu 60.000 Kilometer im Jahr gefahren, nur um Akquise zu machen. Heute sind wir in der glücklichen Lage, dass wir selten durch die Gegend fahren müssen, um Werbung für uns zu machen, denn die Auftraggeber kommen zu uns.

Herr Dr. Zeitner, Herr Prof. Dr. Brunner, Sie haben am 1. Januar 2017 gemeinsam die Leitung der Abteilung Mikrooptische Systeme übernommen. Welche Themen haben Sie zuvor behandelt?

Prof. Dr. Robert Brunner: Ich arbeite bereits seit 25 Jahren mit dem Thema Mikrooptik. Studiert habe ich in Ulm, mein damaliger Schwerpunkt war das Thema Nahfeldoptik. Da ich sehr anwendungsorientiert bin, wechselte ich nach meiner Promotion in die Industrie und begann 1998 bei Carl Zeiss in Jena zu arbeiten. Dort leitete ich die Gruppe »Mikrostrukturierte Optik«. Durch Kooperationen mit dem Fraunhofer IOF habe ich bereits sehr früh Einblicke in die Strukturen und Forschungsthemen des

What have been the greatest challenges you faced while managing the department?

In particular, my first steps as the head of department were very exciting. We drove up to 60,000 km a year to attract new clients. Luckily, today we are fortunate enough to welcome the customers at our institute instead of driving long distances.

Dr. Zeitner, Prof. Dr. Brunner, since January 1, 2017 you have taken on the responsibility of running the department of microoptical systems together. What are your previous fields of interest?

Prof. Dr. Robert Brunner: I have been working in the field of microoptics for 25 years. I studied in Ulm. Back then, my focus was on near-field optics. Since I am very application-oriented, I switched to the manufacturing industry and started to work for Carl Zeiss in Jena in 1998. I managed the group microstructured optics. From very early on, I gained some

TOP *Abteilungsleiter Andreas Bräuer mit seinen Nachfolgern Robert Brunner und Uwe D. Zeitner. | Heads of department Andreas Bräuer, Robert Brunner und Uwe D. Zeitner.*

Instituts erhalten. Umso mehr freue ich mich nun über die Chance, gemeinsam mit Uwe in Andreas' Fußstapfen treten zu dürfen.

Dr. Uwe D. Zeitner: Ich beschäftige mich bereits seit meiner Promotion mit dem Thema Mikrostrukturtechnologie. 1999 bin ich vom Lehrstuhl für Angewandte Physik zum Fraunhofer-Institut gewechselt, seitdem arbeite ich in der Abteilung von Dr. Bräuer. Zunächst lag der Schwerpunkt meiner Arbeit auf dem Thema Optikdesign, teilweise war ich auch im Bereich der Röntgenoptik tätig. 2006 ging es für mich zurück zum Thema Mikrostrukturtechnologie und ich begann mit dem Aufbau des Zentrums für Mikro- und Nanooptik (CMN), dessen Schwerpunkt auf der Entwicklung von hybriden Optiken für Spektrometer und Ultrakurzpulslaser liegt.

Welche Akzente planen Sie zukünftig in der Abteilung zu setzen?

Prof. Dr. Robert Brunner: Wir werden weiter das Thema Beleuchtungssysteme vorantreiben, insbesondere in Richtung Automobile. Hier besteht meiner Meinung nach ein sehr hohes Potenzial, tatsächlich Umsetzung in der Industrie zu finden. Neu mitbringen werde ich den Bereich spektrale Sensorik – also alles, was mit Farben und dem nahen infraroten Bereich zu tun hat.

Dr. Uwe D. Zeitner: Dem würde ich absolut zustimmen. Zusätzlich sehe ich einen enormen Entwicklungsbedarf im Bereich Quantentechnologie. Derzeit arbeiten wir noch im Bereich der Submikrometerstrukturen, wir sollten langfristig jedoch versuchen, in den Nanometerbereich zu gelangen. Ein weiteres attraktives Feld ist die Lithografie, also eigentlich eine subtraktive Technologie. Im makroskopischen Bereich etablieren sich nun immer mehr additive Technologien, ebenfalls mit ersten Ansätzen für den mikro- und nanooptischen Bereich. Hier werden wir uns sicherlich zukünftig weiterbewegen.

Herr Dr. Bräuer, wie geht es nach Ihrem Abschied weiter?

Seit 1. Januar 2017 widme ich mich nun Aufgaben, die nichts mehr mit der Abteilungsleitung zu tun haben. Unter anderem unterstütze ich die Koordinierungsstelle der Forschungsallianz 3Dsensation. Und ich arbeite auf dem Gebiet der Geschäftsent-

insights into the structures and fields of investigation of Fraunhofer IOF due to a number of cooperations. That is why I am really looking forward to following in Dr. Bräuer's footsteps together with Dr. Zeitner.

Dr. Uwe D. Zeitner: Since my doctoral thesis, I have been involved in the field of microstructural technologies. In 1999, I switched from the chair of applied physics to the Fraunhofer Institute. Since then, I have been working in Dr. Bräuer's department. Initially, my work focused on optical design. I was also working in the area of x-ray optics. In 2006, I switched back to the field of microstructural technologies and I started with the process of developing the Center for Micro- and Nanooptics (CMN), which is specialized in developing hybrid optics for spectrometers and ultrashort pulse lasers.

Which features will you emphasize in your department in the future?

Prof. Dr. Robert Brunner: We will keep advancing the subject of illumination systems, especially in the context of automobiles. In my opinion, this is an area of high potential to apply the technology to industrial purposes. Spectral sensors are a new topic that I am going to introduce within this research. Thus, we will include everything that has to do with colors and the near infrared range.

Dr. Uwe D. Zeitner: I absolutely agree. On top of that, I would also like to push the development of quantum technology. We are currently working in the field of submicro-structures. In the long run, however, we should be aiming at reaching the nanometer range. As a subtractive technology, lithography is another attractive domain. In the macroscopic sector, more and more additive technologies are being established with the first steps towards the micro- and nanooptical range.

Dr. Bräuer, what will follow your farewell?

Since January 1, 2017 I have dedicated my time to other tasks that differ from my responsibility as head of department. Among other things, I support the coordination unit of the research alliance 3Dsensation.

wicklung für die in den letzten Jahren in der Abteilung entstandenen Ideen, die natürlich in der Regel patentiert sind.

Welche Herausforderungen sehen Sie für die zukünftige Entwicklung der Abteilung?

Ich habe das Fraunhofer IOF als eine Institution kennengelernt, die sich ständig nach vorne bewegt und das derzeitige Team ist überdurchschnittlich gut, deshalb habe ich nicht im Geringsten das Gefühl, ein sinkendes Schiff zu verlassen. Allerdings könnte die Rekrutierung neuer Fachkräfte zukünftig zur Herausforderung werden, da die Anzahl guter Hochschulabsolventen immer weiter abnimmt. Hier müssen wir zielgerichtet auf die jungen Leute zugehen.

Herr Dr. Zeitner, Herr Prof. Dr. Brunner, was nehmen Sie beide von Herrn Dr. Bräuer mit?

Prof. Dr. Robert Brunner: Was ich gern von ihm mitnehmen würde, ist seine Art, zu kommunizieren. Sowohl die interne Kommunikation zu den Mitarbeitern der Abteilungen, die sehr individuell und wertschätzend ist, als auch seine externe Kommunikation hat mich sehr beeindruckt, insbesondere bei Verhandlungen. Er kommt immer zu seinen Zielen und schafft es, sich auf bestimmte aber freundliche Weise durchzusetzen.

Dr. Uwe D. Zeitner: Dem kann ich natürlich nur zustimmen. Es ist bei Verhandlungen extrem wichtig, die Interessen seines Gegenübers wahrzunehmen. Auf der anderen Seite darf man die eigenen Interessen nicht zurückstellen, das führt selten zu Erfolgen.

I also keep working for the business development of recent innovative ideas of the department, which are usually patented of course.

Which future challenges, could you see a rise in the department?

The Fraunhofer IOF, as I know it, is an institution that constantly keeps moving forward. The current team is undoubtedly above average. That is why I do not feel as though I am leaving a sinking ship. Recruiting new specialists in the field could pose a challenge though since the number of well-qualified graduates is continuously decreasing. Therefore, we need to specifically approach the young generation.

Dr. Zeitner, Prof. Dr. Brunner, what can you learn from Dr. Bräuer?

Prof. Dr. Robert Brunner: I would like to adopt his way of communicating. I am referring to the internal communication to the employees: very individual and appreciative. But also his external communication has impressed me, especially during negotiations. He always reaches his goals and manages to assert himself in a congenial manner.

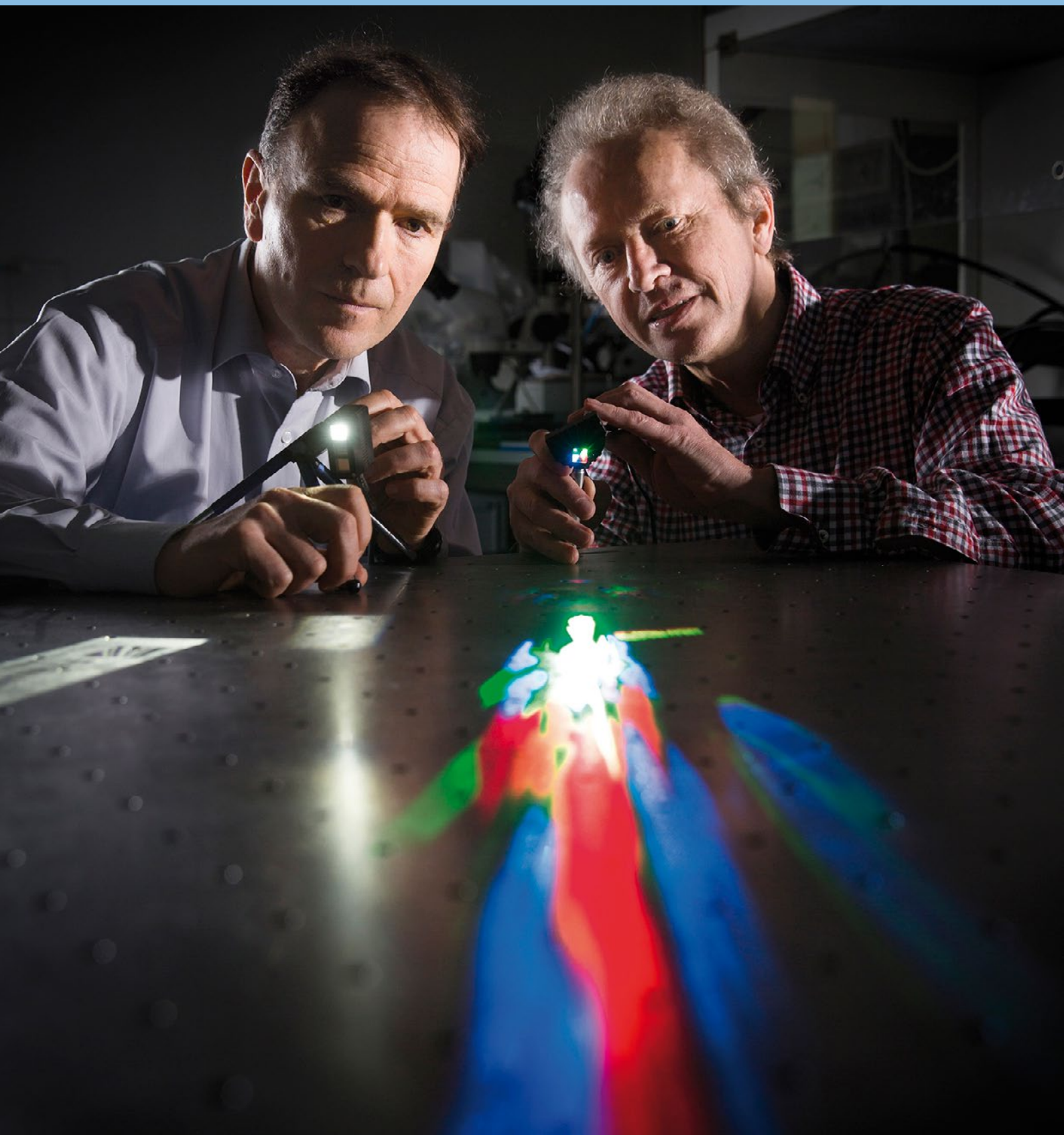
Dr. Uwe D. Zeitner: I wholeheartedly agree with that. During negotiations, it is important to recognize the interests of the partners. Furthermore, you cannot put aside your own interests. That usually does not lead to success.

1 *Deutschen Zukunftspreis 2007 – Optiken für LED-Beleuchtungssysteme.* | *Deutschen Zukunftspreis 2007 – Optics for LED lighting systems.*

2 *Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2016 – LED-Arrayprojektor für den BMW Welcome Light Carpet.* | *Jospeh-von-Fraunhofer Prize 2016 – LED array projector for the BMW Welcome Light Carpet.*

JOSEPH-VON-FRAUNHOFER-PREIS 2016

JOSEPH-VON-FRAUNHOFER PRIZE 2016



In den vergangenen Jahren haben moderne Licht- und Projektionssysteme den Bereich von einfachen Beleuchtungen oder Präsentationen verlassen. Durch stetige Verbesserung der Leistung bei gleichzeitiger Reduktion des Bauraums erschließen solche Systeme neue und hochinteressante Anwendungsfelder, beispielsweise die Gebiete der Allgemeinbeleuchtung, Automotive oder Mess- und Sicherheitstechnik.

Die Physiker Dr. Peter Schreiber, Dr. Peter Dannberg und Marcel Sieler sind seit 2009 damit befasst, LED-Beleuchtungsmodule für verschiedenste Anwendungsgebiete weiterzuentwickeln. Mit der Neuentwicklung eines mikrooptischen Arrayprojektors – im Gegensatz zu bis dahin üblichen Einzelaperturlösungen – gelang es den Forschern, den Zusammenhang zwischen Baugröße der Systeme und Beleuchtungsstärke zu entkoppeln. Damit werden maßgeschneiderte Lichtlösungen mit ultradünnen Projektionssystemen möglich. In nur sechs Jahren führte das Team die Arrayprojektion von der ersten Idee zur industriellen Umsetzung. Den innovativen und attraktiven Charakter solcher Beleuchtungssysteme belegt der Einsatz als Lichtteppich in Automobilen der Premiumklasse. Für die Entwicklung des Arrayprojektors erhielten Peter Danneberg, Peter Schreiber und Marcel Sieler den Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2016.

In recent years, modern lighting and projecting systems have exceeded the boundaries of simple lightings and presentations. Thanks to the constant improvement of the performance coupled with the reduction of assembly space, these systems explore innovative and interesting fields of application, e.g. the area of general lightening, automotive industry, measurement technology and safety engineering.

The physicists Dr. Peter Schreiber, Dr. Peter Dannberg, and Marcel Sieler have been addressing the topic of advancing the LED-lighting modules for different fields of application since 2009. The scientists succeeded in dissolving the connection between the size of the systems and the intensity of lighting. The development of this micro-optical array projector, in contrast to single aperture systems, allows tailored-made lighting solutions with ultra-thin projector systems. Within just six years, the team developed the array projection from the initial idea to the industrial realization. Using these lighting systems as a light carpet in high-end automobiles proves their innovative and attractive features. Peter Danneberg, Peter Schreiber, and Marcel Sieler received the Joseph-von-Fraunhofer Prize 2016 for the development of these array projectors.

LEFT *Der von Peter Dannberg, Peter Schreiber (v.l.n.r.) und Marcel Sieler (nicht im Bild) entwickelte Arrayprojektor projiziert trotz seiner geringen Baugröße ein extrem helles Bild. | The array projector, developed by Peter Dannberg, Peter Schreiber (from the left,) and Marcel Sieler (not shown), projects an extremely bright image despite its minimal size.*



VON DER KOMPONENTE ZUM SYSTEM FROM THE COMPONENT TO THE SYSTEM

Freiformoptik PLUS (fo⁺)

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) endete der regionale Wachstumskern fo⁺ [freeform optics plus] nach einer Entwicklungsperiode von drei Jahren im Dezember 2016. Das Bündnis aus acht Unternehmen und zwei Forschungseinrichtungen der Thüringer Photonikbranche entwickelte die Grundlagen für die Nutzung von freiformoptischen Systemen entlang einer innovativen Technologieplattform mit den Komponenten: Design, Material, Bearbeitung, Beschichtung, Strukturierung und Systeme. Die Validierung der Prozesskette erfolgte an Demonstratoren auf Komponenten- und Systemebene mit dem Schwerpunkt auf Anwendungen im Infrarot (IR) Spektralbereich.

Das Fraunhofer IOF engagierte sich maßgeblich in den Bereichen wissenschaftlicher und technologischer Grundlagenforschung zum optomechanischen Design, der ultrapräzisen (UP) Fertigung, der Vergütung und zur Entwicklung von Methoden für die effiziente Montage und Justage von freiformoptischen Systemen. Im Rahmen dessen wurden das fertigungsgerechte Design entwickelt und Designrichtlinien festgelegt sowie die Grundlagen der

freeform optics plus (fo⁺)

Sponsored by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), the regional growth core fo⁺ [freeform optics plus] ended in December 2016 after a development period of three years. The alliance of eight companies and two research institutes of the Thuringian photonics sector developed the basis for the use of freeform optical systems along an innovative technology platform with the components: Design, Material, Processing, Coating, Structuring, and Systems. The process chain was validated by demonstrators at component- and system level, focussing on applications in the infrared (IR) spectral range.

The Fraunhofer IOF has played a key role in the areas of basic scientific and technological research on optomechanical design, ultra-precise (UP) manufacturing, coating, and development of methods for the efficient assembly and adjustment of freeform optical systems. Within the framework of this project, the production-oriented design was developed and design guidelines were defined; basics of the production and assembly of components with reference elements and mounting structures were evaluated. Monolithic camera modules for novel



Fertigung und Montage von Komponenten mit Referenzelementen und Anlagestrukturen evaluiert. Als Demonstratoren dienten monolithische Kameramodule für moderne IR-Kameras zur Anwendung im Bereich Fahrerassistenz sowie linsen- und spiegelbasierte Teleskopsysteme für die Fernerkundung und Erdbeobachtung.

Als Demonstrator des Projektpartners JENOPTIK Optical Systems GmbH wurde ein kompaktes IR-Kameraobjektiv mit integrierter monolithischer Freiformoptik für Anwendungen im Automobilbereich auf Basis einer Freiformkomponente aus Germanium der Photonic Sense GmbH sowie einer weiteren Systemlösung aus dem IR-Glas IG4 der VITRON GmbH entwickelt. Das monolithische Modul (Abb. 2, Seite 26) wird jeweils aus vier optischen Funktionsflächen und exakten Anlageflächen mittels ultrapräziser Fertigungsverfahren in Zusammenarbeit mit der asphericon GmbH hergestellt. Der Demonstrator auf Basis eines Germanium-Monolithen lieferte die weltweit erste Aufnahme eines IR-Wärmebildes mit MTF axial > 50 % FOV > 30 % bei 20 lp/mm, einer brillanten Auflösung, hohem Kontrastverhältnis und einer deutlich höheren mechanischen Stabilität. Das optische und

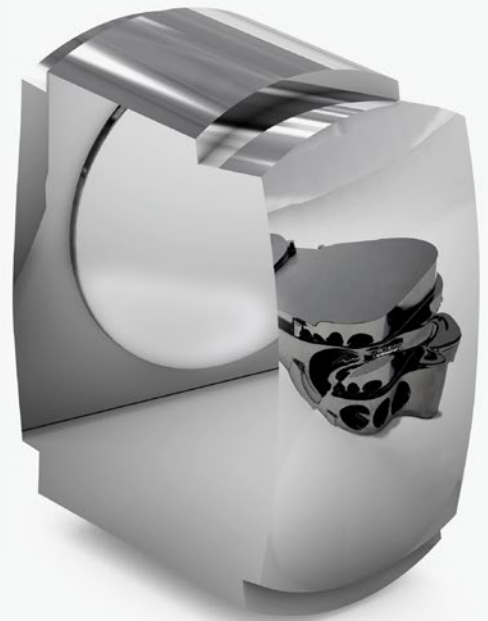
IR driver assistance cameras and lens- and mirror-based telescope systems for remote sensing and earth observation were chosen as demonstrators.

As a demonstrator of the project partner JENOPTIK Optical Systems GmbH, a compact IR camera lens with integrated monolithic freeform optics for applications in the automotive field was realized. It is based on a freeform component made of germanium of the Photonic Sense GmbH. In addition, a further system solution from the IR glass IG4 of the VITRON GmbH was developed. The monolithic module (Fig. 2, p. 26) is made of four optical functional surfaces and exact stroke surfaces by means of ultra-precise manufacturing processes in cooperation with the asphericon GmbH. The demonstrator based on the Ge monolith provided the world's first recording of an IR thermal image,

TOP *Michael Degel (JENOPTIK Optical Systems GmbH) mit konventioneller Kameraoptik und Stefan Risse mit Ge-Monolith – mehr Leistung in kleineren Dimensionen. | Jenoptik's Michael Degel with a conventional lens and Stefan Risse with the Ge-Monolith – more performance in smaller dimensions.*



1



2

mechanische Design in IG4 Glas ermöglicht eine weitere signifikante Bauteilreduktion sowie eine Reduzierung der Fertigungskosten. Das Modul besteht aus zwei Asphären, einer Off-Axis-Asphäre und einer Freiformfläche (Asphäre mit zusätzlichen Zernike-Polynomen). Hierfür realisierte das Fraunhofer IOF das optische und mechanische Design und analysierte die freiformtaugliche Fertigung von zwei optischen Flächen in einer Aufspannung mit einem gemeinsamen Toolpfad zur Diamantbearbeitung.

Für ein hochauflösendes Freiform-Teleskop zur Erdbeobachtung erfolgte in enger Zusammenarbeit der Bündnispartner Jena-Optronik GmbH, FSU-IAP und Fraunhofer IOF die gemeinsame System-Entwicklung. Am Fraunhofer IOF wurden umfangreiche FEM-Analysen zum optischen und mechanischen Design, die Fertigung der Spiegel und Gehäusestrukturen sowie die Montage durchgeführt. Das Freiformspiegelsystem besteht aus vier Metallspiegeln, wovon drei als Freiform (Asphäre + Zernikepolynome) und einem weiteren planen Umlenkspiegel ausgeführt sind. Für die Anwendung unter harschen Umweltbedingungen wurde eine neue Materialkombination aus Aluminium-Silizium und Nickel-Phosphor getestet. Der Mismatch des thermischen Verhaltens der Werkstoffe (CTE) konnte auf weniger als 0,5 ppm reduziert werden und ermöglicht die Anwendung des Systems über große Temperaturbereiche ($> \pm 15^\circ\text{C}$) und thermische Gradienten (Faktor zwei höher zum Stand der Technik). Die Spiegel (Abb. 3) wurden in kombinierter Fertigung mittels ultrapräzisen Drehens

with MTF axial $> 50\%$ FOV $> 30\%$ at 20 lp/mm, with a brilliant resolution, high contrast ratio, and a significantly higher mechanical stability. The optical and mechanical design in IG4 glass enables a further significant component reduction, as well as a decrease of production costs. The module consists of two aspheres, an off-axis asphere, and a freeform surface (asphere with additional Zernike polynomials). For this, Fraunhofer IOF realized the optical and mechanical design and analyzed the freeform production of two optical surfaces in a clamping with a common toolpath for diamond processing.

For a high-resolution freeform telescope for Earth observation, the alliance partners Jena-Optronik GmbH, FSU-IAP, and Fraunhofer IOF worked together closely on the system development. At Fraunhofer IOF, comprehensive FEM analyses were carried out for the optical and mechanical design, the manufacturing of the mirrors and housing structures, as well as the assembly. The freeform mirror system consists of four metal mirrors, of which three are designed as a freeform (asphere + Zernike polynomials) and a further one as planar deflection mirror. For application under harsh environmental conditions, a new material combination of aluminum-silicon and nickel-phosphorus was tested. The mismatch of the thermal behavior of the materials (CTE) has been reduced to less than 0.5 ppm and allows the application of the system over large temperature ranges ($> \pm 15^\circ\text{C}$) and thermal gradients (factor two higher than



3

und magnetorheologischem Polierens (MRF) hergestellt. Die Bearbeitung von optischen Flächen, Referenzelementen und Anlagestrukturen erfolgt in einer Aufspannung während der ultrapräzisen Fertigung mit servo-gestützter Bearbeitung (Synchronisation von z-Position und Winkelposition des Werkzeugs). Die finale Formkorrektur und Glättung wurde mittels MRF bis zu einer Qualität von 105 nm PV und 15 nm RMS für einen Freiformspiegel demonstriert. Das entwickelte Design des Freiformspiegelsystems sichert eine Erhöhung des Gesichtsfeldes um 13,4° und eine Modulationstransferfunktion von MTF > 60 % bei 100 lp/mm gegenüber herkömmlichen Teleskopen mit asphärischen Optiken. Die Verzeichnung des Teleskops liegt bei etwa 2,9 %.

Die Partner des regionalen Wachstums kern *fo** präsentierten ihre Ergebnisse auf dem internationalen Workshop »Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms« 2016 in Jena mit mehr als 150 Gästen aus 11 Ländern. Die erreichten Ergebnisse erweitern den Stand der Wissenschaften und Technik und stärken Deutschland als Forschungs- und Industriestandort sowie Jena als eine der führenden Regionen der Freiformoptik in der Welt.

Danksagung / Acknowledgements

Wir danken dem Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für die Finanzierung (FKZ 03WKCK1B) im Rahmen der Initiative »Unternehmen Region – Innovative Regionale Wachstumskerne«.

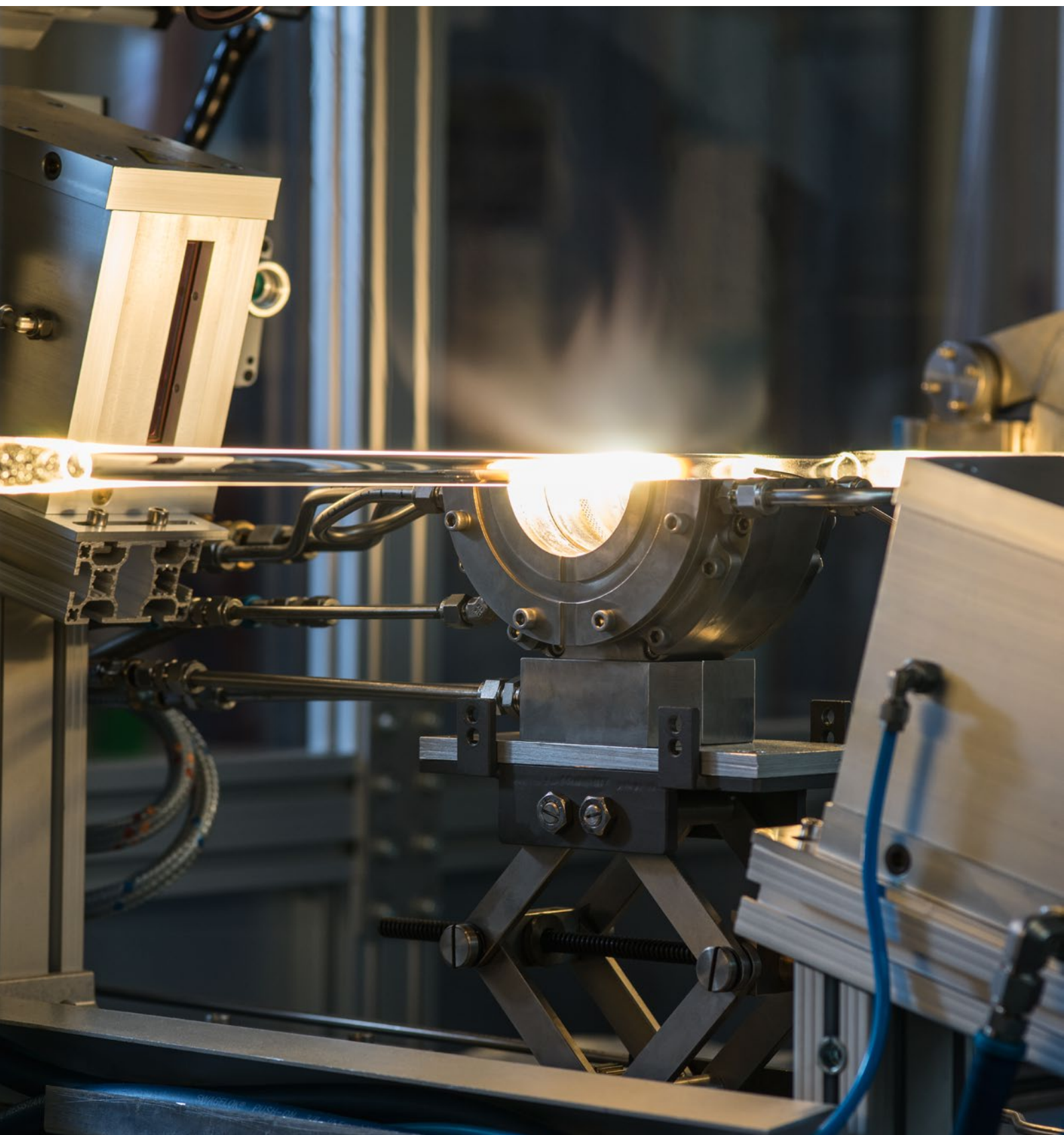
state-of-the-art). The mirrors (Fig. 3) were produced by combined manufacturing of ultra-precise turning and Magneto Rheological Finishing (MRF). The machining of optical surfaces, reference elements, and supporting structures occurs in a clamping during ultra-precise manufacturing with servo-assisted machining (synchronization of z position and angular position of the tool). The final shape correction and smoothing was demonstrated by means of MRF to a quality of 105 nm p.-v. and 15 nm r.m.s. for a freeform mirror. The developed design of the freeform mirror system ensures an increase in the field of vision by 13.4° and a modulation transfer function of MTF > 60 % at 100 lp/mm in contrast to conventional telescopes with aspheric optics. The distortion of the telescope is about 2.9 %.

The partners of the regional growth core *fo** presented their results at the international workshop "Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms" 2016 in Jena with more than 150 guests from 11 countries. The results achieved expand the state-of-the-art sciences and technology and strengthen Germany as a research and industrial location as well as Jena as one of the leading regions of freeform optics in the world.

1 *Ge-Monolith.* | *Ge monolith.*

2 *IG4-Monolith.* | *IG4 monolith.*

3 *Spiegelmodul M1/M3.* | *Mirror module M1/M3.*



NEUES FASERTECHNOLOGIEZENTRUM IN JENA

NEW FIBER TECHNOLOGY CENTER IN JENA

Optische Fasern sind sehr dünne Glasfasern, in denen Licht kontrolliert geleitet und gezielt verändert werden kann, wie zum Beispiel zur Informationsübertragung in der Kommunikationstechnik, als Sensorelement in der Medizin oder auch als Lichtquelle in Faserlasern. Sie liefern zunehmend wichtige Beiträge zur Lösung von dringenden Zukunftsfragen in den Feldern Information und Kommunikation, Energie und Umwelt, Gesundheit und Ernährung, Mobilität und Sicherheit.

Für die Erforschung und Entwicklung dieser optischen Fasern höchster Leistung errichtete die Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen (STIFT) am Standort Jena ein neues Fasertechnologiezentrum. In den Räumlichkeiten des Fasertechnologiezentrums sind Speziallabore für die Fertigung von aktiven und passiven mikro- und nanostrukturierten optischen Fasern entstanden. Darüber hinaus ist ein Ziehturm zur Herstellung der Spezialfasern fertiggestellt worden. Insgesamt investierte die STIFT 6,8 Millionen Euro.

In Anwesenheit des Thüringer Staatssekretärs Markus Hoppe, des Vorstands der STIFT Prof. Werner Bornkessel sowie Vertretern aus Wirtschaft und Wissenschaft wurde am 9. Juni 2016 das Richtfest des neuen Fasertechnologiezentrums gefeiert, welches im 1. Quartal 2017 fertiggestellt wurde.

Die Region Jena, mit den Akteuren Fraunhofer-Gesellschaft, Friedrich-Schiller-Universität, Helmholtz-Institut Jena und dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien, ist heute einer der weltweit führenden Standorte auf dem Gebiet der Optik und Laserentwicklung. »Das neue Fasertechnologiezentrum Jena wird zu den modernsten der Welt gehören. Damit erhält Jena einen weiteren Meilenstein für die Entwicklung und Profilierung der Forschungslandschaft der Region« so Wolfgang Meyer, Vorstand der STIFT.

Optical fibers are very thin glass fibers in which light can be guided and specifically transformed, e.g. for information transmission, as sensor elements in medicine or as a light source in fiber technology. They are contributing more and more to solutions for pressing challenges in the fields of information and communication, energy and environment, healthcare and nutrition, mobility and security.

The Foundation for Technology, Innovation, and Research Thuringia (STIFT) has established a new fiber technology center in Jena to investigate and develop these high-performance optical fibers. The premises of the fiber technology center are equipped with specialized laboratories, which serve the purpose of manufacturing active and passive micro- and nanostructured optical fibers. In addition, the construction of a drawing tower for the preparation of special fibers has been completed. A total of 6.8 million euros was invested by STIFT.

The topping out ceremony was held on June 9, 2016 with the Thuringian State Secretary Markus Hoppe and the executive board of the STIFT Prof. Werner Bornkessel in attendance as well as representatives from industry and science. The building was completed in the first quarter of 2017.

Today the region of Jena is one of the leading locations in the fields of optics and laser development with key players such as the Fraunhofer Society, the Friedrich Schiller University, the Helmholtz Institute Jena and the Leibniz Institute for Photonic Technologies. "The new fiber technology center Jena will be one of the most modern ones in the world. This is another milestone for Jena contributing to its development and shaping the regional research landscape" according to Wolfgang Meyer, executive board of STIFT.

LEFT *Herstellung von Preformen für aktive Laserfasern auf der MCVD-Anlage. | Production of preforms for active laser fiber on the MCVD system.*



INNOVATIONSFORSCHUNG 3Dsensation INNOVATION RESEARCH 3Dsensation

Ziel der Innovationsforschung der Forschungsallianz 3Dsensation ist die Realisierung offener Innovationsprozesse (Open Innovation) und die Anwendung angepasster Innovationsmethoden wie des »Design Thinking«-Ansatzes. Im Rahmen der Projektgruppe »Innofo3D« werden dabei auf Basis empirischer Untersuchungen Erklärungsansätze für die Umsetzung technologiegetriebener Innovationen im Allianz Umfeld generiert. So können marktrelevante Informationen über das Innovationsumfeld und das Innovationsverhalten im Bereich der Mensch-Maschinen-Interaktion für die Mitglieder von 3Dsensation bereitgestellt und im Netzwerk ausgetauscht werden. Um die Innovationsfähigkeit der Partner noch weiter zu steigern und sie besser bei ihren Innovationsprozessen zu unterstützen, ist die Entwicklung angepasster Innovationsinstrumente notwendig. Aus diesem Bedarf heraus konzipierte das Projektteam die Webseite www.innofo3d.de, auf welcher vielfältige Methoden und Werkzeuge zur Durchführung von Kreativ-Workshops für alle Phasen des Innovationsprozesses angeboten werden. Von der Ideenfindung über die Prototypenentwicklung bis hin zur Evaluation können passende und abwechslungsreiche Tools abgerufen werden.

The research alliance 3Dsensation aims at realizing open innovations within its innovation research and applying tailored innovation methods, such as the "Design Thinking" approach. The project group "Innofo3D" takes empirical investigation as a basis for generating explanatory approaches to implement technology-driven innovations in the field of the alliance. Market-sensitive information on the innovative environment and characteristics in the realm of man-machine-interaction can be made available for the members of 3Dsensation and exchanged in the network.

The development of adequate innovation instruments is of great importance in order to promote the innovation competence even further and support partners in the processes. Tailored to these needs, the project team designed the website www.innofo3d.de, which offers numerous methods and tools to realize creative workshops. These varied tools provide solutions for every phase of the innovation process, which range from brainstorming to developing a prototype, and include the final evaluation. The prototype workshop on September 30, 2016 at



Eine gute Gelegenheit, die speziell auf klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) angepassten Innovationsinstrumente anzuwenden, bot der Prototypen-Workshop am 30. September 2016 am Fraunhofer-Institut IOF. Am zweiten Projektauftritt des Vorhabens »Ideen-Invention-Innovation«⁽¹³⁾ beteiligten sich mehrere 3Dsensation-Projekte mit neuartigen Vorhaben und technologischen Ideen. Jährlich werden bis zu zehn Innovationsideen gefördert, gemessen an ihrem Potenzial zur Realisierung disruptiver Ansätze. Die Ideenträger der hochinnovativen Forschungsvorhaben präsentierten im Zuge des Prototypen-Workshops ihr Projekt in Form eines 60-sekündigen Elevator Pitches.

»Die gelungenen Präsentationen der Prototypen im Pitchformat zeigten, wie erfolgreich die Teilnehmer das Angebot des Workshops zu nutzen wussten«, erklärt Projektleiter Dr. Reinhold Pabst. »Es wurde klar, wie groß der Bedarf am Ausbau der Vernetzungsstrukturen und an der Wegbereitung von Kommunikationswegen gerade in Richtung der Anwendungspartner ist. Hier ist nach wie vor das Engagement der Allianz 3Dsensation gefragt.«

Fraunhofer IOF provided an excellent opportunity to apply these instruments that are specifically designed for small- and medium-sized companies. A number of 3Dsensation projects participated in the second call for projects "Ideas-Invention-Innovation" ⁽¹³⁾ with new initiatives and technological ideas. Up to ten innovative ideas are funded every year, and evaluated on the basis of their potential to realize disruptive approaches. The ideas of the highly innovative research projects were presented in a 60-second elevator pitch during the prototype workshop. "The successful presentation of the prototypes in the elevator pitch demonstrates that the participants knew how to take full advantage of the workshop" explains project manager Dr. Reinhold Pabst. "The great demand for extending the networks and providing communication structures especially towards application partners became apparent. The commitment and involvement of the 3D alliance is still highly needed in this process."

TOP Team »Innofo3D«

LASER DISPLAY AND LIGHTING KONFERENZ 16

LASER DISPLAY AND LIGHTING CONFERENCE 16



Vom 4. bis 8. Juli 2016 fand in Jena die Laser Display and Lighting Conference (LDC) statt. Organisiert und durchgeführt wurde die internationale Fachkonferenz vom Fraunhofer IOF, von der Friedrich-Schiller-Universität Jena und dem Abbe Center of Photonics (ACP). Diesjähriger Themenschwerpunkt war die Automobilindustrie, die von zahlreichen hochrangigen Unternehmen wie Audi, BMW und Mitsubishi vertreten wurde. Mit rund 85 Teilnehmern aus 12 Nationen, 34 Fachvorträgen und einem umfangreichen Rahmenprogramm rund ums Thema Optik war somit mehrere Tage lang eine der größten internationalen Fachkonferenzen zum Thema Laser Displays und Lichttechnik am Beutenberg Campus zu Gast. Neben wissenschaftlichen Fachvorträgen über neueste wissenschaftliche und technische Ergebnisse wurden in einer Industrieausstellung aktuelle Entwicklungen von Unternehmen der Optik- und Laserindustrie präsentiert. Ebenso stellten renommierte Forschungsinstitute wie die Universität Tokio, die Friedrich-Schiller-Universität Jena und die Universitäten Ilmenau und Osaka ihre neuesten Ergebnisse vor.

Als einer der erfolgreichsten Optikstandorte Europas rangiert die Region Jena unter den Spitzenreitern der deutschen Optikindustrie. Nicht zuletzt aufgrund seiner berühmten Historie, welche die Stadt den Unternehmern Carl Zeiss, Ernst Abbe und Otto Schott zu verdanken hat, gilt Jena als Wiege der modernen Optik. Neben namenhaften Wirtschaftsunternehmen lockte jedoch auch die Nähe zu Bildungs- und Forschungseinrichtungen die Veranstalter der LDC, die üblicherweise in Japan stattfindet, zum ersten Mal nach Jena.

Zu den Programmhighlights der Konferenz zählten neben der offiziellen Eröffnung des Abbe Center of Photonics, die Verleihung des Green Photonics Nachwuchspreises, ein Dinner »Under the Stars« im Zeiss-Planetarium Jena sowie ein Besuch bei BMW München mit exklusiver Führung durch die Forschungslabore. Die Konferenz wurde gesponsert von der Optical Society of Japan und OptoNet e.V. und durch zahlreiche akademische Verbände unterstützt, darunter die Robert Bosch Corporation und die Laser Display Technology Group (LDT).

From July 4 to 8, 2016, the Laser Display and Lighting Conference (LDC) took place in Jena. The international symposium was organized and carried out by Fraunhofer IOF, the Friedrich Schiller University and the Abbe Center of Photonics (ACP). This year's focus was on the automotive industry, which was represented by renowned companies such as Audi, BMW and Mitsubishi. The LDC at the Beutenberg Campus in Jena is one of the biggest international symposia on the topic of laser displays and lighting with 85 participants from 12 nations, 34 technical talks and a well-rounded program on the issues of optics. Besides technical talks on the latest scientific results, companies from the field of optics and lasers could present their current developments in an industrial exhibition.

As one of the most successful optics locations in Europe, the region of Jena is one of the leading players in this scene. Carl Zeiss, Ernst Abbe, and Otto Schott laid the foundations of modern optics here in Jena, which is regarded as the cradle of modern optics due to its famous history in this field. Besides well-known manufacturing companies in this sector, the organizers of the LDC were drawn to this location because of its proximity to education and research institutions. For this reason the conference, which usually takes place in Japan, was relocated to Jena for the first time.

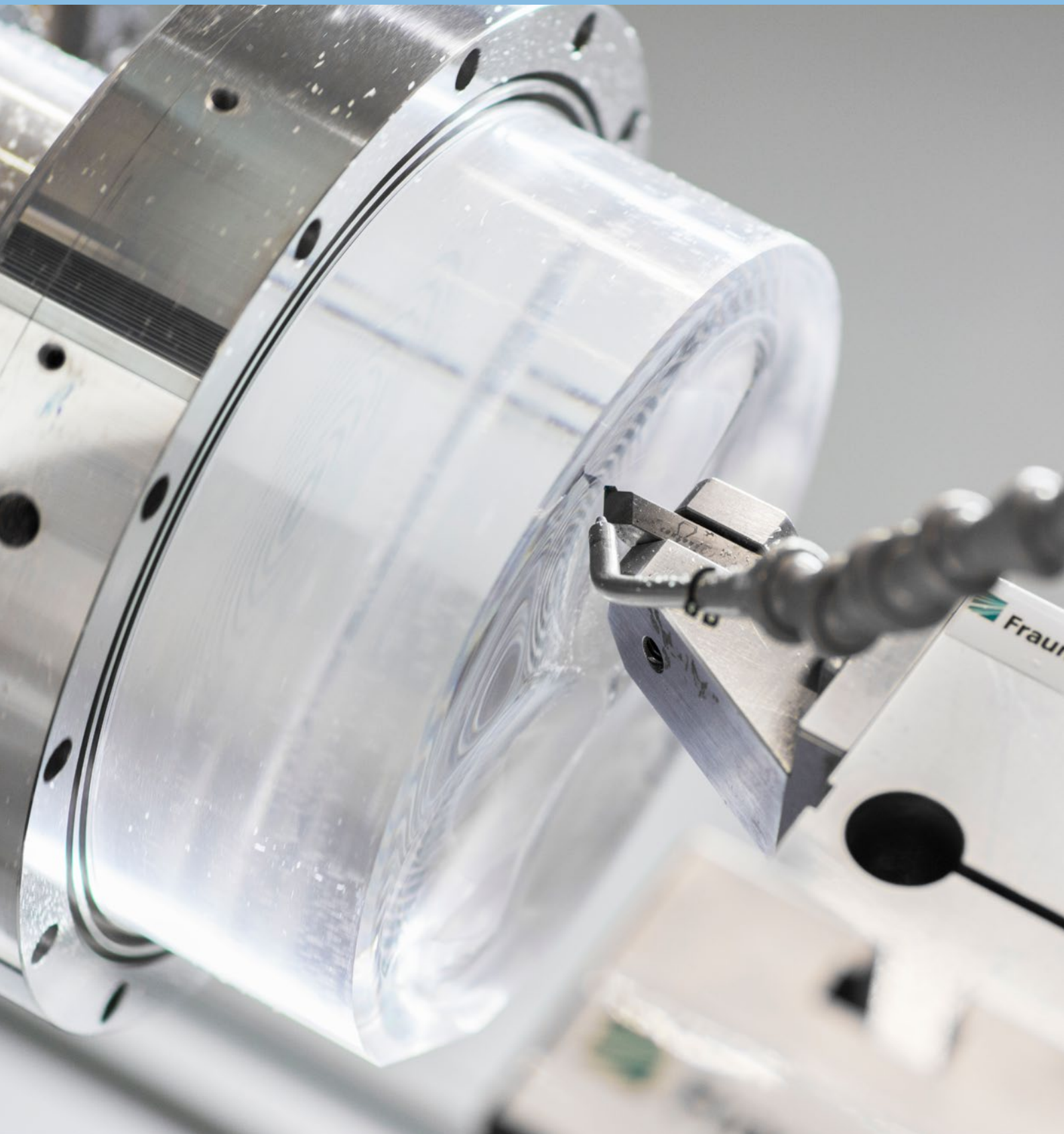
Some of the highlights were the official opening ceremony of the Abbe Center of Photonics and the award ceremony for the Green Photonics Prize for young scientists. The conference also featured a dinner "Under the Stars" in the Zeiss Planetarium Jena, as well as a company visit to BMW Munich with an exclusive guided tour through the research laboratories. The Optical Society of Japan and OptoNet e.V. as well as various academic associations such as the Robert Bosch Corporation and the Laser Display Technology Group (LDT) sponsored the conference.

LEFT Preisträger des Green Photonics Nachwuchspreises 2016. |

Awarded scientist of the Green Photonics prize 2016.

AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2016

SELECTED RESULTS 2016



Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative optische Systeme zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung bis hin zu dessen Anwendung. Das Leistungsangebot umfasst die gesamte photonische Prozesskette vom optomechanischen und optoelektronischen Systemdesign bis zur Herstellung von kundenspezifischen Lösungen und Prototypen. Dazu verknüpft es angewandte Forschung und Entwicklung mit exzellenter Grundlagenwissenschaft in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Das Fraunhofer IOF ist eine weltweit führende Forschungseinrichtung für Photonik und optische Systemtechnik mit globaler Strahlkraft. Seine Stellung stützt sich sowohl auf herausragende, öffentlich finanzierte Vorlaufforschung als auch auf direkte Auftragsforschung in Kollaboration mit strategischen Partnern aus Forschung und Industrie. Auf der Grundlage wissenschaftlicher und technologischer Exzellenz gestaltet es die zukünftigen Entwicklungen in Optik und Feinwerktechnik auf globaler Skala maßgeblich mit.

Einige herausragende Forschungsergebnisse des Jahres 2016 sind auf den folgenden Seiten dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich direkt auf die Geschäftsfelder:

- Optische Komponenten und Systeme
- Feinmechanische Komponenten und Systeme
- Funktionale Oberflächen und Schichten
- Photonische Sensoren und Messsysteme
- Lasertechnik

Fraunhofer IOF develops innovative optical systems to control light from its creation to its application. Our service range covers the entire photonic process chain from optomechanical and optoelectronic system design to the manufacturing of customized solutions and prototypes. It combines applied research and development with scientifically excellent basic research in close cooperation with the Institute of Applied Physics at the Friedrich Schiller University Jena.

Fraunhofer IOF is a worldwide leading and pioneering research institute for photonics and optical system engineering with global appeal. On the basis of scientifically excellent activity in its core areas of expertise, it plays a leading role in future developments in optics and precision engineering. Outstanding results of basic research and strategic collaborations with industry partners demonstrate the research strength of Fraunhofer IOF. Its work is performed both in the context of publicly funded initial research projects as well as directly on behalf of industry.

The following pages present selected research results obtained last year. The examples show solutions in the following business areas:

- Optical components and systems
- Precision engineering components and systems
- Functional surfaces and layers
- Photonic sensors and measuring systems
- Laser technology

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



OPTISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME

OPTICAL COMPONENTS AND SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF entwickelt kundenspezifische optische und mikrooptische Komponenten und Systeme für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche. Alleinstellungsmerkmal ist dabei die Beherrschung der kompletten photonischen Prozesskette – vom Design über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung – sowie die Bereitstellung von sowohl klassischen Bearbeitungsverfahren als auch von Grauton- und Elektronenstrahlolithografie.

So werden unter anderem sphärische, asphärische und freiform-optische Komponenten und Systeme für Objektive, Teleskope und Spektrometer entwickelt. Ebenso werden refraktive und diffraktive Komponenten in Gläsern und Halbleitermaterialien bis hin zu ein- und doppelseitigen Mikrolinsenarrays hergestellt. Die Herstellung von Gittern, Faserlasern und faseroptischer Komponenten runden das Portfolio ab.

Die nachfolgenden Beiträge zeigen die in diesem Geschäftsfeld in 2016 abgeschlossenen Projekte. Bearbeitet wurden unter anderem Themen wie Metamaterialien und nichtlinearer Optik über lithographische Techniken, Mikrooptiken, deformierbare Spiegel, hin zu Freiform-Spiegeloptiken.

Fraunhofer IOF develops customer-specific optical and micro-optical components and systems for a variety of different applications. The unique focus here is the mastery of the complete photonic process chain – from design to production and characterization, as well as the provision of classical processing methods, and greyscale and electron beam lithography.

Using this know-how and these tools, we develop spherical, aspherical, and free-form optical components and systems for objectives, telescopes, and spectrometers. In the same way, refractive and diffractive components in glasses and semiconductor materials are produced up to single and double-sided microlens arrays. The production of grids, fiber lasers, and fiber-optic components complete the portfolio.

The projects completed in this business field in 2016 are shown in the following contributions. Among other things, topics such as metamaterials and nonlinear optics, lithographic techniques, microoptics, deformable mirrors, and free-form mirror optics were investigated.

LEFT *Freiformlinse formt ein monochromatisches Bild aus kollimierter Eingangsverteilung. | Monochrome image formed by the freeform.*



RGB-PROJEKTOR MIT VIER FREIFORMEN AUF EINEM SUBSTRAT

RGB PROJECTOR WITH FOUR FREEFORMS ON A SINGLE SUBSTRATE

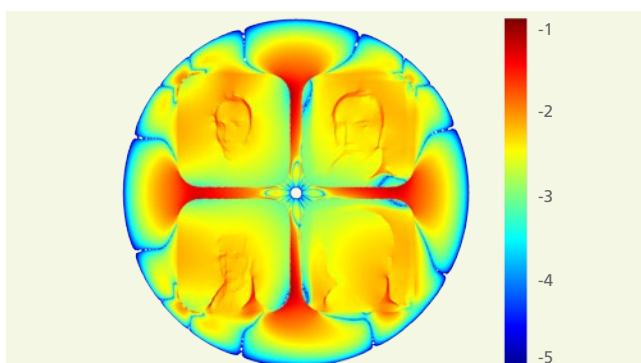
Strahlformungsoptiken erlauben vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, von der Laserstrahlformung bis hin zu Beleuchtungsanwendungen in der Architektur. Dabei lassen sich mittlerweile selbst für komplexe Zielverteilungen strahlformende Optiken numerisch berechnen. Zudem ermöglichen ultrapräzise (UP) Fertigungstechniken die Herstellung feiner Freiform-Strukturen über eine große Fläche. Zu Demonstrationszwecken wurde im Projekt KoSimO ein Projektor mit Freiformlinse gebaut. Dieser überlagert drei RGB-Farbkanäle zu einem Bild. Dargestellt wird Joseph von Fraunhofer, der Namensgeber der Fraunhofer-Gesellschaft, in einer Popart-Variante. Zusätzlich ist ein monochromer Kanal vorhanden. Kernstück des Projektors ist eine Freiformlinse mit 160 mm Durchmesser aus PMMA. Die Freiformfläche besteht aus vier Segmenten, die jeweils aus einem kollimierten Laserstrahl die gewünschten Zielverteilungen formen. Diese überlagern sich dann auf der Projektionsfläche in 1 m Abstand zu einem farbigen Bild von 300 mm Kantenlänge.

Da die Zielprofile im Gegensatz zu den gaußschen Profilen der umzuformenden Laserstrahlen keine Symmetrien aufweisen, ist bei der Flächenberechnung die Verwendung komplexer numerischer Algorithmen notwendig. Mit dem verwendeten numerischen Verfahren [2] lassen sich zudem die steilen Intensitätsgradienten, sowie die zahlreichen Graustufen der Abbildung umsetzen. Basierend auf der Energiebilanzgleichung und dem Brechungsgesetz gewährleistet es die Stetigkeit der Fläche, was zur Vereinfachung der Herstellbarkeit und der Verminderung von

Beam shaping lenses have many applications from laser optics to illumination in architecture. It is possible to calculate beam shaping lenses even for complex image distributions. Ultra-precision (UP) manufacturing techniques further allow the production of fine freeform structures on large surfaces. Within the project KoSimO a projector with a freeform lens has been built, which overlays three RGB images to one color image. The motive is Joseph von Fraunhofer, after whom the Fraunhofer society was named. In addition, a fourth channel projects the complete image in a monochrome way. The heart of the demonstrator is a freeform lens made of PMMA with a diameter of 160 mm. This includes four segments on one substrate. Each segment forms its desired image distribution to be overlaid to an image of 300 mm width in a distance of 1 m. The color channels are automatically switched and combined in different manners to give a pop art impression. Opposite to the Gaussian laser profile, the aimed distribution is non-symmetric, which requires complex numerical algorithms for surface calculation [2]. It also works with steep intensity gradients as well as with larger dynamics of grey values of the aimed image distribution. The calculation method is based on the energy balance as well as the law of refraction. It fulfils the demand of a continuous surface description, which simplifies the manufacturing and reduces diffraction effects. Further, in paraxial approximation, the design process for collimated incoming rays can be divided into two separate steps, which reduces the calculation effort. All freeform surfaces are manufactured on the same substrate in

1 **Demonstrator.** | Demonstrator.

Beugungseffekten der Freiform führt. In /2/ konnte zudem gezeigt werden, dass es möglich ist, den Freiformdesignprozess für kollimierte Eingangsstrahlen in einer paraxialen Näherung in zwei separate Schritte zu zerlegen, was den Berechnungsaufwand reduzieren kann. Die notwendige Toleranz für die Überlagerung der vier Zielverteilungen der einzelnen Bilder ist durch die gemeinsame Fertigung aller Flächen mittels UP-Bearbeitung gewährleistet. Dabei wird zunächst die Grundform mit einer Genauigkeit von $< 50 \mu\text{m}$ vorgefertigt. Im Anschluss erfolgt die UP-Bearbeitung in optischer Qualität mit Hilfe eines Diamantwerkzeuges. Der Werkzeugpfad wurde unter Minimierung der Beschleunigung generiert. Diese Berechnung berücksichtigte außerdem die Begrenzung der Gradienten- und Hubterme durch die Bearbeitungsmaschine /3/. Zudem ist ein erhöhter mathematischer Aufwand notwendig, um die Übergänge zwischen den einzelnen Funktionsflächen auf dem Substrat zu verstetigen. Basierend auf Raytracing-Simulationen wurden die berechneten Flächenbeschreibungen während der Entwicklung geprüft und der Geräteaufbau konzipiert. Generell weist das Fraunhofer IOF Expertise für Design und Fertigung von sowohl strahlformenden als auch abbildenden Freiformoptiken auf.



2 Beschleunigung (logarithmisch in Einheiten der Gravitation g aufgetragen). Gut zu erkennen sind die filigranen Strukturen, die die Intensitätsverteilung auf dem Schirm erzeugen. | Acceleration (logarithmic, in units of gravity g), the fine structures of the image can also be recognized here.

one step. This ensures the tolerance for a correct superposition of the three images in the projection plane. At the beginning, the non-symmetrical pre-shape of the lens is manufactured with a tolerance below $50 \mu\text{m}$. However for optical application, a higher precision is necessary. Therefore the freeform surface is processed by an UP turning machine with a diamond tool in the next step. The acceleration of the machine toolpath is minimized by using a penalty functional. Within this optimization, gradients and sag values are controlled in accordance to the machine constraints /3/. Further, the transition areas between the optical surfaces had to be filled with continuous values to prevent undesired vibrations and accelerations during the turning. In the development, the intermediate steps of the calculated surface descriptions have been investigated with raytracing simulations. These have also been used for the construction of the demonstrator as well as for the design of the collimation optics. In general Fraunhofer IOF offers expertise in the design and manufacturing of beam shaping freeforms as well as imaging freeform systems.

References / Literatur

/1/ B. Satzer, C. Bösel, J. Hartung et al.: Photonik (2016).

/2/ C. Bösel and H. Gross: Opt. Express, 24, 14271 (2016).

/3/ M. Beier, J. Hartung et al.: Appl. Optics 54, 3530 (2015).

AUTHORS

Britta Satzer

Christoph Bösel¹

Robert Jende

Kevin Srokos

Johannes Hartung

¹ Institut für Angewandte Physik,

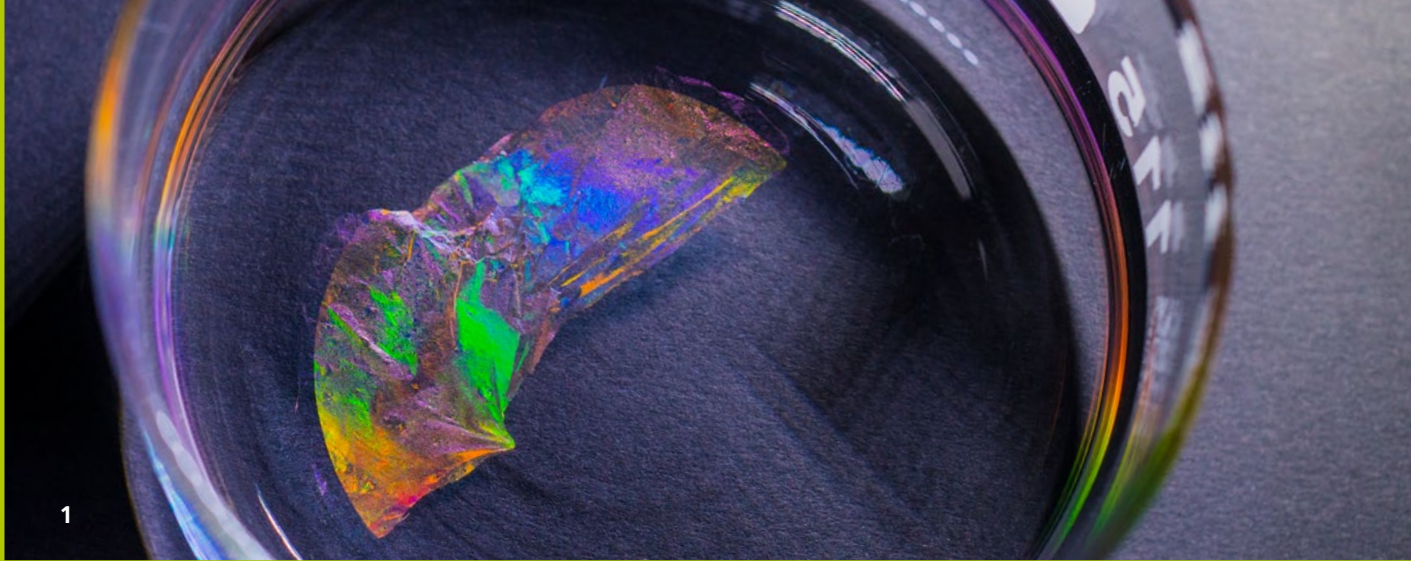
Friedrich-Schiller-Universität Jena

CONTACT

Britta Satzer

Phone +49 3641 807-243

britta.satzer@iof.fraunhofer.de



VOLUMEN-METAMATERIALIEN VOLUMINOUS METAMATERIAL

Optische Materialien sind essentiell für die Leistungsfähigkeit optischer Elemente und Systeme. Sehr hohe Erwartungen bestehen bei sogenannten Metamaterialien, einer künstlichen Ansammlung von Strukturen mit Abmessungen im Bereich von wenigen nm bis hin zu einigen 100 nm. Die geometrische Form und der Baustoff der Nanostrukturen bestimmen die optischen Eigenschaften eines Metamaterials. Eine Realisierung erfolgt mittels chemischer (bottom-up) oder lithografischer Prozesse (top-down), wobei letztere die größten Gestaltungsfreiheiten bieten. Metamaterialien besitzen u. a. spektakuläre Eigenschaften wie negative Brechung, Subwellenlängenauflösung oder Unsichtbarkeit /1/.

Die Herstellung eines voluminösen Metamaterials erfordert die Bereitstellung einer extrem hohen Anzahl an Nanostrukturen. Gleichzeitig ist eine definierte oder stochastische Verteilung in einer 3-dimensionalen Matrix zu erfüllen. Im Rahmen eines DFG-Projektes werden am Leistungszentrum Photonik lithografische Technologien entwickelt, welche geeignet sind, die Nanostrukturen in großer Anzahl herzustellen und anschließend durch Ablösung und Weiterverarbeitung in Volumenmaterialien einzubetten. Wir entwickeln diesen Prozess derzeit auf Basis diskusförmiger Nanostrukturen, bestehend aus einem Au-SiO₂-Au-Stapel. Diese Geometrieform eignet sich hervorragend zur Realisierung eines negativen Brechungsindex /2/. Zur Erlangung eines Volumenmaterials werden die Nanostrukturen von einer Membran gefasst, vom Substrat abgezogen (Abb. 1) und durch Zusammenballen in ein Volumen verdichtet. Im Zuge der Verdichtung entsteht eine zufällige dreidimensionale Verteilung

Optical materials are essential to the performance of optical elements and systems. There are very high expectations in so-called metamaterials, an artificial collection of structures with dimensions in the range of a few nm up to some 100 nm. The geometry and the substance of nanostructures determine the optical properties of metamaterials. A realization is achieved by chemical (bottom-up) or lithographic processes (top-down), where the latter provide the greatest freedom within design. Metamaterials offer spectacular features such as negative refraction, sub-wavelength resolution, or cloaking /1/.

The production of voluminous metamaterial requires an extremely high number of nanostructures. Simultaneously, a defined or stochastic distribution in a 3-dimensional matrix is required. Within the frame of a DFG project, lithographic technologies are developed at the High Performance Center for Photonics to allow the production of a huge amount of nanostructures and transfer- and embeddable into a voluminous material.

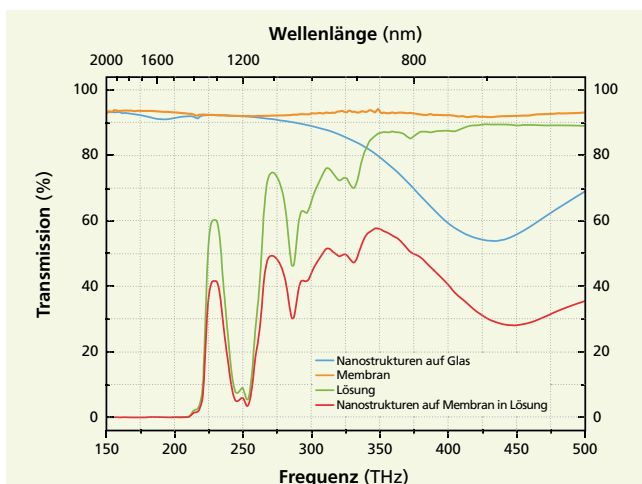
At present we are developing this process for disc-shaped nanostructures, consisting of an Au-SiO₂-Au stack. This design is ideal to realize a negative index of refraction /2/. After lithographic definition, the nanostructures are clenched by a membrane and peeled-off the substrate (Fig. 1). The optical functionality remains intact even after releasing the membrane (Fig. 2). Still supported by the membrane, the nanostructures will be clustered and embedded into a transparent medium. During transfer, the nanostructure orientation becomes random resulting in three-dimensional isotropic metamaterial.

1 *Freischwebende Membran in acetonhaltiger Lösung. Das Schimmern in Regenbogenfarben stammt von den gefassten Nanostrukturen. | Floating membrane in acetone-containing solution. The iridescence stems from the embedded nanostructures.*

der Nanostrukturen. Die transmissionsspektroskopische Untersuchung zeigt, dass die Nanostrukturen auch nach Ablösen optisch intakt bleiben (Abb. 2).

Durch die hochgradige Flexibilität und Dehnbarkeit der Membran ist auch ein Einsatz im Bereich »Wearable Technology« möglich. Kleidung mit optischen Signalgebern oder eingearbeiteter Überwachung von gesundheitsrelevanten Aspekten bzw. Umwelteinflüssen wären denkbar. Ferner erlaubt die ultra-flexible Membran einen Transfer der optischen Nanostrukturen auf beliebige Oberflächen. Für die Lithografie schwer zugängliche Elemente und Komponenten könnten idealerweise mit der Membran und deren optischer Funktion »beklebt« werden.

Die Untersuchungen werden mit finanzieller Unterstützung der DFG (Projekt KL1199/6-1) durchgeführt.



2 Optische Transmissionsspektren von: Nanostrukturen auf Glas (blau), Membran (gelb), acetonhaltiger Lösung (grün) und Nanostrukturen auf Membran in Lösung (rot). |

Optical transmittance spectra of: nanostructures on glass (blue), membrane (yellow), acetone-containing solution (green) and nanostructures on membrane in solution (red).

The pronounced flexibility and elasticity of the membrane might enable usage as "Wearable Technology". Clothing with optical signalling devices or integrated monitoring of health aspects and environmental impacts would be possible. In addition, the ultra-flexible membrane allows for a transfer of optical nanostructures onto any surface. Elements and components difficult to process with lithography could ideally be laminated with the membrane and their optical functionality.

The investigation was carried out with financial support from Deutsche Forschungsgemeinschaft – DFG (project KL1199/6-1).

References / Literatur

- /1/ N. Fang, H. Lee, C. Sun, X. Zhang: Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens, Science, 308(5721), 534-537 (2005).
- /2/ V. Shalaev, W. Cai, U. Chettiar, H. Yuan, A. Sarychev, V. Drachev, A. Kildishev: Negative index of refraction in optical metamaterials, Optics letters, 30(24), 3356-3358 (2005).

AUTHORS

Kay Dietrich¹

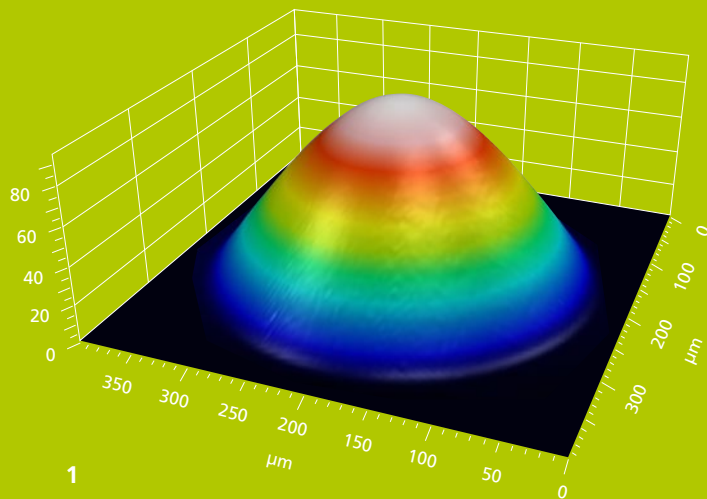
¹ Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

CONTACT

Kay Dietrich

Phone +49 3641 947-834

dietrich.kay@uni-jena.de



TIEFE MIKROOPTISCHE STRUKTUREN MIT LED-BASIERTER GRAUTONLITHOGRAPHIE DEEP MICRO-OPTICAL ELEMENTS BY LED-BASED GRAYSCALE LITHOGRAPHY

Der Einsatz von mikrooptischen Elementen erlaubt eine signifikante Steigerung der Funktionalität optischer Systeme auf kleinstem Bauraum. Direktschreibende Grautonlithographie hat sich als eine der flexibelsten und genauesten Herstellungsmethoden für die Realisierung von optischen Mikrostrukturen etabliert. Durch eine konsequente Weiterentwicklung des Schreibprozesses mit dem LED-basierten Lithographie-Tool »High Five« konnten Oberflächenprofile mit PV-Werten bis zu 100 µm realisiert werden. Damit werden typische Werte von kommerziell verfügbaren laserbasierten Anlagen um das Fünffache überboten! Die Profile bleiben dennoch kontinuierlich aufgrund quasi unbegrenzter Dynamik und gezielter Anwendung von Mehrfachbelichtungen. Das System nutzt einen LCoS Mikrobildgeber und ermöglicht gegenüber einem scannenden Schreibstrahl eine um mehrere Größenordnungen schnellere Belichtung im Step-und-Repeat-Prinzip. Die für direktschreibende Verfahren typischen Belichtungsartefakte, wie beispielsweise Schreib-Anschlusspuren, werden bereits bei der Belichtungsdatenerstellung berücksichtigt und weitestgehend vorkorrigiert. Die Formabweichung resultiert mit unter 0,3 % des PV-Wertes.

Das Verfahren eignet sich besonders für die Herstellung optisch-relevanter Mikrostrukturen, wie dichtgepackte Linsenarrangements oder refraktive Freiform-Arrays,

The use of micro-optical elements offers a significant increase in functionality for optical systems with minimal space requirements. Direct writing grayscale lithography has become one of the most flexible and precise technologies for the manufacturing of optical microstructures. The consequent improvement in the writing process results in surface profiles with peak-to-valley heights up to 100 microns, using the LED-based lithography tool "High Five". In doing so, we surpass typically specified writing depths of commercially available laser-based devices by factor five. Nevertheless, the profiles remain stepless, because of quasi-infinite dynamics and well-directed multi-pass exposure. The lithography tool relies on the homogenized illumination of an LCoS micro imager device and allows a faster exposure by several orders of magnitude due to the step and repeat principle, compared to a scanning laser beam of conventional laser writers. Typical stitching artefacts of direct writing principles are already considered in the level of exposure data generation and are suppressed as far as possible. The resulting shape deviation is below 0.3 % of the peak-to-valley value.

The method is particularly suitable for the generation of effective optical microstructures, such as closed-packed lens arrangements or refractive freeform arrays, Fresnel elements for imaging purposes, achromatic diffusor

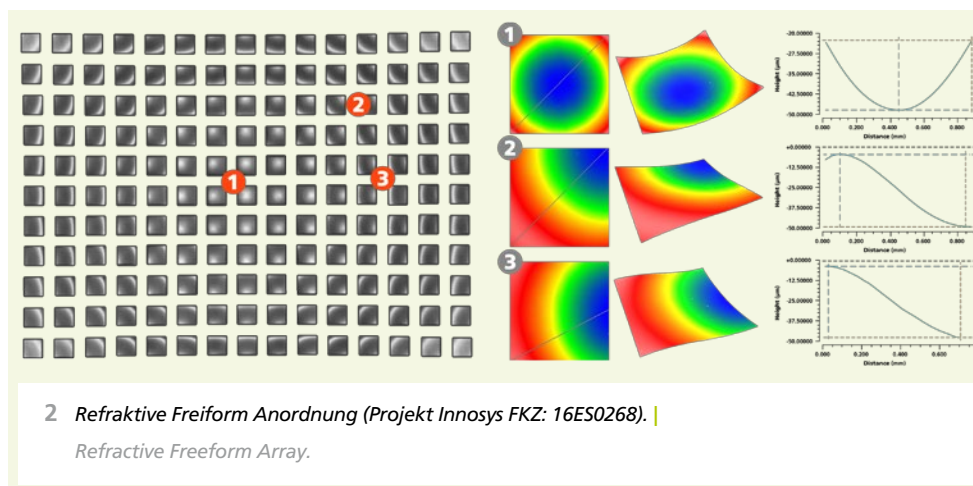
1 Asphäre mit Pfeilhöhe von 93 µm. | Asphere with sag height of 93 µm.

abbildende Fresnellinsen oder -spiegel, achromatische Diffusorstrukturen, Mikroprismen sowie Retroreflektoren. Mit Flächenfüllfaktoren von faktisch 100 % und einer erreichbaren Flankensteilheit bis über 80° erlaubt die Technologie die Erzeugung von Masterstrukturen für hocheffiziente optische Bauelemente. Diese können direkt für die Herstellung von Werkzeugen für Replikationstechnologien wie UV-Abformung, Heißprägen oder Spritzguss genutzt werden, oder in verschiedene Materialien, z. B. Kieselglas, Borofloat-Glas und Silizium, durch reaktives Ionenätzen (RIE) übertragen werden.

Literatur / References

/1/ H.-C. Eckstein, U. D. Zeitner, R. Leitel, M. Stumpf, P. Schleicher, A. Bräuer, A. Tünnermann: High dynamic grayscale lithography with an LED-based micro-imager stepper, SPIE Proc. 9780, Optical Microlithography XXIX, 97800T (15 March 2016).

patterns, microprisms, and retro reflectors. Having quasi 100 % filling factor and gaining a maximum slope angle above 80° for edges, the technology enables the mastering for highly efficient optical elements. These are the origins for replication tools for molding, hot embossing, and injection molding, or for the transfer into diverse materials like fused silica, borofloat glass, or silicon by reactive ion etching (RIE).

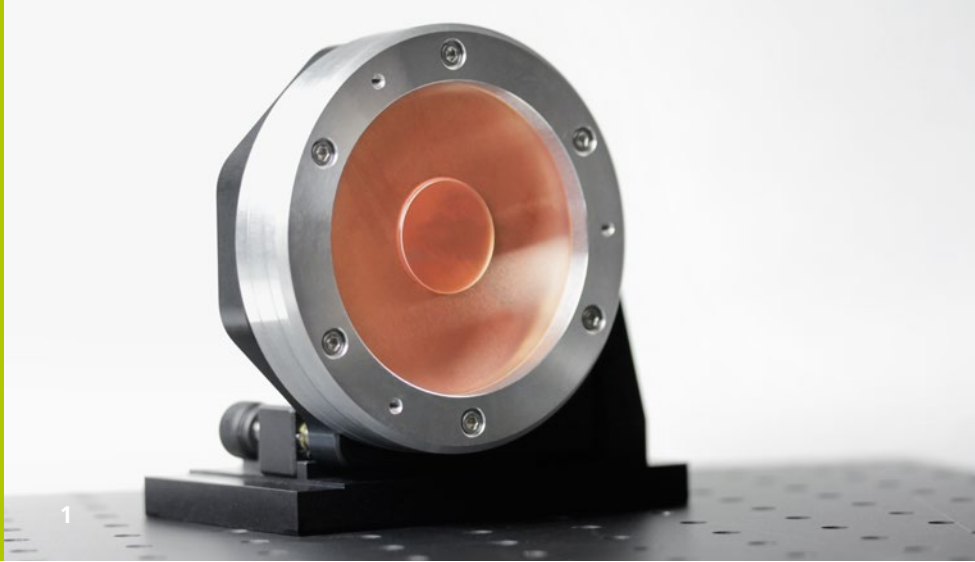


AUTHORS

Robert Leitel
Sylke Kleinle
Marko Stumpf
Peter Dannberg

CONTACT

Dr. Robert Leitel
Phone +49 3641 807-375
robert.leitel@iof.fraunhofer.de



DYNAMISCHER FOKUSSPIEGEL FÜR DIE LASERMATERIALBEARBEITUNG

DYNAMIC FOCUS-SHIFTING MIRROR FOR LASER PROCESSING

Der dynamische Fokusspiegel (Abb. 1) dient zur schnellen Brennweitenänderung in optischen Systemen (Abb. 2) und kann beispielsweise zur schnellen Fokuslagenanpassung in Lasermaterialbearbeitungsmaschinen eingesetzt werden. Er besteht aus einem dünnen dielektrisch beschichteten Glassubstrat, welches mit einem piezoelektrischen Scheibenaktor verklebt wird und so einen unimorphen Spiegel bildet. Zur Verbesserung der Wärmeableitung und zur Erhöhung der Laserfestigkeit ist eine dünne Kupferschicht in den Spiegel integriert. Beim Anlegen einer Spannung an den Scheibenaktor zieht sich dieser zusammen und wölbt das Spiegelsubstrat auf (Abb. 2). Durch das besondere mechanische Design kann die plane Oberfläche des Spiegels auf Krümmungsradien von bis zu 3,4 Metern gewölbt werden.

In einem praktischen Nachweis wurde dieser Fokusspiegel (Abb. 1) mit einem kommerziellen Schneidkopf mit 100 mm Brennweite kombiniert. In diesem Aufbau wurde der kollimierte Laserstrahl einer Multimode Laserquelle unter 45° vom Fokusspiegel abgelenkt und anschließend vom Schneidkopf fokussiert. Durch die Auslenkung des Spiegels wurde bei gleichbleibender Strahlqualität eine Brennweitenänderung von 3,6 mm erzielt. Die Größe der Brennweitenänderung wird hierbei maßgeblich durch die nominelle Brennweite der Schneidoptik sowie den Krümmungsradius des Fokusspiegels bestimmt. Bei Kombination mit einem nominellen 200 mm Schneidkopf sind sogar 20 mm Brennweitenänderung erzielbar.

The dynamic focus-shifting mirror enables fast focal length changes in optical systems and can be used, for instance, to adapt the focus position in laser processing machines (Fig. 2). The mirror setup is based on a unimorph concept using a piezoelectric disc bonded to a thin glass substrate with a highly reflective multilayer coating (Fig. 1). An integrated copper layer improves the heat dissipation and thus increases the mirror's laser damage threshold. When a voltage is applied to the piezoelectric disc, it bends the mirror substrate, which in turn changes the radius of curvature of the mirror (Fig. 2). This specific mechanical design enables the mirror surface to bend down to a radius of curvature of 3.4 m.

In a verification test, the focus mirror was combined with a commercial processing head. A collimated beam from a multi-mode laser source was reflected at an angle of 45° by the focus mirror and afterwards focused by the processing head. Through the actuation of the mirror, a focus shift of 3.6 mm with stable optical beam quality was achieved. The focal length range is defined by the nominal focal length of the processing head and the mirror's radius of curvature. If the mirror is combined with a processing head of 200 mm focal length, an even larger focal length change of 20 mm is achievable.

The mirror's step response was characterized and optimized by modulating the excitation signal. In doing so, a short

1 *Dynamischer Hochleistungs-Fokusspiegel. | Dynamic high-power focus-shifting mirror.*

Neben dem Arbeitsbereich wurde auch die Spiegeldynamik charakterisiert und mithilfe eines modulierten Ansteuerungssignals optimiert. Der Fokusspiegel erreicht Antwortzeiten von weniger als 2 ms für einen Vollhub und ist damit deutlich schneller als vergleichbare kommerzielle adaptive Fokussier Spiegel. Dadurch soll für den Anwender ein Zeitersparnis im Vergleich zu bestehenden Lösungen für adaptive Spiegel oder Linsenschieber/-steller erzielt werden.

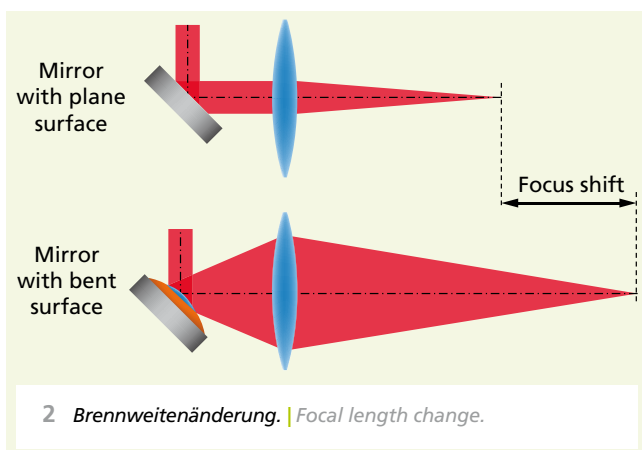
Als Anwendungsbereich sehen wir vorwiegend laserbasierte Schneid- und Schweißapplikationen. Grundlage hierfür sind die enorme Brennweitenänderung sowie die herausragenden thermischen Eigenschaften des Spiegels, die einen problemlosen Einsatz bis 6 kW Laserleistung (Dauerstrich) bei 1064 nm Wellenlänge ermöglichen. Hierbei zeigt sich ein sehr geringer und leistungsunabhängiger Einfluss der Spiegeloberfläche auf die Strahlqualität. Die Beugungsmaßzahl M^2 wird durch den Einsatz des Fokusspiegels im Mittel von 2 (nur Laser) auf 3 angehoben.

Der Spiegel ist für 1" Strahldurchmesser ausgelegt und kann über kommerzielle 3" Halter in Bearbeitungsköpfe integriert werden. Eine anwenderbezogene Anpassung hinsichtlich der Spiegelbeschichtung, der Strahlapertur oder eine Auslegung des Spiegels als 90° Umlenkspiegel ist möglich.

response time of less than 2 ms for full deflection is possible, which is significantly faster than commonly known state of the art solutions for focus shifting. Thanks to the actuator's short response time, it reduces the laser processing time compared to commercial solutions for focus shifting.

Based on the mirror's extensive focal length change and its convincing thermal properties, we see application fields primarily in laser cutting and welding. As proven by our measurements, the mirror can be used for high-power applications up to 6 kW laser power (continuous wave) at 1064 nm wavelength. The mirror's surface only has a small and non-power-related influence on the beam quality factor M^2 , which was slightly increases from $M^2 = 2$ (only laser source) to $M^2 = 3$ by using the focus mirror.

The mirror is designed for a beam diameter of 1" and can easily be integrated into processing heads using commercially available 3" mirror mounts. Application-specific customizations such as coatings for further laser wavelengths, beam aperture or the adaption of the mirror as 90° deflection mirror are possible.

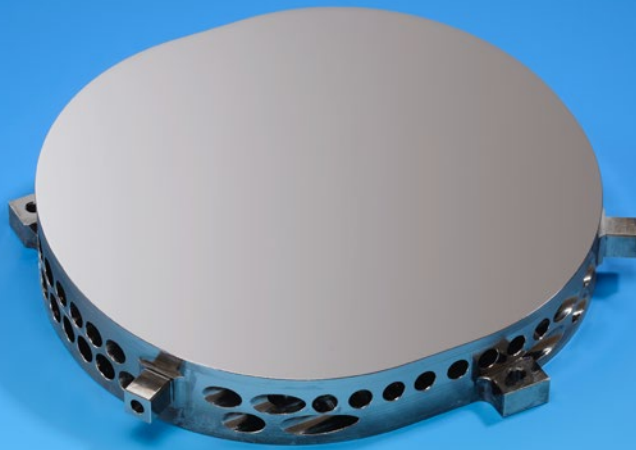


AUTHORS

Teresa Kopf
Claudia Reinlein

CONTACT

Dr. Claudia Reinlein
Phone +49 3641 807-343
claudia.reinlein@iof.fraunhofer.de



OPTISCHE KOMPONENTEN FÜR DEN ENMAP HYPERSPEKTRAL-IMAGER

OPTICAL COMPONENTS FOR THE ENMAP HYPERSPECTRAL IMAGER

EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) ist eine deutsche hyperspektrale Satellitenmission zur Erdbeobachtung, welche durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) initiiert und gefördert wird. Der Missionsstart ist für 2019 geplant. Das optische System besteht aus einem Teleskop (Three Mirror Anastigmat / TMA) und zwei unabhängigen Spektrometern für den sichtbaren (VNIR) und den kurzwelligen Infrarotbereich (SWIR) /1/. Die Spiegel für das Teleskop und das Spektrometer wurden am Fraunhofer IOF in enger Zusammenarbeit mit OHB design und gefertigt. Dabei wurde als Grundmaterial die etablierte Legierung Aluminium 6061T6 eingesetzt. Auf die ultrapräzise mittels Diamantdrehen gefertigten Spiegel wurde eine polierbare amorphe Nickel-Phosphor-Schicht (NiP) mit einem Phosphorgehalt zwischen 10 % und 12 % aufgebracht. Die darauffolgende Formkorrektur mittels Diamantdrehen sichert Formgenauigkeiten besser als 500 nm PV (peak-to-valley) bei einer Oberflächenrauheit von 5 nm rms (root-mean-square). Durch einen anschließenden Polierschritt wurden Rauheitswerte von 0,5 nm rms (Weißlichtinterferometer (WLI), Vergrößerung 50fach) erreicht. In einem letzten Schritt wurde die Form mittels Ion Beam Finishing (IBF) korrigiert. Für die asphärischen Spiegel wurde die Form mit Hilfe computergenerierter Hologramme (CGH) vermessen, die am Fraunhofer IOF mittels Elektronenstrahl-lithographie hergestellt wurden. Nach typischerweise zwei bis drei Korrekturzyklen mittels IBF wurden Formgenauigkeiten besser als 140 nm PV (respektive besser 18 nm rms) bei gleichzeitig sehr geringer Oberflächenrauheit (besser als 0,8 nm rms) erreicht.

EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) is a German hyperspectral satellite mission to earth observation, which has been initiated and funded by the German Aerospace Center (DLR). The mission start is scheduled for 2019. The optical system consists of a telescope (Three Mirror Anastigmat / TMA) and two independent spectrometers for the visible (VNIR) and the short-wave (SWIR) infrared spectral range /1/. The mirrors for telescope as well as spectrometer have been designed and produced in close collaboration with and to the specifications of OHB at Fraunhofer IOF. The established alloy aluminum 6061T6 was used as base material. A polishable amorphous nickel-phosphorus (NiP) layer with a phosphorous content between 10 % and 12 % was applied to the ultra-precise, diamond-finished mirrors. The subsequent shape correction by means of diamond turning ensures shape accuracies of better than 500 nm p.-v. (peak-to-valley) with a surface roughness of 5 nm rms (root-mean-square). By a subsequent polishing step, roughness values of 0.5 nm rms were obtained using White Light Interferometry (WLI) by 50-fold magnification. In a final step, the shape has been corrected by Ion Beam Finishing (IBF). For the aspheric mirrors, the shape was measured by Computer Generated Holograms (CGH) realized by electron beam lithography at Fraunhofer IOF. As a result, shape accuracies of better than 140 nm p.-v. and 18 nm rms, respectively, with a very low surface roughness (< 0.8 nm rms) have been achieved after typically two to three correction cycles by IBF. With this approach, the requirements for the optical

1 Spiegel Typ M1. | Mirror type M1.

Mit diesem Ansatz ließen sich die Anforderungen an die optischen Eigenschaften (hohe Oberflächenformgenauigkeit, geringe Oberflächenrauheit, hohe Reflexion), die mechanischen Eigenschaften (hohe Steifigkeit, geringe Masse) und die thermischen Eigenschaften (Einsatztemperatur und Lagerung/Transport) erfüllen. Um maximale Reflexion über den gesamten genutzten Spektralbereich zu erhalten, wurden die Spiegel mit geschützten Silberschichten (Spektralbereich 420 nm bis 2.450 nm) bzw. mit Goldschichten (Spektralbereich 900 nm bis 2.450 nm) vergütet /2/. Neben der Herstellung der Spiegel erfolgte auch die Beschichtung der in den Spektrometern eingesetzten Prismen am Fraunhofer IOF. Hierzu wurden vier verschiedene Coatings optimiert und für den Einsatz im Weltraum qualifiziert. Dabei handelte es sich um drei breitbandige Entspiegelungen für die Prismen aus Homosil, SF6 (jeweils Spektralbereich 420 nm bis 1.000 nm) und aus Infrasil (Spektralbereich 900 nm bis 2.450 nm), sowie um eine silberbasierte hochreflektierende Schicht, die als Rückseitenreflektor auf den SF6-Prismen eingesetzt wurde.

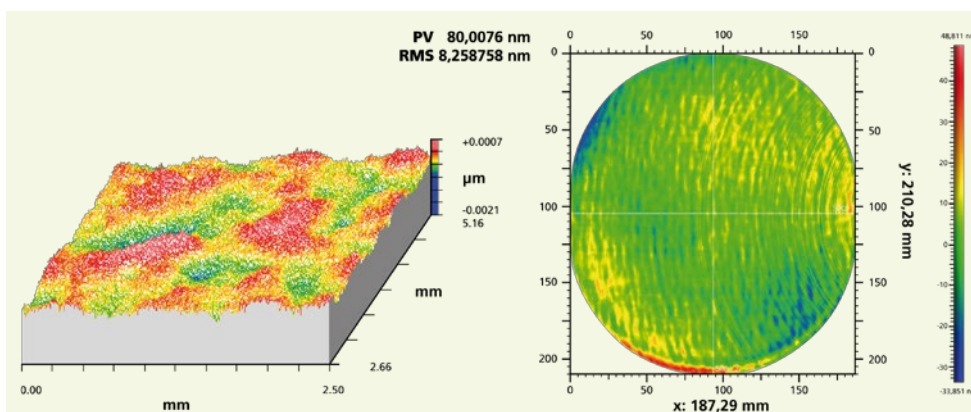
Danksagung / Acknowledgment

Wir bedanken uns für die hervorragende Zusammenarbeit mit OHB und DLR. Die Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes EnMAP, FKZ: 50 EP 0801, gefördert.

properties (high surface shape accuracy, low surface roughness, and high reflection), the mechanical properties (high stiffness, low mass), and the thermal properties (application temperature and storage/transport) have been fulfilled. In order to obtain maximum reflection over the entire spectral range used, the mirrors were coated with protected silver layers (spectral range from 420 nm to 2450 nm) and with gold layers (spectral range from 900 nm to 2450 nm), respectively /2/. In addition to the production of the mirrors, the coating of the prisms used in the spectrometers has been carried out at Fraunhofer IOF, too. Four different coatings were optimized and qualified for use in space. These were three broadband antireflection coatings for the prisms made of Homosil/SF6 (spectral range from 420 nm to 1000 nm each) and Infrasil (spectral range from 900 nm to 2450 nm) as well as a silver-based highly reflective layer, which has been used as a back reflector on the SF6 prisms.

References / Literatur

- /1/ S. Fischer et al.: The hyperspectral instrument onboard EnMAP, overview and current status, ICSO Biarritz (2016).
- /2/ M. Schürmann et al.: Manufacturing and coating of optical components for the EnMAP hyperspectral imager, SPIE Proceedings Vol. 9912, 991230 (2016).



2 Formabweichung / Interferogramm und Mikrorauheit / WLI. |
Shape deviation / interferogram and micro-roughness / WLI.

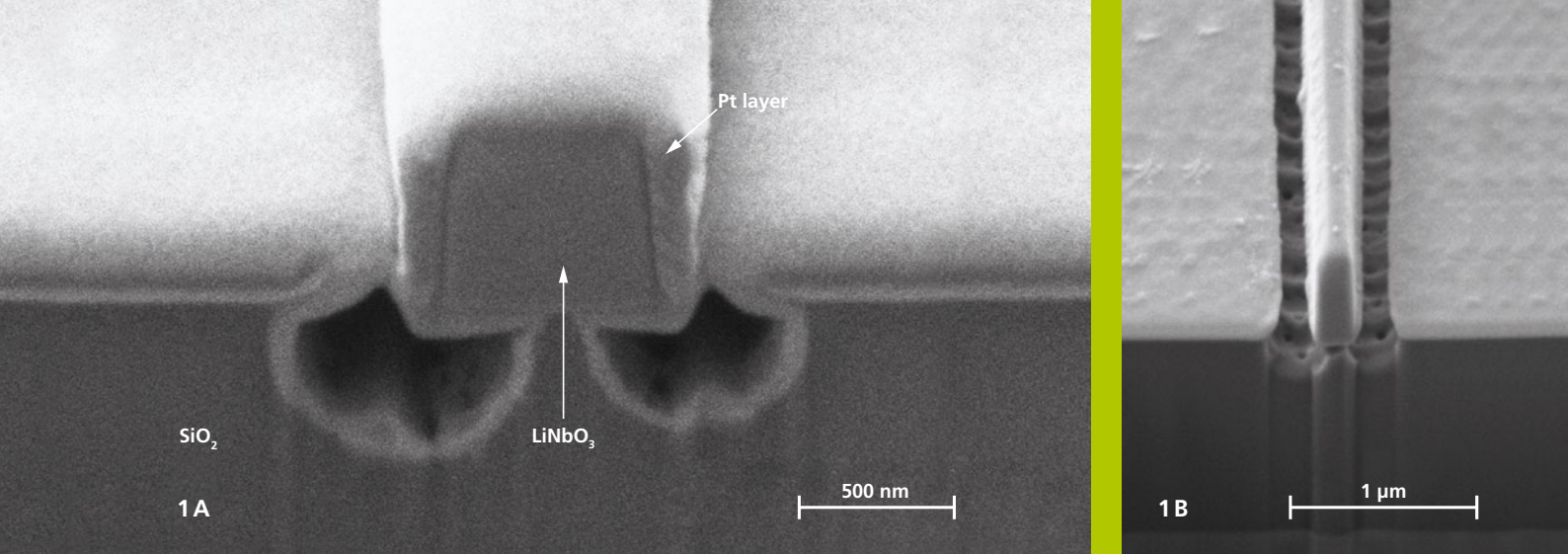
AUTHORS

Mark Schürmann
Dieter Gäbler
Stefan Schwinde
Sandra Müller
Matthias Beier
Stefan Risse
Hermann Bittner¹
Markus Erhard¹

¹ OHB System AG

CONTACT

Dr. Stefan Risse
Phone +49 3641 807-313
stefan.risse@iof.fraunhofer.de



INTEGRIERTE NICHTLINEARE OPTIK IN LITHIUMNIOBAT DÜNNSCHICHTEN INTEGRATED NONLINEAR OPTICS WITH LITHIUM NIOBATE THIN FILMS

Mikrostrukturiertes Lithiumniobat (LN) gewinnt zunehmend an Bedeutung für Anwendungen in der nichtlinearen integrierten Optik. Miniaturisierte optische Bauelemente ermöglichen die Wechselwirkung von Licht in einem kleinen Volumen, wodurch die Effizienz optisch nichtlinearer Effekte verstärkt wird.

Die gewünschte Konzentration optischer Felder kann durch verschiedenartige, mikrostrukturierte Wellenleiter und Resonatoren erfolgen. Als Substratmaterial für die technische Realisierung bietet LNOI (lithium niobate on insulator) eine neue, vielversprechende Technologiebasis.

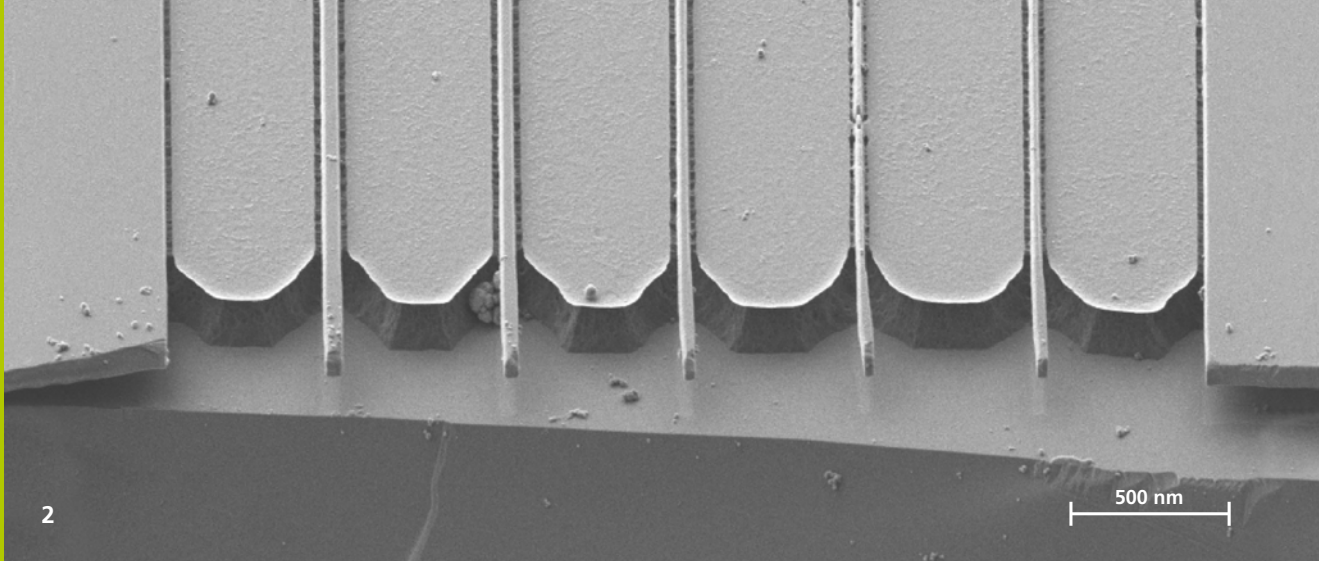
LNOI besteht aus einer kristallinen LN Schicht (530 nm) und einer darunterliegenden SiO_2 Schicht (2 μm). Die LN Schicht bildet einen Schichtwellenleiter, der durch Elektronenstrahl-lithographie und ionenstrahlverstärktes Ätzen strukturiert werden kann. Auf diese Weise wurden millimeterlange Rippenwellenleiter mit einer Breite von wenigen hundert Nanometern hergestellt [1].

Microstructured lithium niobate (LN) becomes increasingly important for applications in nonlinear integrated optics. Miniaturized optical devices enable the interaction of light in very small volumes which increases the efficiency of nonlinear optical effects.

The required concentration of optical fields can be achieved through different micro-patterned waveguides and resonators. As a substrate material for the experimental realization, LNOI (lithium niobate on insulator) is a novel and promising technological basis.

LNOI mainly consists of a crystalline LN thin film (530 nm) and a layer of SiO_2 (2 μm) underneath. The LN thin film acts as a planar waveguide that can be patterned by electron beam lithography and subsequent ion beam enhanced etching. In this way, millimeter long ridge waveguides with a width down to few hundred nanometers were realized [1]. In order to achieve modally phase matched second harmonic generation (SHG) at a pump wavelength of

- 1 Rasterelektronenmikroskopaufnahme von Rippenwellenleitern aus LNOI. Die Wellenleiter haben eine Höhe von 530 nm und Breiten von (a) 570 nm und (b) 220 nm. Die Platinschicht dient dabei lediglich als Kantenschutz bei der Querschnittpräparation. | Scanning electron microscope images of LNOI ridge waveguides. The waveguides have a height of 530 nm and widths of (a) 570 nm and (b) 220 nm. The platinum layer is merely used for edge protection during the preparation of the cross section.
- 2 Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer Gruppe von Wellenleitern an der Probenstirnfläche. | Scanning electron microscope image of a group of waveguides located at the sample front facet.



Für die Erzeugung einer zweiten Harmonischen (SHG) durch modale Phasenanpassung bei einer Pumpwellenlänge von 1400 nm wurde eine Wellenleiterbreite von 1.2 μm berechnet. Die optische Charakterisierung dieses Wellenleiters zeigte schließlich SHG mit einer Effizienz von 6.9 %W-1cm-2. Darüber hinaus kann LNOI direkt mit einem fokussierten Ionenstrahl (FIB) bearbeitet werden. Mit dieser Technik wurden Mikrodiskresonatoren mit hohem Gütefaktor sowie Resonatoren aus photonischen Kristallen zur resonanten SHG Erzeugung realisiert /2/.

1400 nm, a waveguide width of 1.2 μm was calculated. The optical characterization of this waveguide finally showed strong SHG with an efficiency of 6.9 %W-1cm-2. Furthermore, LNOI can be directly patterned with a focused ion beam (FIB). Using this technique, microdisk resonators with high quality factors and photonic crystal resonators for resonant SHG were realized /2/.

Literatur / References

- /1/ R. Geiss, S. Saravi, A. Sergeyev, S. Diziain, F. Setzpfandt, F. Schrempel, R. Grange, E.-B. Kley, A. Tünnermann, and T. Pertsch: Fabrication of nanoscale lithium niobate waveguides for second-harmonic generation, *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 12, pp. 2715-2718 (2015).
- /2/ S. Diziain, R. Geiss, M. Steinert, C. Schmidt, W.-K. Chang, S. Fasold, D. Föbel, Y.-H. Chen, and T. Pertsch: Self-suspended micro-resonators patterned in Z-cut lithium niobate membranes, *Opt. Mater. Express*, vol. 5, no. 9, p. 2081 (2015).

AUTHOR

Reinhard Geiss^{1,2}

Sina Saravi¹

Séverine Diziain¹

Frank Schrempel^{1,2}

Thomas Pertsch^{1,2}

¹ Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

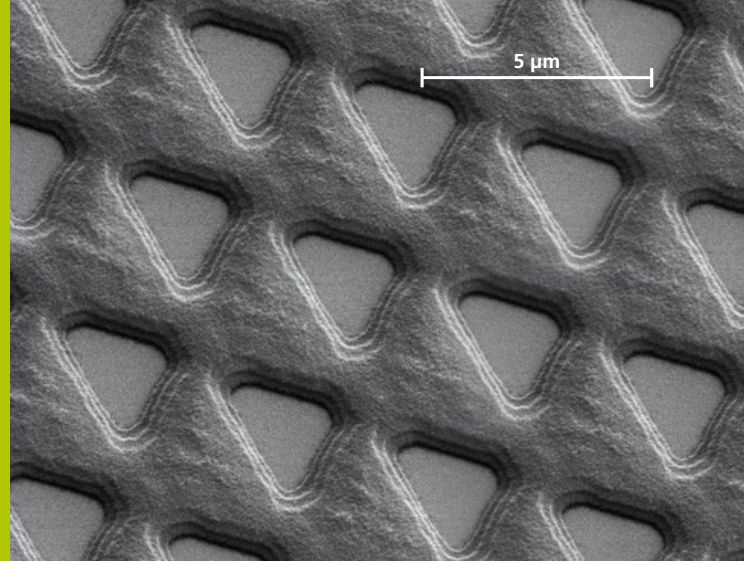
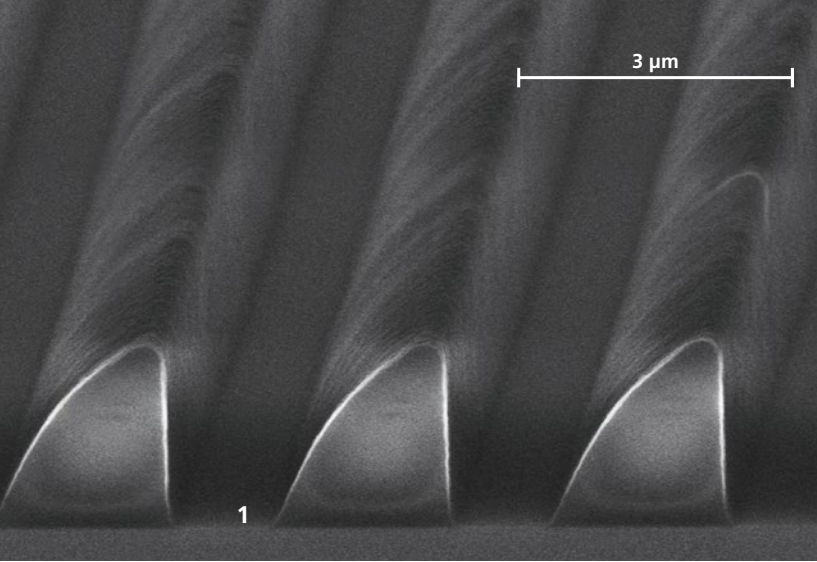
² Fraunhofer IOF

CONTACT

Prof. Dr. Thomas Pertsch

Phone +49 3641 947-840

thomas.pertsch@iof.fraunhofer.de



MASK ALIGNER LITHOGRAFIE MIT LASERBELEUCHTUNG

MASK ALIGNER LITHOGRAPHY WITH LASER ILLUMINATION

Mask Aligner Lithografie ist ein etablierter Herstellungsprozess für mikro-optische Bauelemente. Das zugrundeliegende Prinzip des Schattenwurfs limitiert allerdings die erreichbare Auflösung, d. h. die kleinstmöglich realisierbare Struktur. Um diese Limitation zu überwinden, wurde die Mask Aligner Lithografie in den vergangenen Jahren vielfältig weiterentwickelt. Dabei wurde das Beleuchtungssystem hinsichtlich Homogenität optimiert ^{/1/} oder auch spezielle diffraktive Photomasken konzipiert ^{/2-4/}. Dies ermöglicht die Herstellung verschiedener anspruchsvoller Mikro- und Nanostrukturen wie z. B. Pulskompressionsgitter oder Metallstreifen-Polarisatoren.

Mit dem Austausch der herkömmlichen Beleuchtungsquelle, der Quecksilberdampflampe durch einen Festkörperlaser, kann das Mask Aligner System zusätzlich an Flexibilität in der Wahl der Beleuchtungswinkel gewinnen. Dies wird durch den Einsatz eines Galvano-Scanners erzielt. Gleichzeitig sorgt die Leistung des Lasers für eine Verkürzung der Belichtungszeiten, unabhängig vom gewählten Winkelspektrum der Maskenbeleuchtung. Im konventionellen Mask Aligner Aufbau wurde diese durch metallische Blenden im Strahlengang definiert. Für kleine Beleuchtungswinkel bedeutet dies gleichzeitig einen Abfall der Bestrahlungsintensität.

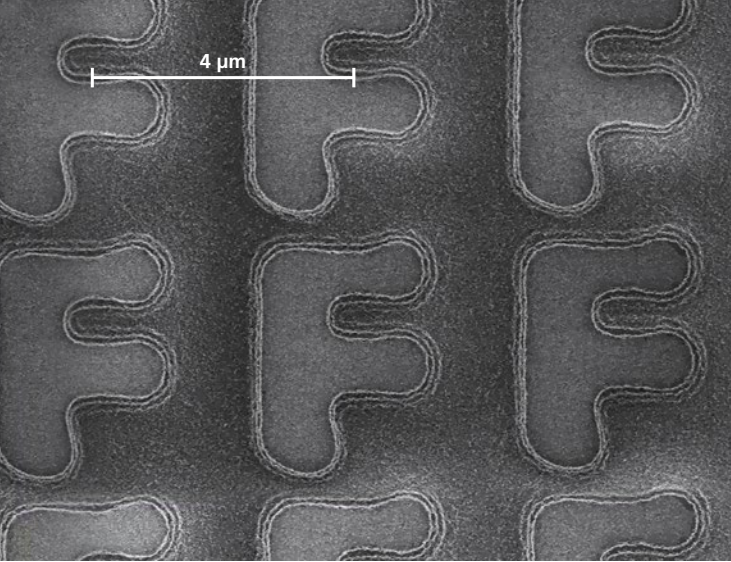
Für die Integration des Lasers als Beleuchtungsquelle wurde die Beleuchtungsoptik vollständig neu entwickelt. Neben dem Galvano-Scanner beinhaltet die Beleuchtungseinheit einen

Mask aligner lithography is an established manufacturing process for micro-optic devices. However, the underlying principle of shadow printing limits the achievable resolution, i.e. the smallest feasible pattern size. In order to overcome this limitation, mask aligner lithography has been further developed in recent years. The illumination system has been optimized with regard to homogeneity ^{/1/} or special diffractive photomasks were designed ^{/2-4/}. This allows the fabrication of various sophisticated micro- and nanostructures, e.g. pulse compression grating or wire-grid polarizers.

By exchanging the conventional illumination source, the mercury arc lamp with a solid-state laser, the mask aligner system additionally gains flexibility in the choice of the illumination angles. This is achieved by the use of a galvano scanner. At the same time, the power output of the laser ensures that the exposure times are shortened, irrespective of the selected angular spectrum of the mask illumination. In the conventional mask aligner set-up, this was defined by placing a metallic aperture in the light path. For small illumination angles, this means a decrease in the irradiation intensity.

For the integration of the laser as an illumination source, the illumination optic was newly developed. In addition to the galvano scanner, the system features an eccentrically rotating diffuser for speckle reduction and various aspheric lenses. The diffuser consists of a large number of different holograms the

¹ Beispielstrukturen in Photoresist. | Exemplary photoresist pattern.



exzentrisch rotierenden Diffusor zur Specklereduktion und verschiedene asphärischen Linsen. Der Diffusor besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Hologramme, deren überlagerte Fernfeldverteilung eine homogene und specklefreie Ausleuchtung der Photomaske sicherstellt und somit die Belichtung von Wafern mit einer Größe von bis zu 8 Zoll ermöglicht. Den schematischen Aufbau der Laserbeleuchtung im Mask Aligner zeigt die Abbildung 2.

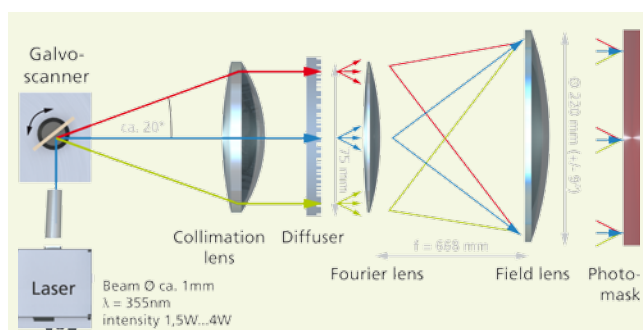
Die neue Laserbeleuchtungseinheit wurde erfolgreich mit der Herstellung von 2D-Strukturen und verschiedenen kontinuierlichen Oberflächenprofilen getestet. Die Strukturen in Abbildung 1 sind Beispiele für mit dem neuen System realisierte mikrooptische Elemente.

superimposed far-field distribution of which ensures a homogeneous and speckle-free illumination of the photomask. Hence, exposures of wafers up to 8 inch are possible. The schematic set-up of the laser illumination is shown in figure 2.

The new laser illumination unit has been successfully tested with the production of 2D structures and various continuous surface profiles. The structures in figure 1 are examples of micro-optical elements realized with the new system.

References / Literatur

- /1/ R. Voelkel et al.: Advanced mask aligner lithography: new illumination system, Opt. Express 18 (20) (2010).
- /2/ T. Weichelt et al.: Resolution enhancement for advanced mask aligner lithography using phase-shifting photomasks, Opt. Express 22 (13) (2014).
- /3/ T. Weichelt et al.: Optimized lithography process for through-silicon vias-fabrication using a double-sided (structured) photomask for mask aligner lithography, J. Micro/ Nanolith. MEMS MOEMS 14(3) (2015).
- /4/ L. Stuerzebecher et al.: Pulse compression grating fabrication by diffractive proximity photolithography, Opt. Lett. 39 (4) (2014).



2 Schematischer Aufbau der Laserbeleuchtung im Mask Aligner. | Schematic set-up of the laser illumination in the mask aligner.

AUTHORS

Tina Weichelt¹

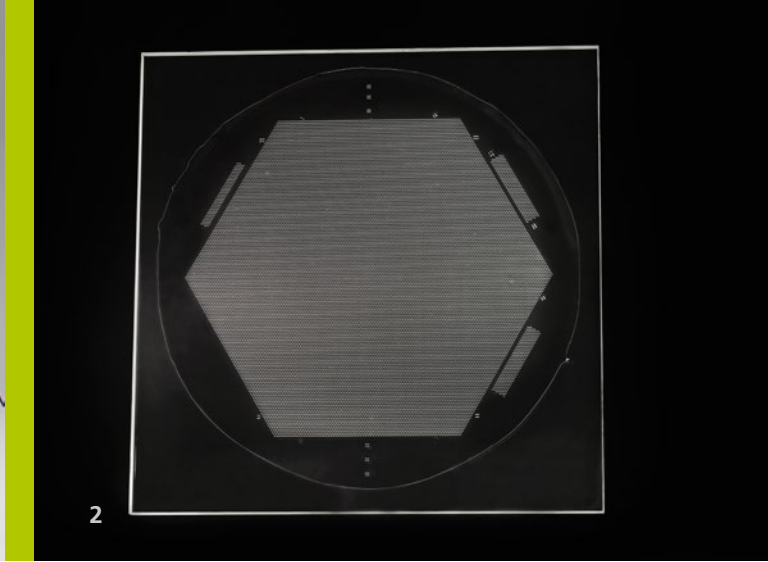
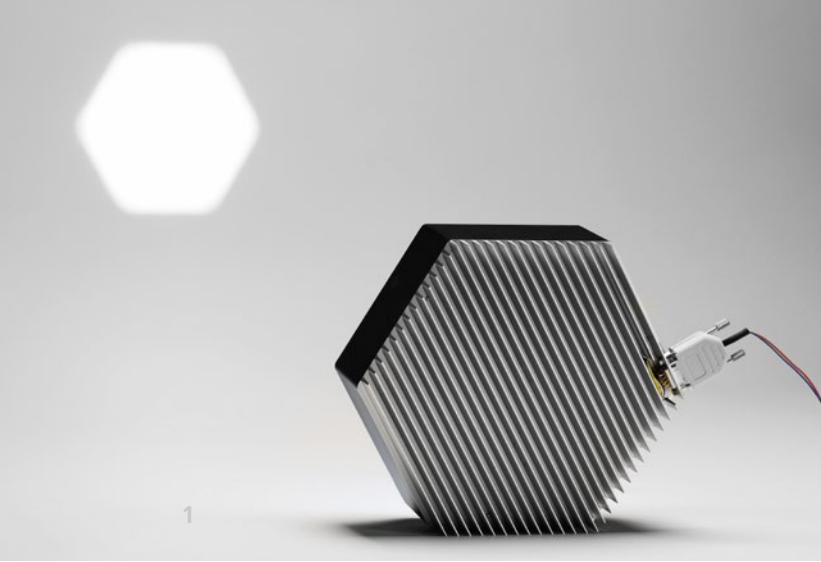
¹ Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

CONTACT

Tina Weichelt

Phone +49 3641 9-47834

tina.weichelt@uni-jena.de



MIKROOPTISCHE TELESKOPARRAYS FÜR LED-LICHTQUELLEN

MICRO-OPTICAL TELESCOPIC ARRAYS FOR LED LIGHT SOURCES

Mikrooptische Elemente bieten vielfältige Möglichkeiten zur Strahlformung für LED-Lichtquellen. Beispiele dafür sind als Tandem-Mikrolinsenarrays realisierte Wabenkondensoren und holographische Diffusoren. Die beschriebene großflächige LED-Lichtquelle besteht aus einem Array kollimierter LEDs und einen mikrooptischen Teleskoparray (Abb. 1). Dafür wurden effiziente Kollimatoren mit geringen Aberrationen und homogen ausgeleuchteter Pupille entwickelt. Ein nachgeschaltetes Teleskop ermöglicht die Formung eines scharf begrenzten, kreisförmigen Spots im Fernfelds. Da herkömmliche Teleskope bei ausgedehnten Quellen eine zu große Baulänge verursachen, wurde ein Multiapertursystem mit einem mikrooptischen Teleskoparray bestehend aus Keplerteleskopen mit Blenden zur präzisen Formung des Fernfelds realisiert (Abb. 3). Bei einem solchen Teleskop skalieren Aperturdurchmesser, Elementdicken und Krümmungsradien der Linsen mit den zulässigen Dezentrierungsfehlern. Es musste ein Kompromiss zwischen Baulänge und Präzision der Montage gefunden werden: In unserem Fall erlauben vergleichsweise große Lenslets mit 1 mm Durchmesser Zentrierfehler im 10µm-Bereich. Übersprechen zwischen benachbarten Kanälen des Teleskoparrays wird durch Antireflexbeschichtungen und sorgfältig optimierte Blendenlagen unterdrückt.

Micro-optics offers great potential for light shaping for LED light sources. Well-known examples are fly's eye condensers realized as tandem microlens arrays or holographic diffusers. The developed low divergence, large area LED light source consists of an array of collimated LEDs and a micro-optical telescope array (Fig. 1). Efficient collimators with homogeneously illuminated pupil, low aberration and minimum stray light were designed and realized. Nonetheless, this LED light source has to be accomplished by a telescope producing a sharply defined circular top-hat spot in the farfield. With large area sources, usual single-aperture spatial filter layouts fail to achieve a small form factor design. Thus, a multi-aperture micro-optical array approach was chosen to realize a telescope array with minimum thickness. The basic design consists of Kepler telescopes with a pinhole to properly tailor the light beam (Fig. 3). Aperture sizes, element thicknesses, and radii of lens curvature scale linearly with the permissible decentration errors, thus, a trade-off between required precision and system length has to be established. In our case, comparatively large 1 mm diameter lenslets require lateral alignment precision in the 10 micrometer range. A challenging task is suppression of adjacent channel cross talk inside the filter. AR coating and peculiar design of apertures help to minimize this spurious effect.

1 LED-Lichtquelle und erzeugter Spot auf einem Schirm. | LED light source and generated spot on a screen.

2 Abformwerkzeug für den UV-Reaktionsguss. | Replication tool for UV reaction molding.

Das Teleskoparray wird mit zwei 8" Borofloatglaswafern mit photolithographisch strukturierten schwarzen Aperturlayern, die unter den Linsenarrays vergraben sind, aufgebaut. Die Linsenarrays sind Polymer-auf-Glas Elemente, die mittels UV-Reaktionsguss aus Reflow-Masterstrukturen repliziert wurden /1/. Abbildung 2 zeigt ein Abformwerkzeug für den Replikationsprozess. Zur Zentrierung der beiden Wafer dienen Markenstrukturen außerhalb des durchstrahlten Bereichs. Replizierte Abstandhalter ermöglichen die präzise Fokussierung des Teleskoparrays.

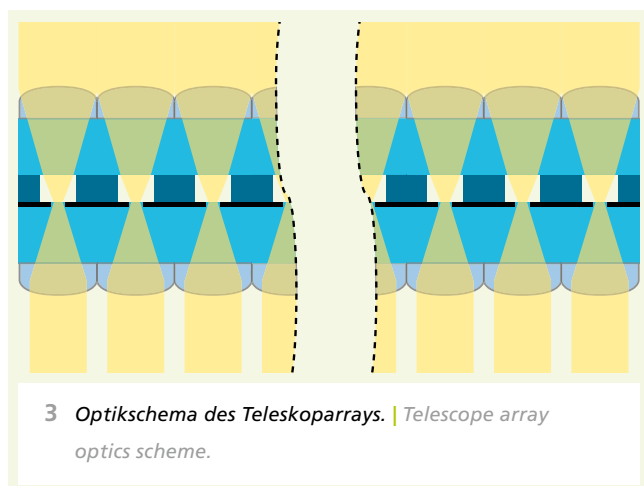
Diese Entwicklung erfolgte im Auftrag Firma Coelux S.r.l. aus Como, Italien.

Literatur / References

/1/ P. Dannberg, F. Wippermann, A. Brückner, A. Matthes, P. Schreiber, A. Bräuer: Wafer-Level Hybrid Integration of Complex Micro-Optical Modules, Micromachines 2014, 5, 325-40 (2014).

The system was realized with two 8" borofloat glass wafers equipped with photolithographically structured black aperture layers buried under the lens arrays. The lens arrays are polymer-on-glass elements replicated from reflow master structures by UV reaction molding /1/. Figure 2 shows a replication tool for this molding process. To achieve correct placement of the wafer with respect to each other, alignment marks for lateral adjustment and a replicated spacer structure for correct focusing are added.

This research was commissioned by Coelux S.r.l. from Como, Italy



AUTHORS

Peter Schreiber

Chen Li

Peter Dannberg

Bernd Höfer

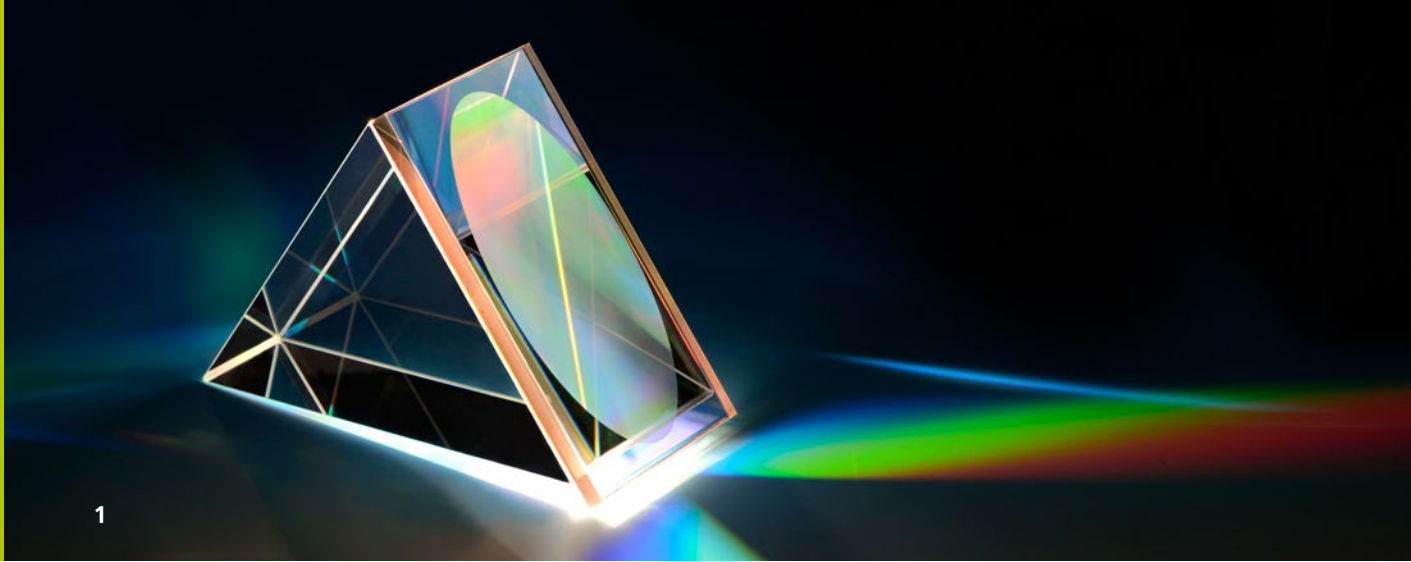
Stephanie Fischer

CONTACT

Dr. Peter Schreiber

Phone +49 3641 807-430

peter.schreiber@iof.fraunhofer.de



GRISM MANUFACTURING FOR SPECTROSCOPY IN SPACE

GRISM-HERSTELLUNG FÜR SPEKTROSKOPIE IM WELTRAUM

Mit Spektrometern an Bord von Satelliten in der Erdumlaufbahn ist die genaue Erfassung der Konzentration von Treibhausgasen (z. B. CO_2 , CH_4 , N_2O) in unserer Atmosphäre möglich. Von zentraler Bedeutung sind hierbei sogenannte GRISMs, welche das von der Erde reflektierte Sonnenlicht in seine Spektralkomponenten zerlegen, um diese separat analysieren zu können. GRISM, ein englischsprachiges Akronym, verweist auf ein optisches Element, welches diffraktive und refraktive Eigenschaften – in Form eines Gitters (GRating) und eines Prismas (prISM) – vorteilhaft kombiniert.

Am Fraunhofer IOF wurde ein Fügeverfahren entwickelt, welches die Herstellung von GRISMs durch hydrophiles direktes Bonden erlaubt. Daher können die Einzelteile (Gitter und Prisma) zunächst getrennt voneinander unter Verwendung etablierter und hochpräziser Verfahren hergestellt werden. Die Gitterstruktur mit Aspektverhältnissen bis 1:10 wird typischerweise durch Elektronenstrahlolithographie und reaktives Trockenätzen auf standardisierten Kieselglas-Substraten (SiO_2 -Maskblanks) hergestellt. Kritische Leistungsmerkmale, wie z. B. Beugungseffizienz, Polarisations sensitivität, Ebenheit und Wellenfrontfehler können so anwendungsspezifisch angepasst und hochgenau kontrolliert werden ¹. Für die Herstellung der Prismen kommen herkömmliche Verfahren wie Schleifen, Läppen und Polieren zum Einsatz.

With spectrometers brought into space via satellite, the reliable measurement of greenhouse gases (e.g. CO_2 , CH_4 , N_2O) within earth's atmosphere is feasible. Such spectrometers analyze the light reflected from earth by decomposing it into its colors using a so-called GRISM, an acronym which refers to its two fundamental components: a grating (GRating) and a prism (prISM). By uniting both elements to a GRISM, diffractive and refractive features can be favorably combined to achieve outstanding spectral resolution.

At Fraunhofer IOF, a manufacturing approach has been developed for joining the corresponding individual glass elements by hydrophilic direct bonding. This allows the separate production of the individual parts with high precision on well-established production tools. Typically, the grating structure is generated on top of a fused silica (SiO_2) substrate by e-beam lithography and reactive ion etching which allows aspect ratios of up to 1:10 ¹. Thus, properties that are most critical to the instrument's performance, e.g. diffraction efficiency, polarization sensitivity, lateral uniformity, and wave-front error, can be optimized and controlled to a large extent. Common optical processes of grinding, lapping, and polishing can be used for the prisms.

Grating and prism are brought into mutual alignment and then combined by the new joining technology to establish

¹ *Hydrophiles direktes Bonden: Kieselglas GRISMs mit elliptischer Gitterfläche.* |

Hydrophilic direct bonding: Fused silica GRISMs with elliptical grating area.

Anschließend werden Gitter und Prisma zueinander ausgerichtet und mit Hilfe des neuentwickelten Verfahrens dauerhaft mineralisch verbunden. Im Ergebnis entsteht ein einziges, quasi-monolithisches optisches Element. Kovalente Bindungen des Si-O-Si-Typs garantieren hohe Steifigkeit und mechanische Festigkeit, sowie exzellente optische Transmission. Die mineralische Natur dieser Bindung ist auf die meisten optischen Materialien (Gläser sowie Kristalle) perfekt angepasst und ermöglicht eine extrem dünne Verbindung. Die neu entwickelte Technologie wurde bereits mehrfach erfolgreich eingesetzt, um Gitter in diversen Konfigurationen mit Prismen unterschiedlicher Größe zu verbinden. Dabei wurden sowohl Verbindungen der unstrukturierten wie auch die strukturierten Gitterseite (hermetisches Verkapseln) mit einem Prisma erzielt und selbst Gitterflächen mit optischer Beschichtung gebondet /2/.

Literatur / References

- /1/ T. Flügel-Paul et al.: New grating concepts in the NIR and SWIR spectral band for high resolution earth-observation spectrometers, SPIE Proc. Vol. 9912 (2016).
/2/ G. Kalkowski et al.: Low temperature GRISM direct bonding, SPIE Proc. Vol. 9574 (2015).

a single, quasi-monolithic element. Stiff and durable mineral bonds, high strength, and excellent transmission are achieved. The process requires extremely smooth surfaces and provides permanent joins through covalent bonds of the Si-O-Si type at the nanometer scale. The mineral nature of these bonds is perfectly adapted to most optical materials (glasses as well as crystals) and the extremely thin bonding layers generated with this technology are durable and well suited to transmission optics.

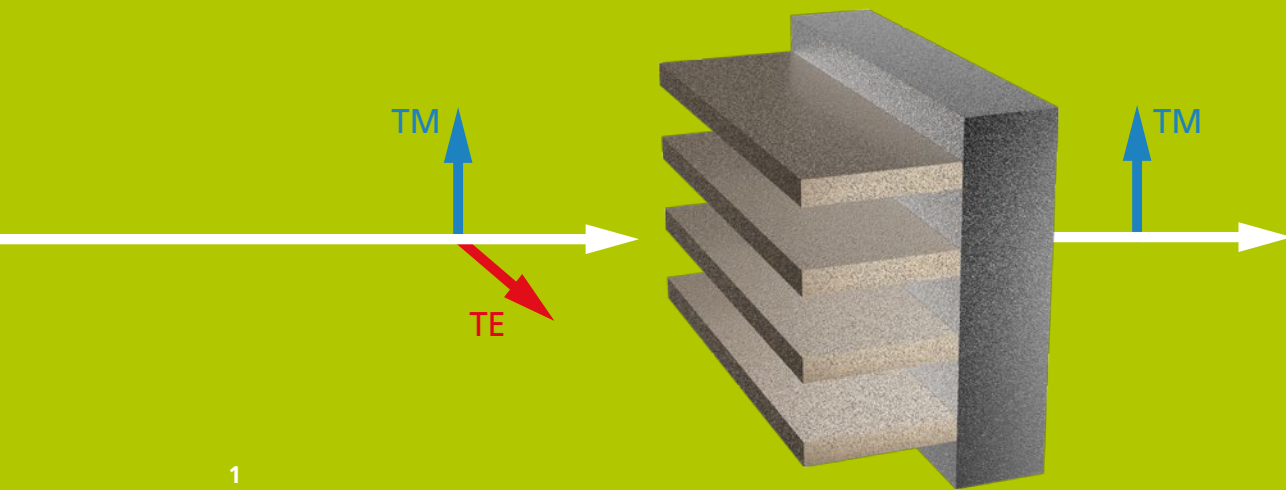
The new technology has been used successfully for bonding both unstructured as well as structured grating sides (hermetic sealing) with and without coatings to fused silica prisms of various sizes /2/.

AUTHORS

Gerhard Kalkowski
Thomas Flügel-Paul

CONTACT

Dr. Felix Dreisow
Phone +49 3641 807-181
felix.dreisow@iof.fraunhofer.de



1

DRAHTGITTERPOLARISATOREN FÜR DEN FERNEN ULTRAVIOLETTEN SPEKTRALBEREICH WIRE-GRID POLARIZERS FOR THE FAR-ULTRA-VIOLETT SPECTRAL RANGE

Für eine Vielzahl optischer Anwendungen in der Lithographie, Mikroskopie oder Fernerkundung wird Licht mit einem definierten, meist linearen Polarisationszustand benötigt. Besondere Vorteile können nanooptische Drahtgitterpolarisatoren bieten. Sie bestehen aus einem sub-Wellenlängengitter aus absorbierendem Material. Die Gitterstruktur führt zu einer stark unterschiedlichen Transmission für senkrecht zueinander stehende Polarisationsrichtungen (TE- bzw. TM-Polarisation) und damit zur gewünschten anisotropen Filterwirkung /1/.

Vorteile der Drahtgitterpolarisatoren sind die Möglichkeit der Herstellung auf großen Flächen bei sehr geringer Ausdehnung in Stahlrichtung, sowie ihre Eigenschaft, auch bei sehr großen Einfallswinkeln zuverlässig zu arbeiten. Durch die Realisierung der Drahtgitterpolarisatoren in einem lithographischen Prozess kann mittels einer lokal variierenden Gitterorientierung auch eine ortsauflöste Polarisationskontrolle erreicht werden /2/.

Drahtgitterpolarisatoren sind für VIS und IR Anwendungen lange bekannt. Für kürzere Wellenlängen im ultravioletten Spektralbereich steigen die Anforderungen an Material- und Struktureigenschaften der Metallstreifenpolarisatoren jedoch signifikant an. Hier konnten am Leistungszentrum Photonik in den letzten Jahren sehr große Fortschritte in der Entwicklung entsprechender Elemente erzielt werden. Die Herstellung der erforderlichen hochauflösten Nanostrukturen basiert auf einem so genannten »self-aligned double patterning« (SADP)

For a number of optical applications in lithography, microscopy, or remote sensing, light with a defined degree of polarization – mostly linearly polarized light – is required. The use of nano-optical wire-grid polarizers can be of particular advantage. They consist of a sub-wavelength grating of absorbing material. The grating structure results in a strong difference in the transmission of perpendicular polarization directions (TE- and TM-polarization, respectively) and thus, to the desired anisotropic filter function /1/.

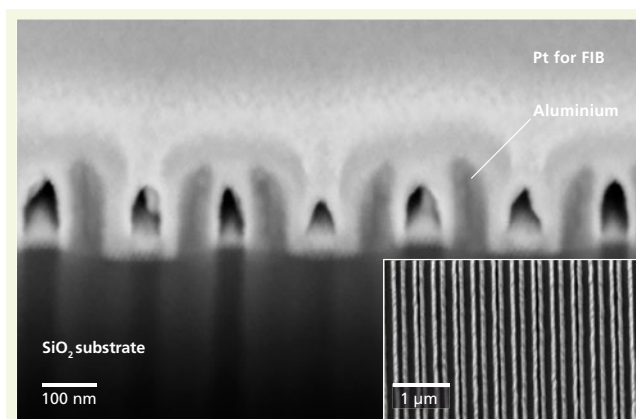
Advantages of wire grid-polarizers are the possibility to be manufactured on large areas, their small thickness in beam direction, and the large acceptance angle range for incident light. By realizing wire-grid polarizers using a lithographic process, a local polarization control can be achieved by locally varying the grating orientation /2/.

Wire-grid polarizers are well known for applications in the VIS and IR. However, for shorter wavelengths in the ultra-violet spectral range, demands on material- and structural properties of the sub-wavelength grating structure strongly increase. Significant progress has been achieved in the field of such elements operating in the UV range. The fabrication of the required high resolution nano structures is based on the so called "self-aligned double patterning" (SADP) process /3/. A physical model has also been developed allowing advantageous material properties to be derived and explaining the

1 Schematische Darstellung eines Drahtgitterpolarisators. | Schematic diagram of a wire-grid polarizer.

Prozess /3/. Daneben wurde ein Modell entwickelt, welches die Ableitung vorteilhafter Materialeigenschaften erlaubt und das Versagen klassischer, metallischer Drahtgitterpolarisatoren im UV-Bereich sowie das Auftreten des inversen Polarisations-effektes erklärt. Insbesondere zeigt das Modell, dass auch Halbleitermaterialien im UV-Bereich für Polarisatoren genutzt werden können. Dies konnte am Beispiel von Titanoxid experimentell bestätigt werden /4/, wobei ein bisher unerreichtes Kontrastverhältnis von 384 bei einer Wellenlänge von 193 nm gezeigt wurde.

Ein weiterer Durchbruch wurde bei der Entwicklung eines kostengünstigen Herstellungsprozesses für Drahtgitterpolarisatoren erreicht. Durch Kombination hochauflösender Beugungslithographie mit einem SADP-Prozess konnten in einem konventionellen Mask Aligner Drahtgitterstrukturen mit 175 nm Periode erzeugt werden, die sehr gute Polarisations-eigenschaften bis hinunter zu 300 nm Wellenlänge zeigen /5/.



2 Mittels diffraktiver Mask Aligner Lithographie und SADP hergestellter Polarisator. | Polarizer realized by diffractive mask aligner lithography and SADP.

failure of conventional metallic wire-grid polarizers in the UV-range as well as the occurrence of the inverse polarization effect. In particular, the model shows that semiconductor materials are well suited for polarizers in the UV. This could be shown experimentally by the example of a Titanium oxide polarizer /4/ which exhibits a previously unrivalled contrast ratio of 384 at a wavelength of 193 nm.

A further breakthrough has been achieved in the development of a cost effective fabrication process for wire-grid polarizers. By combining high-resolution diffraction lithography and a SADP-process polarizer structures with only 175 nm period were realized by a conventional Mask Aligner. These elements show very good polarization properties down to 300 nm wavelength /5/.

References / Literatur

- /1/ T. Siefke et al.: Advanced Optical Materials (2016).
- /2/ Y. Bourgin et al.: Optics Express 23 (13), pp. 16628-16637 (2015).
- /3/ D. Lehr et al.: Applied Physics Letters, vol. 105, p. 143110 (2014).
- /4/ T. Siefke et al.: SPIE Proc. Vol. 992706 (2016).
- /5/ Y. Bourgin et al., SPIE Proc. Vol. 9780 (2016).

AUTHORS

Thomas Siefke¹

Ernst-Bernhard Kley^{1,2}

Yannick Bourgin¹

Uwe Detlef Zeitner^{1,2}

¹ Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

² Fraunhofer IOF

CONTACT

Dr. Uwe Detlef Zeitner

Phone +49 3641 807-403

uwe.zeitner@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



FEINMECHANISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME / PRECISION ENGINEERING COMPONENTS AND SYSTEMS

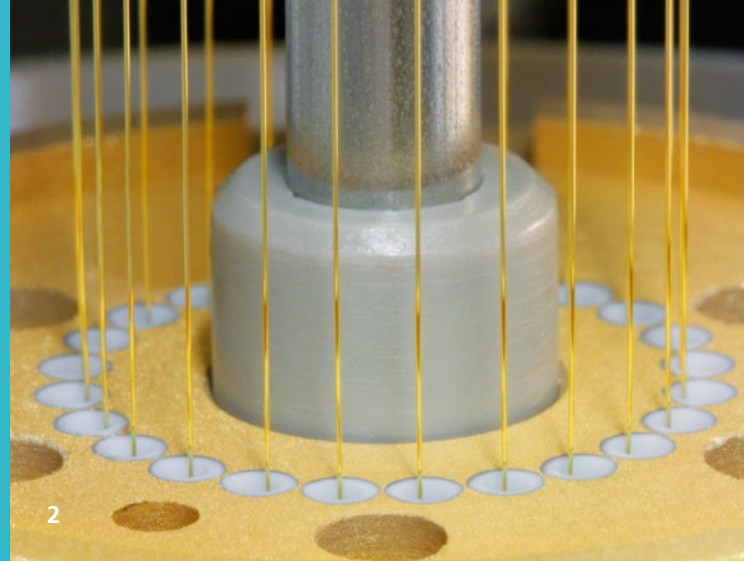
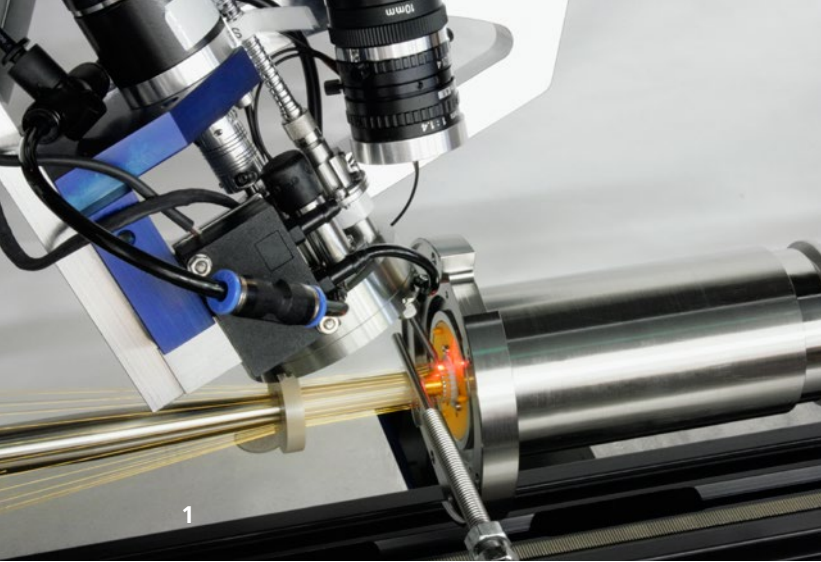
Die Kombination von Feinmechanik und Optik stellt ein strategisches Alleinstellungsmerkmal des Fraunhofer IOF innerhalb der deutschen und europäischen Forschungslandschaft dar und setzt die Tradition Jenas als einen der führenden Optikstandorte fort. Das Geschäftsfeld Feinmechanische Komponenten und Systeme betreibt die kundenspezifische Auslegung und Fertigung von mechanischen Baugruppen und Maschinen für sehr verschiedene Anwendungen – auch für extreme Anforderungen wie Ultrahochvakuum oder kryogene Temperaturen. Ein Schwerpunkt sind Systeme unter Einsatz von Leichtgewichtsstrukturen. Herausragendes Beispiel hierfür ist die Entwicklung und Herstellung optomechanischer Komponenten für die Raumfahrt. Weiterhin werden neue Verfahren zur Aufbau- und Verbindungstechnik von optischen Systemen (z. B. Laserlöten) und darauf basierend Vorrichtungen und Sondermaschinen entwickelt.

Die Bandbreite der in diesem Geschäftsfeld in 2016 abgeschlossenen Projekte zeigen die nachfolgenden Beiträge. Die Themen reichen von Referenzkörpern für Kalibrierungen über Drahtablenksysteme für die Elektronenstrahl-Lithographie hin zu Freiformspiegelmodulen für eine vereinfachte Systemintegration.

The combination of precision mechanics and optics represents a strategic unique feature of Fraunhofer IOF within the German and European research landscape and continues Jena's tradition as one of the leading optics centers. The business field Precision Engineering Components and Systems is responsible for customer-specific design and the manufacturing of mechanical assemblies and machines for very different applications – even for extreme requirements such as ultra-high vacuum or cryogenic temperatures. A focus is on systems with lightweight structures. An outstanding example of this is the development and production of optomechanical components for space applications. Furthermore, new methods for the assembly and integration of optical systems (e.g. laser soldering) and devices, and special machines based on them are developed.

The range of projects completed in this business field in 2016 are shown in the following articles. The topics range from reference bodies for calibrations via wire deflection systems for electron beam lithography to free-form mirror modules for simplified system integration.

LEFT *Drahtablenksystem für die Elektronenstrahl-Lithographie. | Wire deflection system for electron beam lithography.*



NEUARTIGES DRAHTABLENKSYSTEM FÜR DIE ELEKTRONENSTRAHL-LITHOGRAPHIE NOVEL WIRE DEFLECTION SYSTEM FOR ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY

Die schnelle und präzise Ablenkung von Elektronenstrahlen ist eine Schlüsseltechnologie für moderne Elektronenstrahl-Systeme. Für die Ablenkung des Elektronenstrahls werden die Elektronen häufig durch elektrostatische Felder in ihrer Flugbahn beeinflusst. Hierzu werden Elektroden in Gruppen angeordnet und mit unterschiedlichen Spannungspotentialen beschaltet. Die Anordnung der Elektroden erfolgt bevorzugt innerhalb der elektronenoptischen Säule. Wird ein solches Elektrodensystem miniaturisiert, kann eine optimale Anordnung der Elektroden in Strahlnähe innerhalb der elektronenoptischen Säule erreicht werden. Das Ergebnis ist eine sehr effiziente und präzise Ablenkung des Elektronenstrahls, was eine exakte Strukturierung im lithographischen Schreibprozess mit Nanometer-Genauigkeit, hoher Sensitivität und geringen Aberrationen ermöglicht.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Ablenkensystemen mit 8 bis 12 Stabelektroden wurde ein miniaturisiertes System basierend auf Gold-Drahtelektroden mit einem Durchmesser von 100 µm realisiert. 24 dieser Elektroden sind in einer elektronenoptisch optimierten Anordnung auf einem Lochkreis mit präzisiertem Durchmesser arrangiert. Das Ziel einer homogenen Feldverteilung mit kurzen und exakten Schaltzyklen wurde erreicht. Die Position der einzelnen Elektroden wird über präzise

Fast and precise deflection of electron beams is a key technology for modern electron beam systems. For the deflection of the electron beam, the electrons are influenced frequently by electrostatic fields in their trajectory. For this, electrodes are arranged in groups and connected with different voltage potentials. The electrodes are preferably arranged within the electron-optical column. In case of miniaturizing such an electrode system, an optimal arrangement of the electrodes in the vicinity of the beam can be achieved within the electron-optical column. As a result, an efficient and precise deflection of the electron beam is realized, which allows a structuring in the lithographic writing process with accuracies in the nanometer range, high sensitivity, and low aberrations.

In contrast to conventional deflection systems with 8 to 12 rod electrodes, a miniaturized system based on gold wire electrodes with a diameter of 100 µm was implemented. In an electron-optically optimized arrangement, 24 of these electrodes are arranged on a bolt-hole with a precise diameter. A homogeneous field distribution with short and exact switching cycles has been achieved. The position of the individual electrodes is realized by precise index bores (fitting bores) in two ceramic flanges. The straightness of the wire

1 Langzeitstabile und vakuumkompatible Fixierung der Drahtelektroden durch laserbasiertes Solderjet Bumping. |

Long-term stable and vacuum-compatible fixing of the wire electrodes by laser-based Solderjet Bumping.

2 Elektronenoptisch optimierte Positionierung der Gold-Drahtelektroden durch präzise Indexbohrungen. |

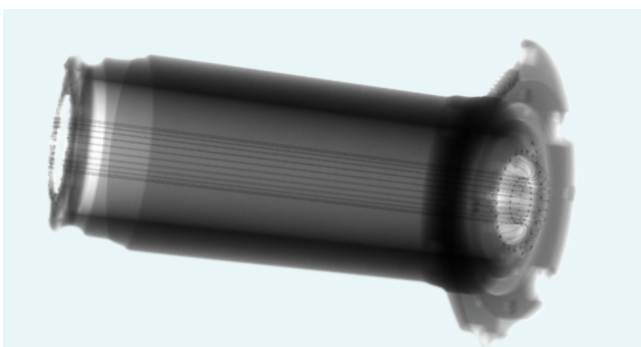
Electron-optical optimized positioning of the gold wire electrodes through precise index drilling.

Indexbohrungen in zwei keramischen Flanschen realisiert. Die Geradheit der Drahtelektroden wird durch eine mechanische Vorspannung des Goldes sichergestellt, gleichzeitig wird der Montagezustand mittels »Solderjet Bumpings« auf einem metallisierten keramischen Träger mechanisch fixiert und elektrisch kontaktiert. Der sehr lokale Energieeintrag dieses laserbasierten Lötverfahrens verhindert eine Schädigung der sensitiven Drahtelektrode; die flussmittelfreie Prozessierung ermöglicht den Einsatz der Baugruppe in der Vakuumumgebung der elektronenoptischen Säule.

Mehrere Prototypen des Drahtablenksystems wurden in einem hochpräzisen Computertomographen (CT) vermessen. Die Präzision der Position einzelner Drahtelektroden sowie Symmetrieabweichungen der Kreisanordnung lag im Bereich weniger Mikrometer. Lebensdauer-Tests in realen Elektronenstrahlsystemen ergaben nach mehr als einem Jahr keine Degradation der Performance als Indikator für die Stabilität von Vorspannung, Elektrodenposition sowie verringerter Kontamination der Elektroden verglichen mit Stabelektrodensystemen. Damit eignen sich die miniaturisierten Drahtablenksysteme für den zukünftigen Einsatz in kommerziellen Elektronenstrahl-Lithographieanlagen.

electrodes is ensured by a mechanical preload of the gold. At the same time, the assembly state is mechanically fixed and electrically contacted by means of Solderjet Bumping on a metallized ceramic carrier. The local energy input of this laser-based soldering process prevents damage to the sensitive wire electrode; the flux-free processing is particularly suitable for emission-free assemblies used in vacuum environments.

Several prototypes of the wire deflection system are measured by highly-precise computer tomography (CT). The precision of the position of individual wire electrodes and the symmetry deviations of the circle arrangement were in the range of a few micrometers. Compared to rod electrode systems, lifetime tests in real electron beam systems did not show any degradation of the performance after more than a year, which is an indicator of the stability of preload, electrode position, and reduced contamination of the electrodes. Thus, miniaturized wire deflection systems are suitable for future use in commercial electron beam lithography systems.



3 CT-Messung mit Darstellung der Drähte im System. |
Computed tomography measurement, showing the wires in the system.

AUTHORS

Andreas Kamm

Marcel Hornaff

Erik Beckert

Stefan Risse

Hans-Joachim Döring¹

Martin Klein¹

Matthias Slodowski¹

¹Vistec Electron Beam GmbH

CONTACT

Dr. Erik Beckert

Phone +49 3641 807-338

erik.beckert@iof.fraunhofer.de



1



2

REFERENZKÖRPER FÜR DIE ON-BOARD KALIBRIERUNG DER MTG IMAGER OPTICS REFERENCE ELEMENTS FOR THE ON-BOARD CALIBRATION OF THE MTG IMAGER OPTICS

Wissenschaftliche Instrumente für die Erdbeobachtung und Wetterprognose sind auf die exakte Kalibrierung der verwendeten Beobachtungskanäle angewiesen, die in regelmäßigen Abständen on-board durchgeführt werden. Für die Infrarotinstrumente der Meteosat Satelliten basiert die absolute Kalibrierung auf dem Temperaturunterschied zwischen zwei Kalibrierkörpern, den sogenannten Emissive Plates. Kalibrierkörper 1 sendet das Referenzsignal und wird identisch zur Umgebung temperiert. Die Temperatur von Kalibrierkörper 2 wird um einen bekannten Betrag erhöht. Das Differenzsignal beider Emissive Plates ist die Grundlage der Kalibrierung /1/.

Metalloptiken werden auf Grund der Materialeigenschaften sowie der effizienten und ultrapräzisen Fertigungsmöglichkeiten im Bereich von Infrarotapplikationen bevorzugt eingesetzt. Um die hohen Anforderungen der Meteosat Third Generation (MTG) Wettersatelliten zu erfüllen, ist es naheliegend auch die Kalibrierkörper mittels Ultrapräzisionsbearbeitung zu erzeugen. Auf diese Weise können besonders kleine Kantenradien und exakte Flankenwinkel erzeugt werden. Unerwünschte Reststrahlung wird auf diese Weise effizient minimiert. Das Design der Schwarzkörper wurde hierbei gezielt für die Bearbeitung mittels Ultrapräzisionszerspanung angepasst und ermöglicht die Bearbeitung extrem steiler Flankenwinkel bei sehr niedrigen Rauheiten. Die V-nutförmigen Flanken binden einfallendes Licht durch wiederholte Reflektion und sukzessive

Scientific instruments for Earth observation rely on the precise calibration of their observation channels. The calibration of the infrared channels is carried out on-board at regular intervals. For the Meteosat satellites, the absolute calibration is based on the temperature difference between two on-board elements called Emissive Plates. Reference element 1 sends the reference signal and is conditioned identically to the environment. The temperature of reference element 2 is conditioned by a known difference. The difference signal of both Emissive Plates is the basis for calibration /1/.

Due to their material characteristics, as well as the availability of efficient and ultra-precise manufacturing technologies, metal optics are highly regarded for their qualities in infrared applications. To fulfil the high requirements for the calibration of the 3rd generation Meteosat weather satellites, the manufacturing of the reference elements by ultra-precision machining has been suggested. The manufacturing of particularly small groove radii and very precise flank angles was possible in order that unintentional radiation is minimized efficiently. The design of the blackbodies was adapted to the potential of the manufacturing with diamond tools and allowed the cutting of extreme steep flanks and very low surface roughness.

The v-groove flanks of the calibration elements trap incoming light through repeated reflections and successive absorption.

1 & 2 Referenzkörper für die on-board Kalibrierung der MTG imager optics. |

Reference elements for the on-board calibration of the MTG imager optics.

Absorption. Die Absorption wird durch die Applizierung einer speziellen Schwarzschrift erzielt. Auf diese Weise löschen die Flanken mit jeder Reflektion einen Teil der Infrarotstrahlung und bilden die Grundlage der in diesem Verfahren verwandten Schwarzkörperkalibrierung. Die komplexe Form- und Funktionsintegration der Elemente erfordert die Montage der Baugruppe in einem roboterunterstützten Bondprozess, in dem der fragile Grundrahmen der Baugruppe mit der eigentlichen Emissive Plate verbunden wird.

Der aus Aluminium bestehende Grundkörper des Bauteils wurde in einem Chromatisierungsverfahren passiviert und im Außenbereich mit einer Schutzschicht aus Gold überzogen. Die Entwicklung und Realisierung der Emissive Plates für die Schwarzkörperkalibrierung zeigt das Potenzial, welches in der Kombination von CNC gesteuerter Diamantzerspanung, roboterunterstützten Montageprozessen und qualifizierten Beschichtungsprozessen liegt. Diese Kombination ermöglicht es, aus hochpräzisen Einzelkomponenten Systemlösungen für die wissenschaftliche Instrumentierung in Aerospaceapplikationen zu realisieren.

Die Entwicklungsarbeit erfolgte im Auftrag der Firma Micos Engineering GmbH und in enger Zusammenarbeit mit der Firma ABB Inc.

Literatur / References

/1/ Van de Berg et al.: The calibration of the infrared channels of Meteosat first and second generation spacecraft, 2003.

The absorption is achieved by applying a special black optical layer. Each reflection absorbs parts of the infrared radiation, which serves as the basic principle of the black body calibration. The compact shape of the reference elements requires the assembly in a robot-aided bonding process, in which the fragile base frame is aligned with the actual Emissive Plate. The element consists of aluminum, which is passivated by a chemical conversion layer and gold plating on the outer regions.

Development and manufacturing of the Emissive Plates for the black body calibration show the potential of the combination of ultra-precise CNC manufacturing, robot aided bonding processes, and qualified optical layers, allowing the transformation of single components to systems solutions for scientific instrumentation in aerospace applications.

This development was conducted on behalf of Micos Engineering GmbH and in close cooperation with ABB Inc.

AUTHORS

Ralf Steinkopf

Andreas Gebhardt

Mathias Mohaupt

Steffen Gramens

Peyman Rahnama¹

¹Micos Engineering GmbH

CONTACT

Dr. Ralf Steinkopf

Phone +49 3641 807-336

ralf.steinkopf@iof.fraunhofer.de



FREIFORMSPIEGELMODULE ZUR VEREINFACHTEN SYSTEMINTEGRATION FREEFORM MIRROR MODULES FOR EASY SYSTEM INTEGRATION

Eine Vielzahl von Teleskopdesigns im Bereich der Erd- und Fernerkundung basiert zunehmend auf außeraxialen Spiegelanordnungen mit asphärisch oder freigeformten Oberflächengeometrien, um abschattungsfreie Abbildungen bei möglichst großem Bildfeld und hervorragenden Bildqualitäten zu ermöglichen. Die fortschreitende Etablierung freiformtauglicher Fertigungs- und Messprozesse erlaubt die Herstellung dieser Komponenten mit geringen Formtoleranzen und Oberflächenrauheiten. Als zeit- und kostenintensiver Arbeitsschritt verbleibt oftmals die Montage der Einzelspiegel zum System.

Am Fraunhofer IOF wird kontinuierlich an Strategien zur vereinfachten Montage von metalloptischen Spiegelsystemen geforscht /1/. Das Grundprinzip besteht in der sequentiellen Bearbeitung von Optik- und Montageflächen am Spiegelkörper in einer einzigen Maschinenaufspannung. Die Herstellung von hochqualitativen Montageflächen am Teleskopgehäuse und die Verwendung von Spiegeln mit exakten Anlagestrukturen führen zur Reduktion der Justierfreiheitsgrade infolge der Genauigkeit des Fertigungsprozesses. Die so hergestellten maßlichen Bezüge erlauben eine finale Integration des Spiegelsystems innerhalb weniger Stunden. Zusätzliche Vereinfachungen der Systemmontage können, unter Voraussetzung eines geeigneten Optikdesigns, durch Modularisierung und mechanisch gekoppelte Fertigung mehrerer Optikflächen auf einem gemeinsamen Spiegelkörper erreicht werden /2/. Zur Evaluierung von Fertigungs- und Montageprozessen wurde im Rahmen des DLR-

Modern optical telescopes for Earth observation and remote sensing operations often rely on off-axis mirror designs with aspheric or free-shaped surfaces in order to generate an unobscured image while at the same time covering a large field of view and maintaining an excellent system quality. Continuous improvements in manufacturing and test methods allow for the fabrication of freeform surfaces with low tolerance on figure and roughness. Integration and assembly remain time consuming and expensive steps within the overall system development.

At Fraunhofer IOF, continuous research on strategies for an easy integration of metal based optical systems is conducted /1/. The basic principle relies on a sequential machining of optical and mounting surfaces at the mirror body in the same machine setting. A fabrication of high quality interfaces at telescope frames and all mirror bodies reduces the considerable degrees of freedom during the system assembly. If a suitable optical design is present, further simplifications can be obtained by modularizing two optical surfaces and machining them mechanically coupled on a single mirror body /2/. In order to further evaluate machining and mounting strategies, an anamorphic imaging telescope was built within the project VISTEL, funded by the German Aerospace Center DLR. The system operates diffraction limited within the visible spectral range and uses four off-axis freeform surfaces, where each two are fabricated on a single mechanical carrier. The necessary tolerance on figure and roughness of the single surface require

1 VISTEL-Teleskop mit zusätzlichen Spiegelmodulen. | VISTEL telescope with additional mirror modules.

Förderprojektes VISTEL ein anamorphotisch abbildendes Freiformspiegelteleskop aufgebaut. Das im visuellen Spektralbereich beugungsbegrenzt arbeitende Teleskop nutzt vier außeraxial angeordnete Freiformflächen, von denen jeweils zwei als Spiegelmodul auf einem mechanischen Träger gefertigt werden. Die geforderten Form- und Rauheitstoleranzen der einzelnen Oberflächen erfordern die Anwendung einer geschlossenen Fertigungskette bestehend aus servo-gestützten Diamantdrehverfahren und Formkorrektur- bzw. Glättprozessen. Abbildung 1 zeigt den Teleskopdemonstrator mit den Spiegelmodulen M1M3 und M2M4, auf dessen freien Aperturen Formfehler von < 12 nm rms realisiert wurden. Auf allen optischen Flächen werden infolge der angewendeten Glättpolitur Mikrorauheiten von $< 0,5$ nm rms erzielt. Die Modularisierung der Spiegelflächen reduziert die relevanten Justierfreiheitsgrade des Systems von 24 auf 3. Nach vereinfachter Montage und Feinjustierung des Teleskops zeigt die experimentell bestimmte Wellenfront des Systems eine hervorragende Übereinstimmung zum optischen Design über das gesamte Bildfeld /3/. Basierend auf den grundlegend erarbeiteten Gestaltungsprinzipien soll eine vereinfachte Herstellung zukünftiger metalloptischer Freiformspiegelsysteme mit beugungsbegrenzter Abbildungsqualität im visuellen Spektralbereich adressiert werden.

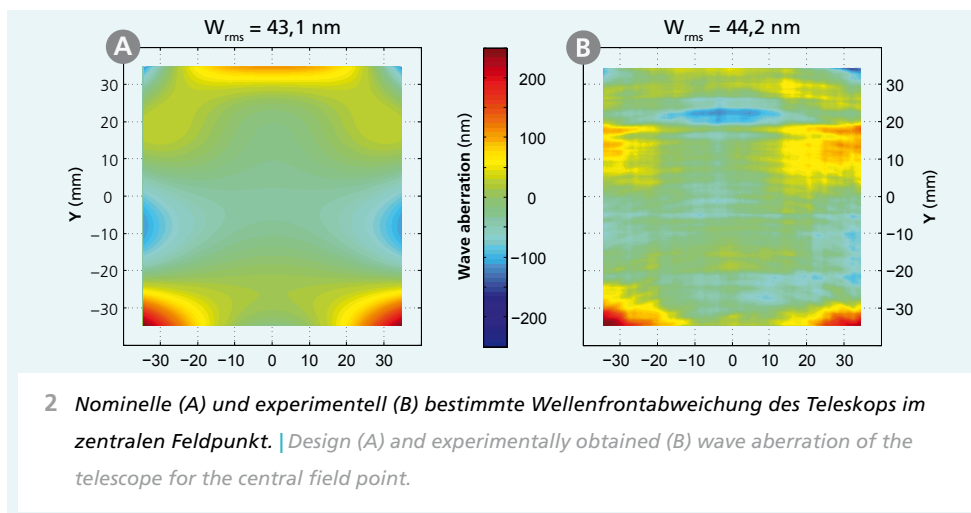
for a complete process chain based on servo assisted diamond machining, polishing, and figure correction techniques. Figure 1 shows the manufactured telescope demonstrator with both mirror modules M1M3 and M2M4, the figure errors of which were reduced to < 12 nm rms each. Microroughnesses of $< 0,5$ nm rms were realized based on the applied polishing processes. The modularization of the mirror surfaces reduces the relevant degrees of freedom for system integration from 24 to 3 only. The experimentally obtained wave aberration is in excellent agreement to the optical design after simplified system assembly and some fine adjustments /3/. Based on the fundamental design principles, a simplified fabrication of metal based freeform optical systems with diffraction limited performance at visible wavelengths will be addressed in the future.

Acknowledgements

The presented results were funded by the German Aerospace Center (DLR) within the project VISTEL under grant number 50EE1224.

References / Literatur

- /1/ Scheiding, S. et al.: SPIE Proc. Vol. 7739 (2010).
- /2/ Beier, M. et al.: Appl. Optics 54 (12) (2015).
- /3/ Beier, M. et al.: SPIE Proc. Vol. 9912 (2016).



AUTHORS

Matthias Beier
Wilko Fuhlrott
Andreas Gebhardt
Stefan Risse

CONTACT

Matthias Beier
Phone +49 3641 807-326
matthias.beier@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN UND SCHICHTEN

FUNCTIONAL SURFACES AND LAYERS

Das Fraunhofer IOF entwickelt Oberflächenfunktionalisierungen und multifunktionale optische Schichtsysteme auf unterschiedlichen Substratmaterialien für Wellenlängen vom Röntgen- bzw. Extrem-Ultraviolett- bis zum Infrarot-Spektralbereich. Dabei wird der gesamte Prozess von Design, Herstellung bis hin zur Analyse und Charakterisierung für vielfältigste Anwendungen abgedeckt.

Das Fraunhofer IOF ist weltweit führend in der Entwicklung innovativer Entspiegelungen und reflektiver Hochleistungsoptiken für die industrielle Lithografie bei extrem kurzen Wellenlängen. Zudem bietet das Fraunhofer IOF Lösungen für hochwertige Antireflexsysteme auf ebenen oder gekrümmten Glas- und Kunststoffoberflächen bis hin zur Entspiegelung von Saphir oder Diamant. Das Fraunhofer IOF ist dank seiner einzigartigen Ausstattung in der Lage, extreme Anforderungen in Bezug auf Substrate, Gradienten, spektrale Eigenschaften und Umweltbedingungen zu erfüllen.

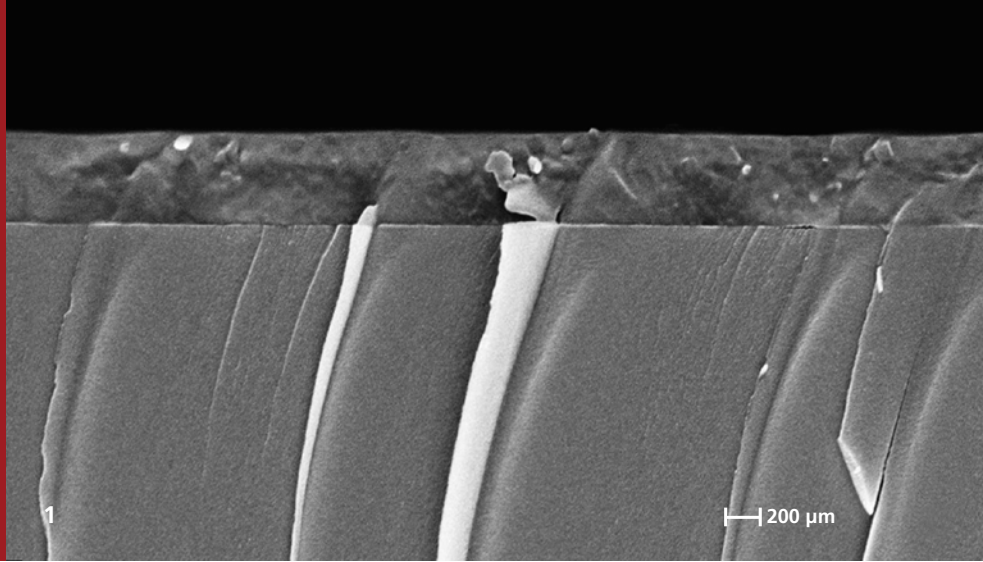
Die in 2016 in diesem Geschäftsfeld abgeschlossenen Projekte zeigen in den nachfolgenden Beiträgen eine große Bandbreite: organisch-anorganische Funktionsschichten, Schichten für eine neue Generation der EUV-Lithographie, Benetzungsanalyse oleophober Oberflächen, strukturtreue nanoporöse SiO₂-Schichten.

Fraunhofer IOF develops surface functionalizations and multifunctional optical layer systems on different substrate materials for wavelengths from the X-ray or extreme ultraviolet to the infrared spectral range. The entire process, from design and production to analysis and characterization, is covered for a wide range of applications.

Fraunhofer IOF is a world leader in the development of innovative antireflection coatings and reflective high-performance optics for industrial lithography at extremely short wavelengths. In addition, Fraunhofer IOF offers solutions for high-quality antireflex systems on flat or curved glass and plastic surfaces, as well as antireflection coating on sapphire or diamond. Due to its unique equipment, Fraunhofer IOF is capable of fulfilling extreme requirements with regard to substrates, gradients, spectral properties, and environmental conditions.

The projects completed in 2016 show a wide range of organic-inorganic functional layers, layers for a new generation of EUV lithography, wetting analysis of oleophobic surfaces, structure-controlled nanoporous SiO₂ layers.

LEFT Nanostrukturierte Entspiegelungsschicht (halbseitig) auf gekrümmter Linse. | Nanostructured antireflection coating (half sided) on curved lens.



ORGANISCH-ANORGANISCHE FUNKTIONS- SCHICHTEN DURCH KO-VERDAMPFUNG (ORKO) ORGANIC-INORGANIC FUNCTIONAL COATINGS BY CO-EVAPORATION (ORKO)

Transparente Oberflächen und funktionale Schichten spielen als photonische Komponenten bei der Beherrschung von Licht eine bedeutende Rolle und kommen auch in vielen nichtoptischen Anwendungen zum Einsatz. Beschlagbildung durch Wassertröpfchen (»Fogging«) ist ein störender Effekt, der auf optischen Oberflächen die Effizienz der Optiken vermindert und beispielsweise auf Visieren und Brillengläsern ein Sicherheitsrisiko darstellt.

In einer ausgedehnten Marktstudie zur Bewertung handelsüblicher Antibeschlag-Schichten zeigte sich, dass hydrophile oder wasseraufnehmende Materialien einer Beschlagbildung zwar entgegenwirken können, diese für die meisten praxisrelevanten Anwendungen jedoch zu weich oder nicht langzeitbeständig sind ^{1/}. Chemisch aktive Stoffe zur Realisierung der Antifog-Eigenschaften müssen daher so tief im Verbundmaterial vergraben sein, dass sie die mechanische Stabilität aber auch die optischen Eigenschaften der Oberfläche nicht beeinträchtigen.

In einer Evaluierung verschiedener niedermolekularer hydrophiler Polymere konnte erstmals Cellulose-Acetat (CA) mittels thermischer Verdampfung abgeschieden werden. Die geschlossenen homogenen Schichten zeigen bei einem Kontaktwinkel kleiner 10° sehr gute hydrophile Eigenschaften, welche auch im Langzeitversuch bestehen.

Transparent optical coatings play an important role in tailoring light. Through the use of thin films, it is possible to modify the surface depending on the environmental conditions. Fogging, which is a disturbing effect, occurs when small droplets adhere to the surface. It reduces the efficiency of optical surfaces and can also pose a significant safety risk (e.g. visors and glasses).

An extensive analysis of commercially available antifogging products concluded that hydrophilic or water-absorbing materials are theoretically suitable to counteract fogging. However, these are too soft or not long-lasting enough for most practice-orientated applications ^{1/}. The chemical components that achieve the antifogging effect must be buried deep in the composite material. It should therefore affect the mechanical stability, but not the optical properties of the surface.

In the course of the evaluation of different low molecular hydrophilic polymers, for the first time cellulose acetate (CA) could be deposited by thermal evaporation. The homogeneous layers have a contact angle lower than 10° which emphasizes the good hydrophilic property even in long-term tests. Subsequently, first experiments of combined evaporation of CA and SiO_2 have been carried out and lead to good approaches for functional surfaces.

¹ REM-Bild einer thermisch verdampften Cellulose-Acetat-Schicht (Querschnitt). |

SEM-image of a thermal evaporated cellulose-acetate layer (cross section).

Daraufhin wurden erste Versuche zur Ko-Verdampfung von CA und SiO_2 durchgeführt, welche bereits gute Ansätze in der Entstehung funktioneller Oberflächen zeigten.

Eine weitere Möglichkeit zum Schutz der empfindlichen hydrophilen Komponenten ist die nachträgliche Einbindung der Organik in ein poröses anorganisches Reservoirsystem. Dieses kann zum Beispiel durch die Ko-Verdampfung zweier Materialien ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) gefolgt vom anschließenden Herauslösen einer Komponente erzeugt werden. Ein alternativer Forschungsansatz ist die Befüllung von porösen SiO_x -Schichten, die im Combustion Chemical Vapour Deposition-Verfahren (CCVD) /2/ hergestellt werden. Für die Befüllung werden von den Industriepartnern bereitgestellte Antifog-Lacke sowie neue hydrophile Materialien evaluiert.

An dem laufenden Projekt der Europäischen Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. (EFDS) gefördert durch die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) beteiligen sich acht Industriepartner aus den Bereichen Brillenglas, Fahrzeugbau, Beschichtungstechnik und Spezialchemie (FKZ: 18778 BR).

To protect the hydrophilic components, the organic compounds can also be incorporated in porous oxide layers. Such a reservoir-system can be obtained, for example, by co-evaporation of two materials (e.g. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) followed by dissolving and removing one component. Alternatively, porous SiO_x -layers produced by Combustion Chemical Vapor Deposition (CCVD) /2/ can be filled. For filling experiments, antifogging lacquers provided by the industrial partners and some alternative hydrophilic materials will be tested.

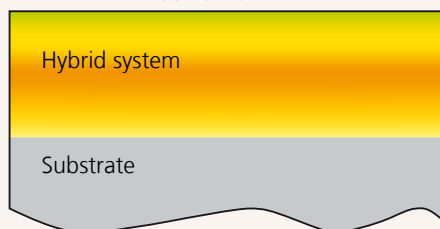
Eight industrial partners of various research areas such as ophthalmic lenses, automotive engineering and specialty chemicals collaborate for this current project of the European Society for Thin Films (EFDS) supported by the Industrial Research Associations (grant number: 18778 BR).

References / Literatur

- /1/ H. Müller: Bewertung der Beschlageigenschaften von Antifog-Beschichtungen auf Brillengläsern und Visieren, Bachelor Thesis, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 2014.
/2/ <http://www.innovent-jena.de/de>

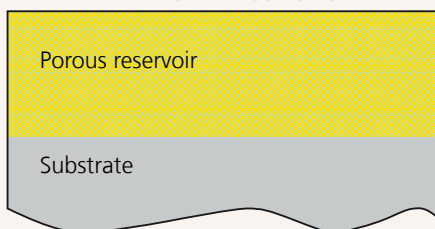
Co-evaporation

Oxide + antifogging-agent



Porous layer

Filled with curing antifogging-agent



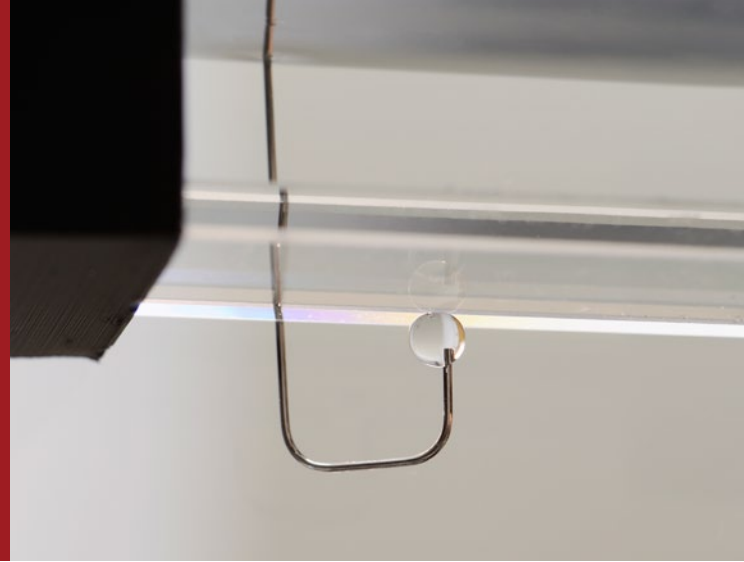
- 2 Theoretische Ansätze zur Realisierung einer mechanisch stabilen und langlebigen organisch-anorganischen Antibeschlag-Funktionsbeschichtungen. | Theoretical approaches to realize the mechanical stable and long-lasting organic-inorganic antifogging functional coatings.

AUTHORS

Heike Müller
Christiane Weber
Heiko Knopf
Eric Henker
Ulrike Schulz

CONTACT

Dr. Ulrike Schulz
Phone +49 3641 807-344
ulrike.schulz@iof.fraunhofer.de



BENETZUNGSANALYSE OLEOPHOBER GLASOBERFLÄCHEN UNTER WASSER WETTING ANALYSIS OF OLEOPHOBIC GLASS SURFACES IMMERSED IN WATER

Das Benetzungsverhalten funktionaler Oberflächen spielt für verschiedenste Anwendungen eine große Rolle. Neben den klassischen funktionalen Eigenschaften wie dem Selbstreinigungs- (Superhydrophobie) und dem Anti-Beschlag-Effekt (Superhydrophilie) ist der Einsatz von stark oleophilen oder oleophoben Oberflächen für tribologische Systeme, Endoskopie oder Unterwassersensoren von wachsendem Interesse. Die meisten dieser Anwendungen erfordern nicht nur die Untersuchung der Oberflächeneigenschaften in Luft, sondern auch in Wasser oder anderen Flüssigkeiten.

Das Fraunhofer IOF entwickelt kontinuierlich die Methodologie der Benetzungsanalyse weiter, um die Benetzungseigenschaften verschiedener Systeme, angepasst und optimiert an die jeweilige Anwendung, umfassend aufzuklären. Die aktuellste Entwicklung besteht aus einem experimentellen Aufbau zur Untersuchung der Benetzung von Öl auf Festkörperoberflächen, die in Wasser eingetaucht sind. Der Aufbau (Abb. 1) besteht neben anderen Komponenten aus einer mit bi-distilliertem Wasser gefüllten Küvette mit hoher optischer Qualität und aus einer speziellen Nadel zur Positionierung der Öltröpfen auf die Unterseite der Probenoberfläche. Zum Nachweis von Korrelationen zwischen Oberflächenrauheit und Benetzung mit Öl wurden Al_2O_3 -Sol-Gel-Schichten mit einstellbarer Nanorauheit verwendet. Dabei zeigte sich, dass Oberflächen mit

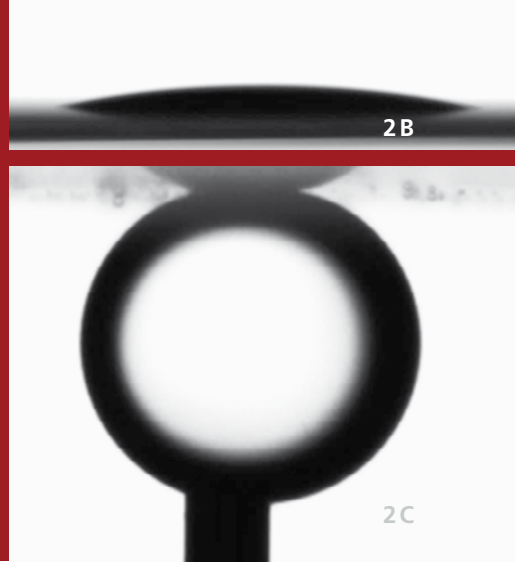
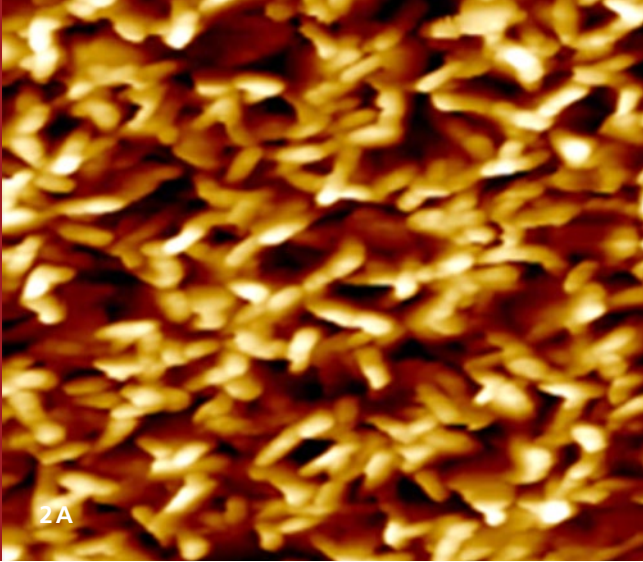
The wettability of functional surfaces is a challenge for various applications. Besides typical functions, such as self-cleaning (superhydrophobicity) and anti-fogging (superhydrophilicity), the use of strongly oleophilic or oleophobic surfaces for tribological systems, endoscopy, or under water sensors is of growing interest. Most of these applications require the investigation of their surface properties not only when surrounded by air, but also when immersed in water or any other liquid.

Fraunhofer IOF is working continuously towards the advancement of its wetting analysis methodology for a thorough understanding of the wetting properties of various systems adapted and optimized for specific applications. The latest development is an experimental setup for the investigation of wetting by oil while the solid surface is immersed in water. This setup (Fig. 1) consists, among other components, of a bi-distilled water filled cuvette with high optical quality, and a curved needle to position the oil drops below the sample surface. Al_2O_3 sol-gel coatings with adjustable nanoroughness were manufactured and used to establish correlations between surface roughness and wetting with oil as the liquid phase. This investigation has shown that surfaces with a specific roughness (Fig. 2A) and oleophilic behavior in air (Fig. 2B) lead to a stable superoleophobicity when immersed in water (Fig. 2 C). Nevertheless, oleophobic surfaces in both air and

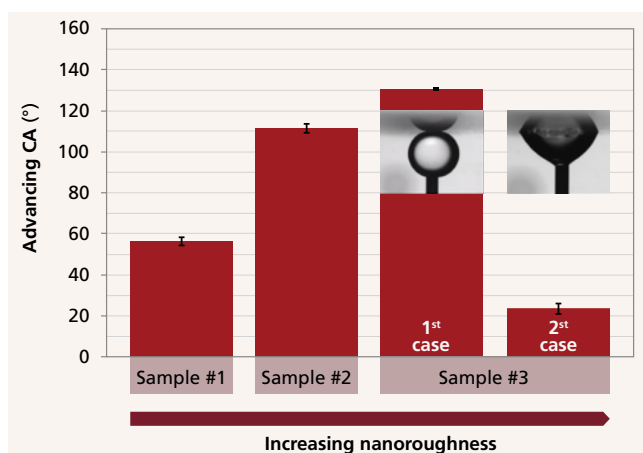
1 Aufbau zur Unterwassermessung. | Experimental setup for underwater investigation.

2 Oleophile Al_2O_3 -Sol-Gel-Schicht: Topografie (A), Öltröpfen an Luft (B), Öltröpfen unter Wasser (C). |

Oleophilic Al_2O_3 sol-gel coating: topography (A), oil drop surrounded by air (B), oil drop immersed in water (C).



einer bestimmten Rauheit (Abb. 2A) und gleichzeitig oleophilem Verhalten in Luft zu stabiler Superoleophobie unter Wasser führen (Abb. 2C). Für Unterwasseranwendungen sind jedoch oleophobe Oberflächen sowohl in Luft als auch in Wasser erforderlich. Al_2O_3 -Schichten mit einer definierten Rauheit sowie einer zusätzlichen dünnen Deckschicht zur Minimierung der Oberflächenenergie weisen in Luft oleophobes Verhalten auf. Wie in Abb. 3 dargestellt, beeinflusst die Oberflächenrauheit auch das Benetzungsverhalten der Al_2O_3 -Schichten in Wasser. Die Probe #3 mit der höchsten Rauheit weist in beiden Phasen (Luft und Wasser) einen Fortschreitekontaktwinkel von Öl höher als 100° (Abb. 3: 1st case) auf. Allerdings ist das oleophobe Benetzungsverhalten unter Wasser bisher noch nicht stabil: Eine Erhöhung des Drucks oder eine geringe Bewegung der Nadel führt zum oleophilen Benetzungsfall (Abb. 3: 2nd case) /1/. Weitere Aktivitäten betreffen die Optimierung quantitativer Methoden der Benetzungsanalyse für Unterwasseranwendungen und die Realisierung stabiler oleophober Benetzungssysteme. Die Forschungsarbeiten wurden insbesondere im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts GLAMOR /2/ durchgeführt.



3 Kontaktwinkelmessungen unter Wasser: Al_2O_3 -Sol-Gel-Schichten mit zusätzlichem Toplayer zur Verringerung der Oberflächenenergie. | Advancing contact angle of Al_2O_3 sol-gel coatings with top layer minimizing surface energy.

water are required for underwater applications. Al_2O_3 coatings with a certain surface roughness and an additional top layer to minimize the surface energy exhibit oleophobic behavior in air. As shown in Figure 3, the surface roughness influences the wetting behavior when the Al_2O_3 coatings are immersed in water. The roughest sample #3 reveals an advancing oil contact angle higher than 100° (Fig. 3: 1st case) in both fluid phases (air and water). However, the oleophobic wetting situation under water is not yet stable: By increasing the pressure or small movement through the needle, transfers to the oleophilic wetting situation occur (Fig. 3: 2nd case) /1/. Further activities focus on the optimization of the quantitative wetting analysis method for underwater applications and the realization of stable oleophobic wetting systems. Research was performed within the framework of the BMBF joint project GLAMOR /2/.

References / Literatur

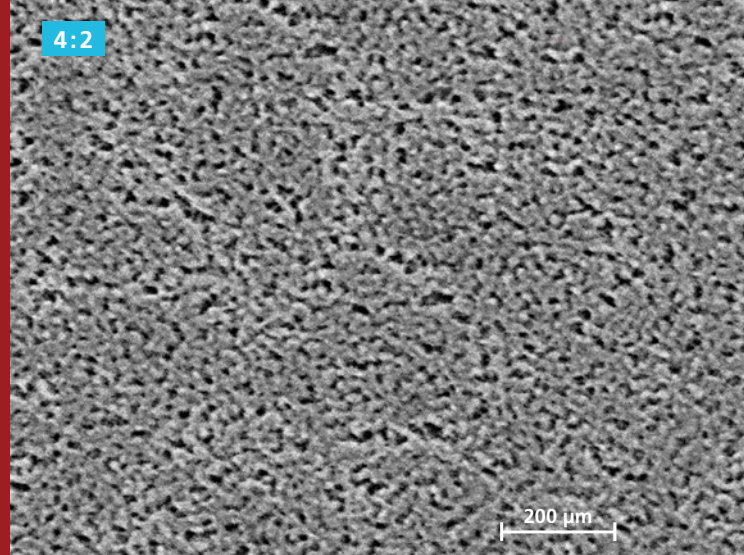
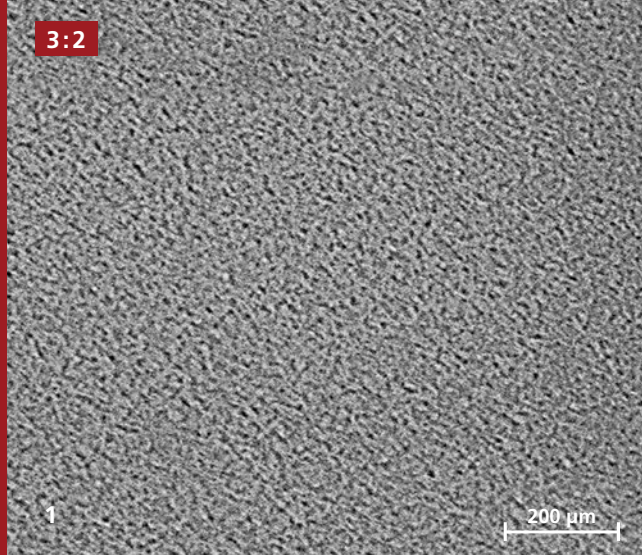
- /1/ L. Coriand, N. Felde, A. Duparré: Oleophilic and Oleophobic Nanorough Surfaces Immersed in Air or in Water, (submitted to Adv. in Contact Angle, ... Vol. 3).
 /2/ BMBF, FKZ 03XP0017A-D

AUTHORS

Luisa Coriand
 Nadja Felde
 Anna Gottwald
 Angela Duparré

CONTACT

Dr. Luisa Coriand
 Phone +49 3641 807-247
 luisa.coriand@iof.fraunhofer.de

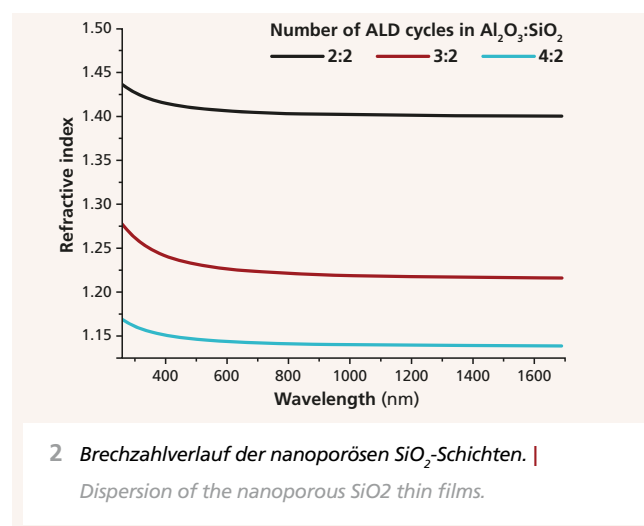


STRUKTURTREUE NANOPORÖSE SiO₂-SCHICHTEN MIT MASSGESCHNEIDERTER BRECHZAHL CONFORMAL NANOPOROUS SiO₂ FILMS WITH TAILORED REFRACTIVE INDEX

Nanoporöse dünne SiO₂-Schichten sind essentielle Bestandteile in verschiedenen optischen Anwendungen. Diese artifiziellen Materialien besitzen eine Brechzahl, die deutlich niedriger als die des nichtporösen SiO₂ ist. Für eine Einzelschichtentspiegelung sollte die Brechzahl der Beschichtung gleich der Wurzel der Brechzahl des Substrates sein. Zur Entspiegelung von Quarz und anderen hochbrechenden Glassubstraten ist somit eine Beschichtung mit einer Brechzahl von ca. 1,20 bis 1,30 notwendig. Für breitbandige Entspiegelungen sind Schichten mit deutlich niedrigeren Brechzahlen erwünscht. Verschiedene Verfahren (Sol-Gel, Glanzwinkelabscheidung, Beschichtungen mit mesoporösen SiO₂-Nanopartikeln etc.) wurden eingesetzt, um nanoporöse SiO₂-Schichten herzustellen. Die präzise Kontrolle der Brechzahl und der Schichtdicke sowie die strukturtreue Beschichtung auf stark gekrümmten, 3D geformten Substraten wie z. B. Linsen, Kegeln, Zylindern stellen noch immer eine Herausforderung dar. Im Gegensatz zu anderen Beschichtungstechnologien, ermöglicht die Atomlagenabscheidung (ALD) konforme Beschichtungen mit präzise kontrollierbarer Zusammensetzung und Schichtdicke unabhängig von der geometrischen Form des Substrats.

Wir haben ein neues Verfahren zur Herstellung von dünnen nanoporösen SiO₂-Schichten entwickelt ^{1/}. Dabei wurden atomar vermischte Al₂O₃:SiO₂-Komposite abgeschieden und die Al₂O₃-Komponente selektiv entfernt, sodass eine nanoporöse SiO₂-Schicht entsteht. Im Vergleich unterschiedlicher Beschich-

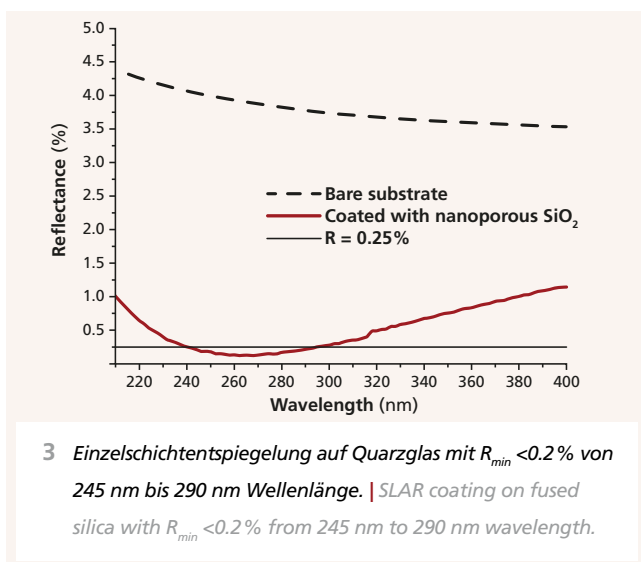
Nanoporous SiO₂ thin films have attracted intensive research interest for optical applications. Such artificial low refractive index materials are essential for antireflection coatings. In the case of a single layer antireflection coating (SLAR), the refractive index of the coating is equal to the square root of the refractive index of the substrate material. For fused silica and glass substrates, the thin film should have a refractive index in the range of 1.20 to 1.30. Even lower refractive index coatings are required for broadband antireflection coatings. Therefore, various methods have been developed to deposit nanoporous SiO₂ thin films such as sol-gel, glancing angle deposition, deposition of mesoporous silica nanoparticles, etc. The precise control of the reflection index and film thickness, and the conformal coating of highly curved 3D shaped substrates such as lenses, cones and cylinders, etc.



1 REM-Aufnahmen der mittels ALD hergestellten nanoporösen SiO₂-Schichten. | SEM images of nanoporous SiO₂ made by ALD.

tungsverfahren wurden die besten Ergebnisse mit ALD erzielt, da diese eine präzise und reproduzierbare Zusammensetzung der Kompositen ermöglicht. Typischerweise bilden zwei ALD-Zyklen SiO_2 (ca. 2 Å) kombiniert mit zwei bis vier ALD-Zyklen Al_2O_3 (ca. 2 bis 4 Å) die Basissequenz in diesen Mischsystemen. Die gewünschte Schichtdicke erreicht man durch die mehrfache Wiederholung der Al_2O_3 : SiO_2 -Basissequenz. Durch die Erhöhung des Anteils der Al_2O_3 -Komponente, welche selektiv entfernt wird, erhält man nanoporöse SiO_2 -Schichten mit einer steigenden Porosität von 10 % bis 69 %, deren Brechzahl von 1,40 bis 1,13 abgestimmt ist (Abb. 1-2).

Nanoporöse SiO_2 -Schichten wurden als Entspiegelungsschichten für verschiedene Glassubstrate angewendet. Eine Schicht, welche durch das Ätzen des Al_2O_3 : SiO_2 -Komposits mit einem ALD-Zyklen Verhältnis von 3:2 entsteht, wurde erfolgreich als Einzelschichtentspiegelung für den spektralen UV-Bereich bei 256 nm Wellenlänge eingesetzt. Die Variation der Schichtdicke ermöglicht die Verschiebung der minimalen Reflexion im gewünschten Wellenlängenbereich (Abb. 3). Diese Schichten sind als abschließende Schicht von Interferenzschichtsystemen für breitbandige Entspiegelungen vorgesehen.



remains challenging. In contrast to other coating technologies, atomic layer deposition (ALD) enables conformal coatings with precise composition and thickness control independent of the geometrical shape of the substrate. We have developed a new synthetic route for nanoporous SiO_2 thin films by atomically mixing SiO_2 and Al_2O_3 followed by selective removal of the alumina constituent. In comparison to other deposition methods, the best results were obtained using ALD which allows precise and reproducible control of the Al_2O_3 : SiO_2 ratio in the composites. In general, two ALD-cycles of SiO_2 corresponding to approximately 2 Å and two to four ALD-cycles of Al_2O_3 corresponding to 2 to 4 Å build the basic sequence of the composite materials. The final thickness is achieved by repeating the Al_2O_3 : SiO_2 sequence until the desired thickness is reached [1]. By increasing the Al_2O_3 content, the final SiO_2 film porosity has been tailored from 10 % to 69 %, which in turn has resulted in a decrease of the refractive index from 1.40 to 1.15 at 632.8 nm wavelength (Figs. 1 and 2). The nanoporous SiO_2 films were applied as antireflection coatings on various glass substrates. A single layer antireflection (SLAR) coating for the UV spectral range around 256 nm wavelength was demonstrated using an Al_2O_3 : SiO_2 composite with the ALD-cycle ratio 3:2. The control of the film thickness led to the minimum reflectance R at the required wavelength (Fig. 3). Such coatings are designated as top layer for broadband antireflection coatings.

Literatur / References

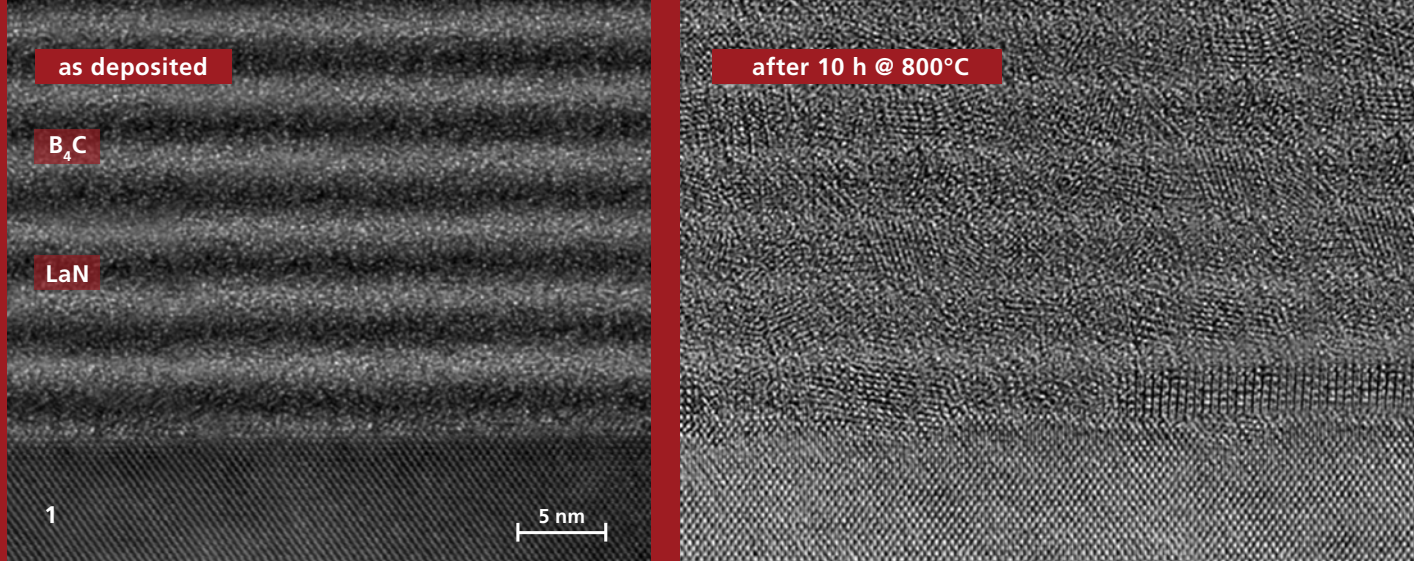
/1/ L. Ghazaryan, E. B. Kley, A. Tünnermann, A. Szeghalmi: Nanotechnology 27, 255603 (2016).

AUTHORS

Lilit Ghazaryan
Ernst-Bernhard Kley
Adriana Szeghalmi

CONTACT

Dr. Adriana Szeghalmi
Phone +49 3641 807-320
adriana.szeghalmi@iof.fraunhofer.de



ERSTE SCHRITTE ZU EINER NEUEN GENERATION DER EUV-LITHOGRAPHIE THE FIRST STEP FOR A NEW LITHOGRAPHY GENERATION

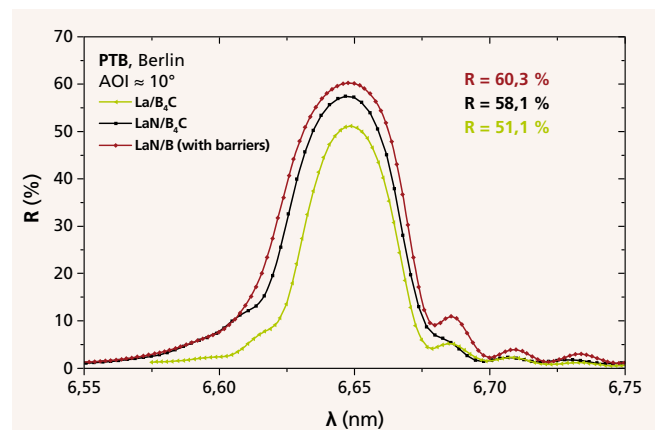
Während die EUV-Lithographie bei 13,5 nm bereits kurz vor der Markteinführung steht, müssen jetzt schon die Grundlagen für die nächste Generation gelegt werden, für die derzeit nur EUV-Strahlung einer Wellenlänge von etwa 6,7 nm in Frage kommt. Ein Schlüsselement dieser Technologie stellen die hochreflektierenden Multilayerspiegel dar, mit deren Entwicklung sich das Fraunhofer IOF seit nun drei Jahren befasst hat.

Diese Spiegel bestehen aus über 500 abwechselnden Schichten von Bor- und Lanthanverbindungen, die jeweils nur ein bis zwei Nanometer dick sind (Abb. 1), und können theoretische Reflexivitäten von bis zu 80 % erreichen. Allerdings verringern breite und raue Grenzflächen, die durch das nicht ideale Schichtwachstum und Diffusion der Materialien ineinander hervorgerufen werden, derart hohe experimentelle Reflexionswerte.

Durch geeignete Auswahl chemisch stabiler Materialien konnten bereits hohe Reflexionswerte von etwa 58 % erreicht werden. Zusätzlich können u. a. ultradünne Barrierschichten ($d \leq 0,5$ nm) an den Grenzflächen aufgebracht werden, womit die Reflexivitäten weiter auf über 60 % (Abb. 2) erhöht worden sind. Neben der hohen Reflexion stellt die Industrie auch weitere Ansprüche an die Spiegel: Sie müssen spannungsarm sein und erhöhten Temperaturen von ca.

While the EUV lithography at 13.5 nm is close to market launch, the basic concepts for the next generation with a working wavelength of 6.7 nm must be investigated now. Here, high reflective multilayer mirrors ($R \geq 70\%$) act as a key technology and have been developed by Fraunhofer IOF over the last three years.

Consisting of more than 500 alternating layers of Boron and Lanthanum compounds, each with a thickness of only a few nanometers (Fig. 1), these mirrors may reach up to 80 % reflection in theory. However, due to imperfect film growth and interdiffusion at the interfaces, such high optical performance cannot be achieved in real multilayer structures.



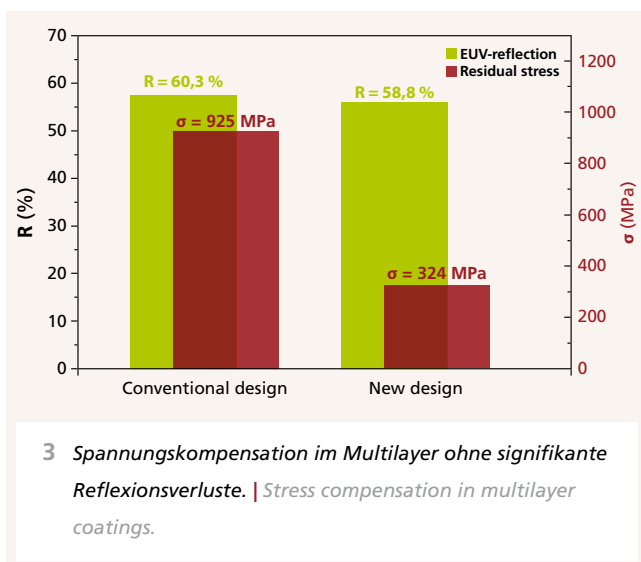
1 TEM-Aufnahme eines LaN/B₄C-Multilayerspiegels. |

TEM of a LaN/B₄C multilayer mirror.

2 Experimental EUV reflection at 6.7 nm. | Experimental EUV reflection at 6.7 nm.

200 °C standhalten. Die $\text{LaN/B}_4\text{C}$ Spiegel zeigten auch nach dem Erhitzen auf 250 °C lediglich 3 % Reflektivitätsverlust und wiesen selbst nach 800 °C noch eine periodische Struktur auf (Abb. 1), was deren thermische Stabilität belegt. Die hohen Verspannungen im Multilayer von bis zu 1 GPa konnten durch ein neues Design, das Kompensationsschichten nutzt, auf ein Drittel des ursprünglichen Wertes reduziert werden, ohne dass dies zu signifikanten Reflexionseinbußen des Multilayers führte (Abb. 3).

Die Arbeiten an den Multilayerspiegeln sind allerdings noch nicht abgeschlossen: Obwohl das Fraunhofer IOF nun bereits drei Patente für hochreflektierende und spannungsarme Multilayer für 6,3 nm erarbeitet hat, müssen bis zur geplanten Markteinführung der nächsten Generation der EUV-Lithographie in den kommenden 10 Jahren noch höhere Reflexionswerte erreicht und stabilere Spiegel entwickelt werden, während andere Institute wie das Fraunhofer ILT in Aachen an leistungsfähigen Strahlungsquellen für diese Wellenlänge arbeiten.



Through the choice of suitable and chemically more stable materials, high reflectivities of 58 % could be reached. In addition, ultrathin diffusion barriers with only a few Ångström thickness ($d \leq 0,5 \text{ nm}$) can be applied at the interfaces, increasing the reflectance to more than 60 % (Fig. 2).

In addition to high reflectivity, industry demands low-stress coatings capable of withstanding elevated temperatures of up to 200 °C. After annealing up to 250 °C, $\text{LaN/B}_4\text{C}$ multilayer showed slight reflection losses of only 3 %. Even after tempering at 800 °C for 10 h, a periodical structure of the multilayer still existed (Fig. 1), thus verifying the sufficient thermal stability. The high residual stress of about 1 GPa could be significantly reduced to one third of the initial value by the introduction of compensating layers into the multilayer design while still maintaining high reflectivity (Fig. 3).

Nonetheless the research on the multilayer mirrors is still ongoing. Although Fraunhofer IOF has developed three patents for high reflective and low-stress multilayer mirrors for 6,3 nm, even higher reflectivities and more stable coatings have to be developed by the market launch within the next 10 years. Meanwhile, other institutes such as Fraunhofer ILT in Aachen are pushing forward the research for powerful light sources.

AUTHORS

Philipp Naujok
Sergiy Yulin
Norbert Kaiser

CONTACT

Dr. Sergiy Yulin
Phone +49 3641 807-241
sergiy.yulin@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



PHOTONISCHE SENSOREN UND MESS-SYSTEME / PHOTONIC SENSORS AND MEASURING SYSTEMS

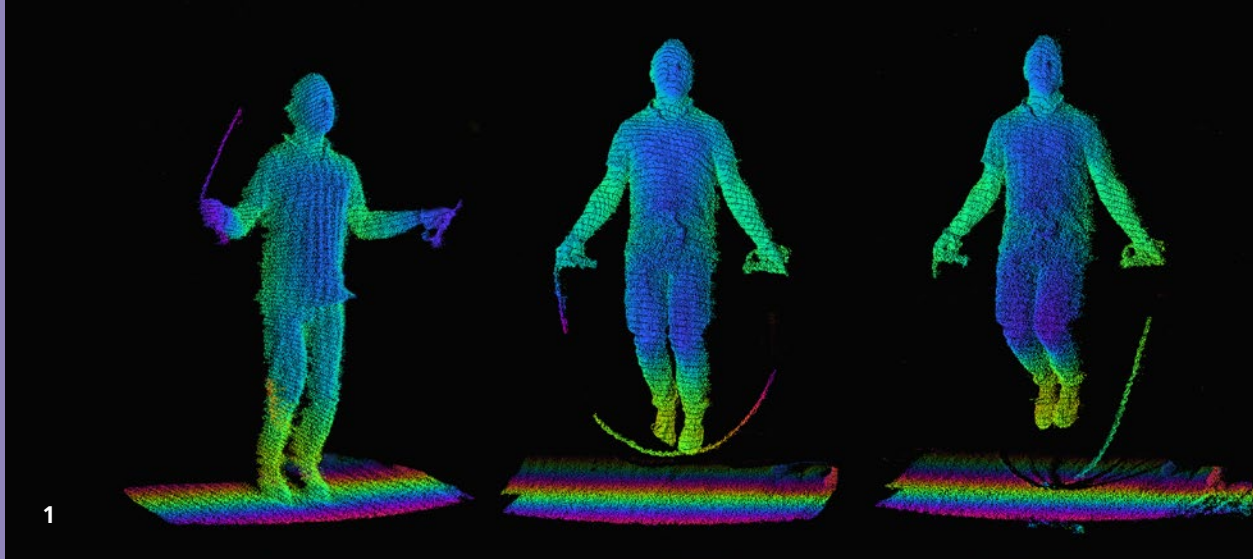
Das Fraunhofer IOF entwickelt optische und opto-elektronische Mess- und Sensorsysteme. Die Forschungsarbeiten umfassen neuartige Messmethoden, Sensorprinzipien und Auswerteverfahren sowie Systemlösungen. Das Fraunhofer IOF nutzt modernste optische und miniaturisierte bzw. mikrooptische Komponenten sowie Sende- und Empfangseinheiten, Projektionstechniken, Lichtquellen, Softwaretechnologien und Rechnerarchitekturen. Einen Schwerpunkt bilden Lösungen für 3D-Messsysteme für Anwendungen in der Produktion und Medizin, basierend auf Verfahren der Muster- und Streifenprojektion. Einen zweiten Arbeitsschwerpunkt bilden Systeme zur Schicht- und Oberflächencharakterisierung, darunter streulichtbasierte Messsysteme zur Rauheitsbestimmung und Mikro- und Nanostrukturvermessung. Ein Alleinstellungsmerkmal bilden die Entwicklungsarbeiten zu ultrakompakten multikanaligen mikrooptischen Bilderfassungssystemen auf der Grundlage bio-inspirierter Ansätze. Eingesetzt werden solche optischen Sensoren, wie z.B. ultradünne mikrooptische Kameras (facetvision), in mobilen Endgeräten und im Automotive-Bereich.

Viele der genannten Themen wurden 2016 bearbeitet und sind in den nachfolgenden Beiträgen dargestellt, wie zum Beispiel die 3D-Körpervermessung und Gesichtserkennung, Multiaperturkameras, Spektroskopie oder robotergestützte Streulichtsensorik.

Fraunhofer IOF develops optical and opto-electronic measuring and sensor systems. The research includes novel measuring methods, sensor principles, and evaluation methods as well as system solutions. Fraunhofer IOF uses state-of-the-art optical and miniaturized or microoptical components as well as transmitting and receiving units, projection techniques, light sources, software technologies, and computer architectures. One focus is on solutions for 3D measuring systems for applications in production and medicine, based on methods of pattern or strip projection. A further focus is on systems for layer and surface characterization, including straylight based measuring systems for roughness determination or micro- and nanostructure measurement. A unique feature is the development of ultra-compact multi-channel microoptic imaging systems based on bio-inspired approaches. Such optical sensors, e.g. ultra thin microoptical cameras (facetvision), are used in mobile end devices and in the automotive field.

Many of the topics discussed were worked on in 2016 and are presented in the following articles, for example 3D body measurement and facial recognition, multi-aperture cameras, spectroscopy and robot-based scattered-light sensors.

LEFT *Irritationsfreies Infrarot-GOBO-System für die Echtzeit-3D-Bildaufnahme. | Irritation-free near infrared GOBO system for real-time 3D measurements.*



KÖRPERVERMESSUNG IN BEWEGUNG: HIGH-SPEED-3D-DETEKTION BODY MEASUREMENT IN MOTION: HIGH-SPEED 3D DETECTION

Während die Entwicklung technischer Geräte (z. B. Smartphones, Automobiltechnik, Medizintechnik) rasant voranschreitet, spielt die Verbesserung ihrer Interaktion mit dem Menschen bisher eine untergeordnete Rolle. Maschinen sind meist Werkzeuge, deren Bedienung man erlernen und beherrschen muss. Um stattdessen eine adäquate Mensch-Maschine-Interaktion zu realisieren, muss die Maschine in die Lage versetzt werden, Gestik und Mimik des Menschen zu erkennen und zu interpretieren.

Am Fraunhofer IOF wurden verschiedene Systeme entwickelt, die die dreidimensionale Erfassung schneller Körperbewegungen ermöglichen. Dabei wird mit Hilfe eines neu entwickelten High-Speed-Projektors eine Abfolge bestimmter Muster auf die Person projiziert und von einem Stereokamerasystem beobachtet. Durch Korrelation der Kamerabilder und anschließende Triangulation können einige Hundert bis Tausend hochgenaue 3D-Punktwolken pro Sekunde generiert werden ¹, ².

Einer der entwickelten 3D-Sensoren ermöglicht aufgrund der hohen verfügbaren Lichtmenge des Projektors die Erfassung großer Messfelder und somit die schnelle Ganzkörpervermessung. Auf diese Weise konnten u. a. ein Seilspringer in Bewegung (Abb. 1) oder ein Fußballspieler während eines Schusses bei einer 3D-Rate von mehr als 1.300 Hz und einer Auflösung von bis zu 1.000 x 1.000 Punkten vermessen werden.

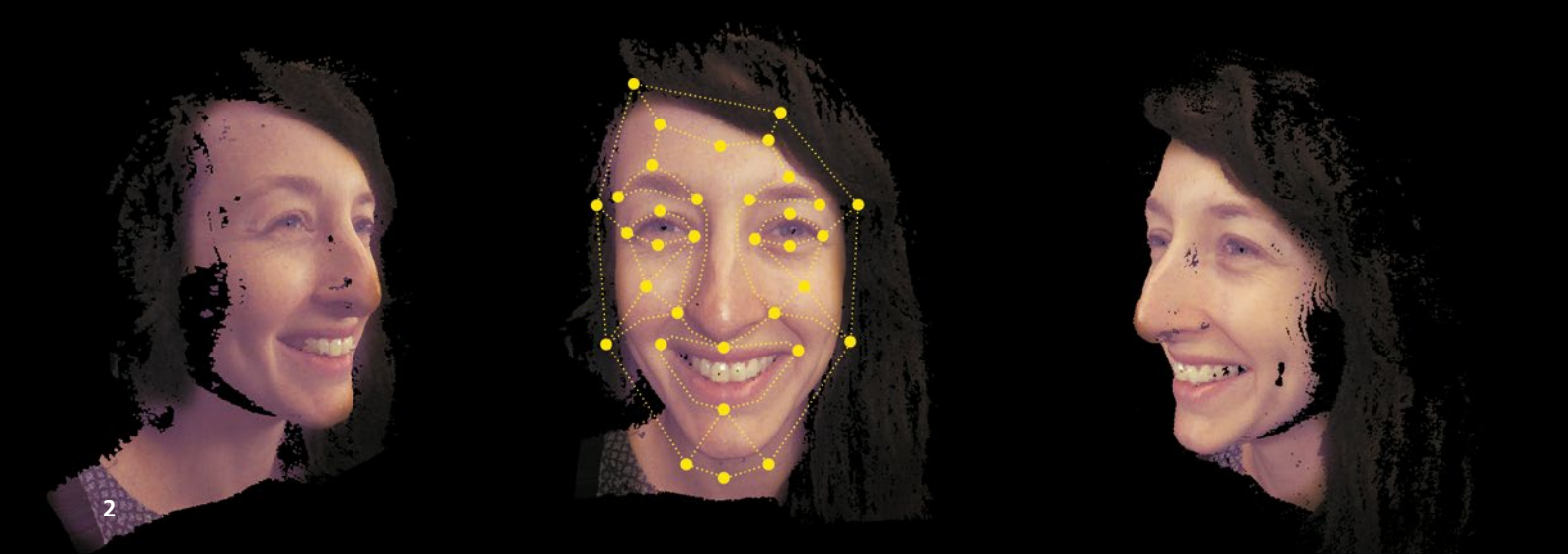
Whereas the development of technical devices (e.g., smartphones, automotive technology, medical technology) rapidly progresses, the improvement of their interaction with the user plays a minor role. Usually, machines are tools whose operation has to be learned and mastered. In order to realize an adequate human-machine interaction instead, the machine needs to be able to detect and interpret human gestures and facial expressions.

At the Fraunhofer IOF, we have developed various systems that enable us to capture fast body movements three-dimensionally. A sequence of certain patterns is projected onto a person by a newly developed high-speed projector and observed by a stereo camera system. By correlating the camera images and subsequently performing triangulation, we can generate several hundred to thousand high-precision 3D point clouds per second ¹, ².

Due to the high radiant flux of its projector, one of the developed 3D sensors is suited for large measurement fields and thus whole-body measurements. Using this sensor, we recorded a rope skipper in motion (Fig. 1), a soccer player during a shot, and other highly dynamic processes at a 3D frame rate of more than 1,300 Hz and at a resolution of up to 1,000 x 1,000 points.

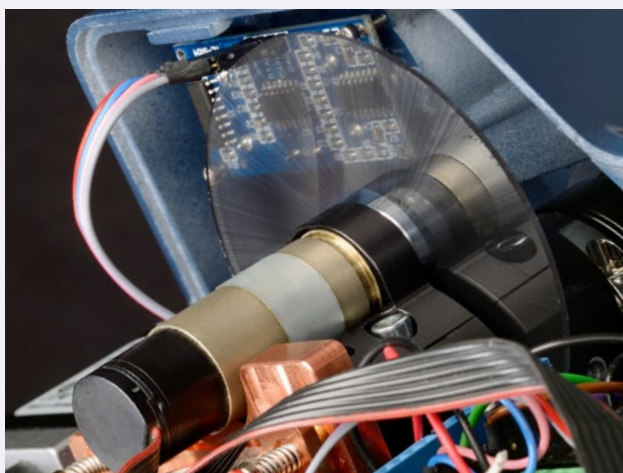
¹ Hochgeschwindigkeits-3D-Vermessung eines Seilspringers. | High-speed whole-body recording of a rope skipper.

² Irritationsfreie dynamische 3D-Gesichtsvermessung. | Irritation-free dynamic 3D face measurement.



Darüber hinaus wurde ein System entwickelt, das sich durch die schnelle Projektion und Detektion der Muster bei einer Wellenlänge von 850 nm auszeichnet. Durch den Übergang vom sichtbaren Spektralbereich zum für den Menschen nicht wahrnehmbaren nahen Infrarot (NIR) erfolgt die Messung komplett irritationsfrei. Zudem können mit Hilfe einer zusätzlichen RGB-Kamera parallel zur 3D-Messung Farbinformationen gewonnen werden. Der entwickelte Sensor kann daher beispielsweise zur Erkennung und Analyse emotionaler Gesichtsausdrücke (Abb. 2) eingesetzt werden.

Die Bandbreite potenzieller Systemauslegungen reicht von extrem schnell (mehrere Kilohertz 3D-Rate), über sehr große Messfelder (mehrere Quadratmeter) bis hin zur irritationsfreien Vermessung. Damit werden vielfältige Möglichkeiten für die Mensch-Maschine-Interaktion eröffnet, z. B. hinsichtlich interaktiver Trainingssysteme, Fahrzeuginnenraumüberwachung oder Sicherheitstechnik im öffentlichen Raum. Zukünftige Untersuchungen am Fraunhofer IOF haben die Optimierung sowohl der verwendeten Hardware als auch der Algorithmik zur Berechnung der 3D-Daten zum Ziel.



3 NIR-High-Speed-Projektor. | NIR high-speed projector.

Furthermore, we developed a system which features the fast projection and detection of the patterns at a wavelength of 850 nm. By transitioning from the visible spectral range to the near infrared (NIR, being imperceptible to the human eye), disturbing glare effects are avoided. Besides, an additional RGB camera can be used to simultaneously obtain color information. Hence, the developed sensor can be used for detecting and analyzing, e.g., emotional face expressions (Fig. 2).

The spectrum of potential system configurations ranges from superfast (several kilohertz 3D rate), through very large measurement fields (several square meters) to irritation free. This opens up further possibilities for human-machine interaction, e.g., with regard to interactive training systems, car interior monitoring, or security technology in public space. Future investigations at the Fraunhofer IOF aim to optimize the hardware as well as the algorithms for 3D data computation.

References / Literatur

- /1/ S. Heist, A. Mann, P. Kühmstedt, P. Schreiber, G. Notni: Array projection of aperiodic sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement, *Opt. Eng.* 53(11) (2014).
- /2/ S. Heist, P. Lutzke, I. Schmidt, P. Dietrich, P. Kühmstedt, G. Notni: High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection, *Opt. Lasers Eng.* 87, 90-96 (2016).

AUTHORS

Stefan Heist
 Peter Lutzke
 Ingo Schmidt
 Peter Kühmstedt
 Gunther Notni

CONTACT

Prof. Dr. Gunther Notni
 Phone +49 3641 807-217
gunther.notni@iof.fraunhofer.de



3D-LIPPENABLESER – 3D-GESICHTS- ERFASSUNG FÜR DIE SPRACHERKENNUNG 3D LIP READING – 3D FACE SCANNING FOR SPEECH RECOGNITION

Die Erkennung von Sprache geschieht überwiegend über den hörbaren Schall. Mit dem McGurk-Effekt ^{1/} wurde aber nachgewiesen, dass jeder Mensch zusätzlich visuelle Eindrücke in die Sprachwahrnehmung integriert und so das Sprachverständnis erhöht. Professionelle Lippenleser sind sogar in der Lage, ausschließlich aus den Gesichtsbewegungen die Sprache zu erkennen. Die maschinelle Spracherkennung aus akustischen Signalen ist bereits kommerziell als Software verfügbar und in vielen Anwendungen integriert. Für Situationen, in denen das akustische Signal gestört oder gar nicht verfügbar ist (z. B. in lauten Umgebungen, stumme Personen), wird ein maschinelles Lippenlesen benötigt.

Am Fraunhofer IOF werden Forschungen zum maschinellen Lippenlesen mittels schnellen 3D-Messverfahren basierend auf der Musterprojektion durchgeführt. Hierbei wird das Gesicht mit zwei Stereokameras aufgenommen und mit einem NIR-High-Speed-Musterprojektor irritationsfrei strukturiert beleuchtet. Es ist dadurch möglich, zeitaufgelöste 3D-Punktewolken des Gesichtes mit einer Genauigkeit im μm -Bereich zu erfassen (Abb. 1). Bei einer 3D-Bildrate von 65 Hz wurden 240 Messreihen verschiedener Versuchspersonen beim Sprechen einfacher Laute aufgenommen. Darauf aufbauend wurde eine Methodik entwickelt, mit der mittels kombinierter 2D / 3D-Bildauswertung die eigentlichen Sprechbewegungen extrahiert werden. Hierbei werden markante Punkte der Lippen und des Mundbereiches

McGurk effect ^{1/} shows that each person realizes visual impressions for better speech comprehension and does not only use the acoustic audible voice. Professional lip readers are able to identify spoken words through analyzing facial actions alone. Automatic speech recognition through acoustic signals is already commercially available and used in many applications. However, situations in which acoustic signals are not available or being disturbed, machine lip reading would be necessary (e.g. noisy environments, speech-impaired persons).

One focus of Fraunhofer IOF is research on machine lip reading with fast 3D measurement systems based on active structured light projection. For this, faces are measured with a stereo-vision setup of two cameras and a high-speed pattern projector which operates with near-infrared light. The measurement is therefore absolutely irritation-free for the observed person and time-resolved 3D point clouds of facial expressions can be captured with μm accuracy (Fig. 1). We managed a series of 240 measurements of different test persons while speaking simple sounds with a 3D rate of about 65 Hz. Further, we developed a methodology where we combined 2D and 3D images to extract facial actions at different speech sounds. Here, points of interest on the lips and regions around the mouth were identified and traced for moving analyzes of their paths (trajectories) in the 3D point clouds over the time (Fig. 2).

¹ Zeitaufgelöste 3D-Punktewolken mit zusätzlichen Farbwerten beim Sprechen des Buchstabens »e«.

Time-resolved 3D point clouds with additional colour layer while speaking the vowel "e".

identifiziert und deren Bewegungspfad (Trajektorie) über den zeitlichen Stapel der 3D-Punktwolken verfolgt (Abb. 2).

Die Analyse der Trajektorien zeigte, dass etwa ein Viertel der Sprechbewegungen in der Tiefe stattfindet. Durch die dreidimensionale Betrachtung des Lippenlesens können demnach 25 % mehr Informationen einbezogen werden. Mit den Trajektorien mehrerer markanter Punkte konnte weiterhin ein Support-Vector-Machine Klassifikator trainiert werden. Es zeigte sich in der Gegenüberstellung von 2D und 3D, dass die zusätzlichen Informationen zu einer ca. 6 bis 8 % höheren Erkennungsrate führen.

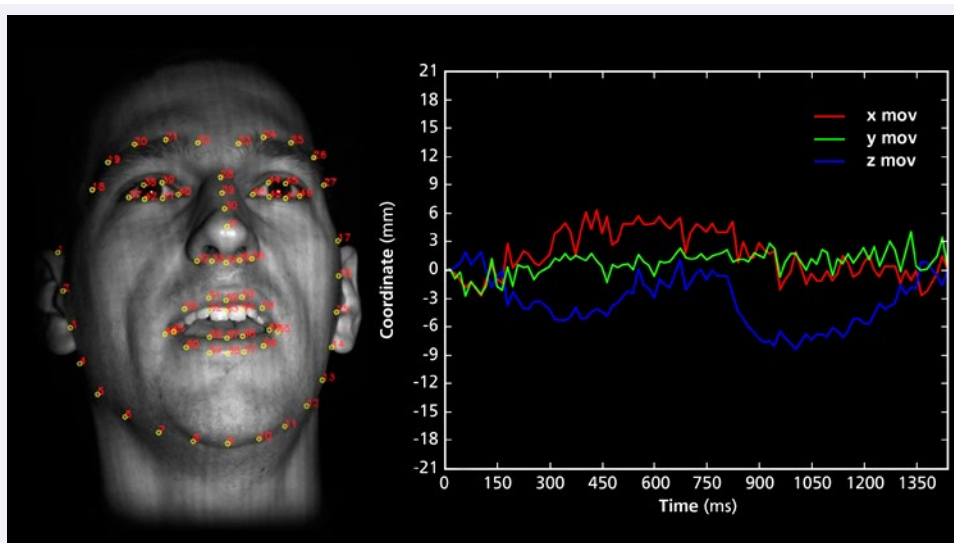
In weiteren Untersuchungen soll eine deutlich größere Anzahl von Messreihen, auch von gesprochenen Wörtern / Sätzen, untersucht werden. Zur Steigerung der Robustheit werden zusätzlich zu den 3D-Daten die Farbwerte einer zusätzlichen Kamera mit einbezogen.

The analysis of those trajectories showed that about a quarter of the facial actions happen in the depth (z-direction) and simple 2D image analysis captures less information. Thus, the 3D approach of lip reading can capture 25 % more information. In addition, we trained a support-vector-machine classifier with the trajectories of multiple feature points and showed in a comparison of 2D and 3D data a 6 to 8 % higher recognition rate by using the additional depth information.

In further experiments we will increase the number of test series, as well as enhancing them with spoken words and sentences. The additional information of a colour camera should further increase the robustness.

References / Literatur

/1/ H. McGurk and J. MacDonald: Hearing lips and seeing voices, Nature 264, 746-748 (1976).



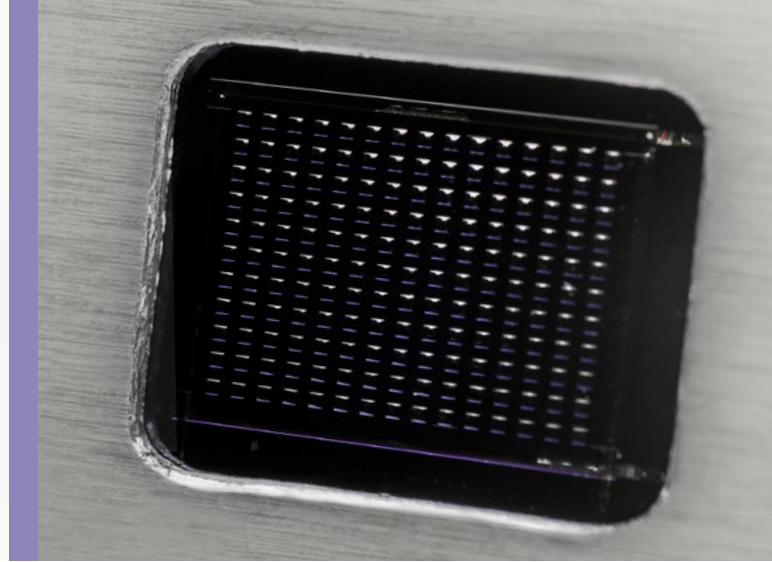
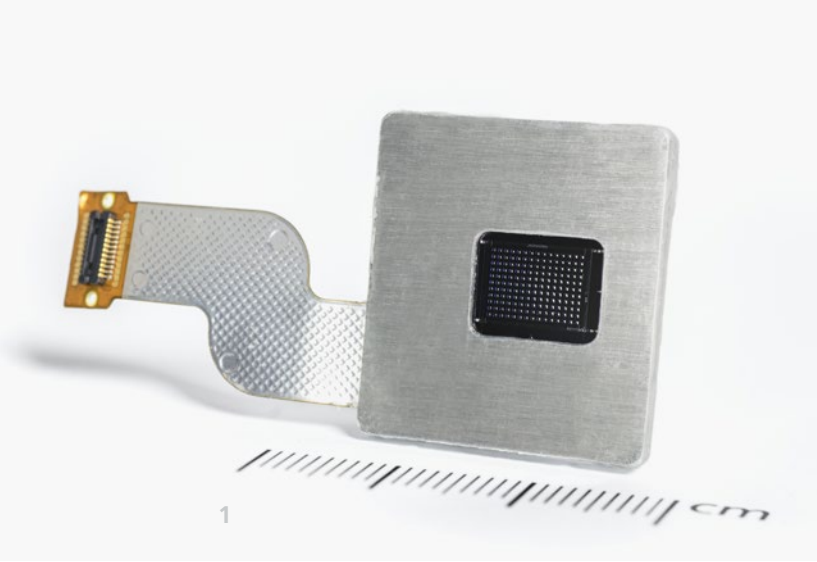
2 Identifizierung von Gesichtsmarken und Extraktion der 3D-Trajektorie des rechten Lippenwinkels beim Sprechen des Buchstabens »e«. | Identification of face markers and extraction of 3D trajectories of the right lip angle while speaking the vowel "e".

AUTHORS

Roland Ramm
Anika Brahm
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

Dr. Peter Kühmstedt
Phone +49 3641 807-230
peter.kuehmstedt@iof.fraunhofer.de



MULTIAPERTURKAMERA FÜR VIDEOBASIERTE PRÄSENZERKENNUNG

MULTIAPERTURE IMAGING SYSTEM FOR PRESENCE DETECTION

Forderungen nach Effizienz und Nachhaltigkeit prägen die Entwicklungen in sämtlichen Bereichen unserer Gesellschaft. Insbesondere im öffentlichen Raum sollen künftig intelligente Lichtmanagementsysteme zunehmend Einsatz finden, um den Energieverbrauch zu senken sowie den Benutzerkomfort zu erhöhen. Hierbei soll die Anwesenheit von Personen erfasst werden, um so die Beleuchtung situationsbedingt bzw. präsenzabhängig zu steuern.

Bisher werden in der Beleuchtungsindustrie passive Infrarotsensoren (PIR) zur Präsenzerkennung verwendet. Für den Einsatz in einer intelligenten Leuchte ist dieses Verfahren jedoch ungenügend, da sich der Benutzer zur Aktivierung des Systems stets durch Bewegung bemerkbar machen muss. Konventionell erhältliche Videosensoren, bestehend aus CMOS-Bildsensor und Fisheye-Objektiv, eignen sich aufgrund hoher Systemkosten und ihrer großen, halbkugelförmigen Bauform (ca. Ø 120 mm x H 50 mm) ebenfalls nicht für diese Anwendung. Demgegenüber zielt der in InnoSYS vorgesehene Einsatz von Multiapertur-Objektiven vor allem auf die Erreichung einer ultraflachen Bauform (< 1 mm) mit unauffälligem Erscheinungsbild ab. Aufgrund der Nutzung parallelisierter und skalierbarer Herstellungstechnologien im Wafermaßstab bieten die hergestellten Multiaperturkameras das Potenzial, die Kosten konventioneller Systeme deutlich zu unterschreiten.

Demands for efficiency and sustainability influence developments in all areas of society. Intelligent light management systems are increasingly being used in public spaces in order to reduce energy consumption and increase user comfort. The key to this is the intelligent networking of luminaires, sensors and operating elements. Sensor-linked lighting systems are intended to detect the presence of persons in order to control the lighting in a situation-dependent or presence-dependent manner.

Up to now, passive infrared sensors (PIR) have been used for the detection of presence in the lighting industry. However, this method is insufficient for use in an intelligent luminaire as the user must always be in motion to activate the system. Conventionally available video sensors on the other hand, consisting of a CMOS image sensor and a fisheye lens, are neither qualified due to high system costs and their large hemispherical design (ca. Ø 120 mm x H 50 mm). In contrast, the use of multiaperture-lenses in InnoSYS is mainly aimed at achieving a highly miniaturized, ultraflat design with a discreet appearance. In addition, multiaperture-objectives in high-volume production have a low unit price due to cost-efficient production on wafer-scale.

The implemented demonstrator consists of a double-sided microlens-array, cast on a pre-patterned diaphragm-array

1 *Prototyp der ultraflachen Weitwinkel-Multiaperturkamera. |*
Prototype of the assembled wideangle multiaperture-camera.

Der realisierte Demonstrator besteht aus einem doppelseitigen Mikrolinsenarray, abgeformt auf einem vorstrukturierten Blendenarray-Wafer, und einem Crosstalk-Modul, einer kanal-separierenden Lochplatte zur Unterdrückung von optischen Übersprechen. Beide Komponenten sind vor einem CMOS-Sensor ausgerichtet. Die Herstellung der mikrooptischen Einzelmaster-Formen der Mikrolinsen-Freiformarrays erfolgte mittels LED-Grautonlithografie (Formabweichung < 100 nm). Mit 15×11 Kanälen und einer extrem kurzen Brennweite ($< 0,7$ mm) wird ein Gesichtsfeld von 110° diagonal erfasst. Jeder Kanal des Objektivs überträgt dabei unterschiedliche Bereiche des gesamten Objektfelds. Mit einem Öffnungsverhältnis von $F\# 3$ werden bis zum Bildrand hohe Ortsfrequenzen (Grenzfrequenz 110 LP/mm) mit geringer Verzeichnung ($< 6\%$) übertragen. Mittels selbstentwickelter Software können die Teilbilder, inkl. Vignettierungs- und Verzeichnungskorrektur, zusammengesetzt werden.

Das dargestellte Vorhaben wird gefördert durch das BMBF im Rahmen des Verbundvorhabens InnoSYS (FKZ: 16ES0268).

wafer, and a crosstalk-module, meaning a channel-separating perforated plate for suppressing crosstalk. Both components are aligned in front of a CMOS sensor. The manufacturing of the microoptical single-master molds of the microlens freeform-arrays was realized by means of LED-grayscale lithography (shape deviation < 100 nm). With 15×11 channels and an extremely short focal length (< 0.7 mm), a maximum field of view of 110° is detected with f-number $F\# 3$. Every channel of the multiaperture-objective holds a different viewing direction and therefore transmits different areas of the entire object field. Even at the edge of the picture, high spatial frequencies (up to 110 LP/mm) are resolved with low image distortion ($< 6\%$). With the help of a self-developed software, the partial images can be reassembled, including vignetting and distortion correction.

The presented project is funded by the BMBF within the framework of the research project InnoSYS (FKZ: 16ES0268).



2 Rekonstruierte Bildaufnahme mit großem Gesichtsfeld $> 100^\circ$. |
Reconstructed image with broad field of view $> 100^\circ$.

AUTHORS

Christin Gassner

Jens Dunkel

Alexander Oberdörster

Sylke Kleine

Andreas Brückner

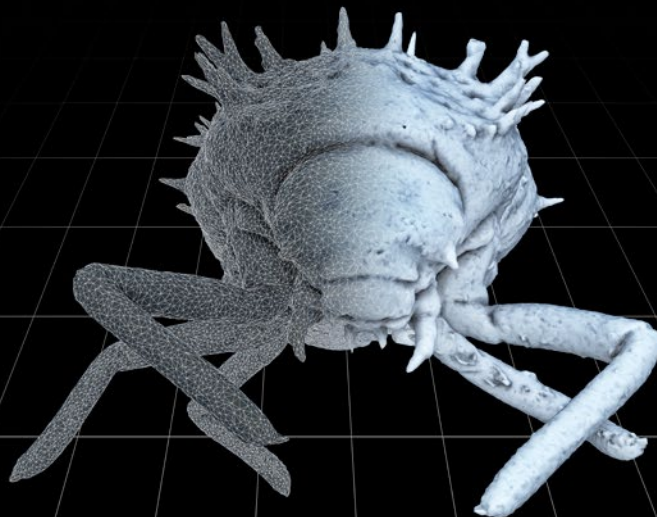
CONTACT

Christin Gassner

Phone +49 3641 807-381

christin.gassner@

iof.fraunhofer.de



MIKRO-COMPUTERTOMOGRAPHIE ZUR ANALYSE BIOLOGISCHER PRÄPARATE MICRO COMPUTED TOMOGRAPHY FOR THE ANALYSIS OF BIOLOGICAL PREPARATIONS

Die genaue 3D-Digitalisierung eines biologischen Präparats ist vor allem in zweierlei Hinsicht von Interesse: Zum einen können digitale 3D-Modelle mittels 3D-Druckverfahren nachgebildet werden, um beispielsweise ein biologisches Präparat zu vervielfältigen. Zum anderen können präzise 3D-Modelle zur genauen Untersuchung geometrischer Kenngrößen innerer und äußerer Merkmale herangezogen werden.

Die Mikro-Computertomographie (CT) wird am Fraunhofer IOF u. a. zur hochaufgelösten 3D-Digitalisierung biologischer Präparate eingesetzt. Hierbei werden mittels Röntgenstrahlung aus einer Vielzahl von Winkeln Durchstrahlungsbilder des Objektes aufgenommen und zu einem Volumenmodell rekonstruiert. Im Gegensatz zur klinischen CT wird bei der Mikro-CT typischerweise eine Kegelstrahl-Anordnung verwendet. Damit können Messungen mit bis zu 200facher Vergrößerung und einer Auflösung von bis zu 1 μm realisiert werden. Die Größe des kleinsten Volumelements, die Voxelgröße, dient als metrischer Maßstab und ermöglicht eine genaue geometrische Auswertung des Volumenmodells. Im Volumenmodell kann aus den Materialübergängen die Objektoberfläche mit Sub-Voxelgenauigkeit bestimmt werden. Beim CT wird die

The accurate 3D digitizing of biological preparations is interesting for two main aspects: For one thing digital 3D models allow their reproduction by 3D printing methods which can be used to replicate biological preparations. For another thing precise 3D models allow the evaluation of geometric characteristics of inner and outer features.

The micro computed tomography (CT) is used at the Fraunhofer IOF for high-resolved 3D digitization of biological preparations. In a CT scan the sample is radiated by x-rays from a plurality of different angles. A complete volume model of the sample can be reconstructed by a set of radiographs afterwards. The micro-CT typically uses a cone-beam arrangement in contrast to clinical CT measurements. Thereby it is possible to realize scans with up to 200 fold magnification and a resolution of up to 1 μm . The size of the smallest volume element, the voxel size, is used as dimensional scale and allows the accurate geometrical evaluation of the volume model. The certain material boundaries of the object surface can be determined in the volume model with sub-voxel accuracy. With CT the inner and outer object surface is completely captured and allows the generation of printable 3D models.

1 3D-Modell einer Larve des Asiatischen Marienkäfers. | 3D model of Harlequin Ladybird larva.

2 Larve eines Asiatischen Marienkäfers als Ausstellungsobjekt, 50fach vergrößert für das Universalmuseum Joanneum in Graz. | Larva of Harlequin Ladybird as museum object, 50 times magnified for Universalmuseum Joanneum in Graz.



2

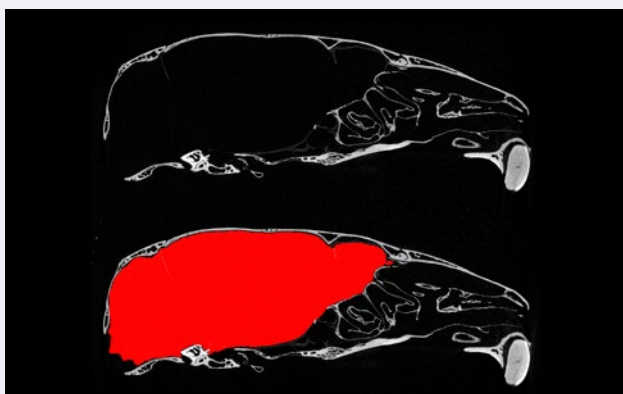
Objektoberfläche innen und außen vollständig erfasst und ermöglicht damit die Generierung druckbarer 3D-Modelle.

Das Fraunhofer IOF unterstützte Präparatoren dabei, eine Prozesskette mit dem Ziel der Nachbildung biologischer Präparate als druckbare 3D-Modelle zu erarbeiten. Hierbei wurden mittels Mikro-CT digitale Modelle Asiatischer Marienkäfer (Abb. 1) und gemeiner Spaltblättlingspilze aufgenommen. Diese wurden mittels selektivem Lasersintern stark vergrößert in 3D gedruckt und zur Verwendung als Ausstellungsobjekt bearbeitet (Abb. 2).

Durch die metrische Rückführbarkeit der Mikro-CT-Aufnahmen sind genaue geometrische Analysen an den 3D-Modellen durchführbar. Am Fraunhofer IOF wurden u. a. Methoden zur Bestimmung der Größe und des Volumens von Knochen erarbeitet (Abb. 3).

The Fraunhofer IOF supported preparators to apply a process chain with the objective to reproduce biological preparations as printable 3D models. Micro-CT was applied to capture digital models of Harlequin Ladybirds (*Harmonia axyridis*, Fig. 1) and of the Common Porecrust mushroom. Those were printed in 3D by a selective laser sinter process with largely magnified size. Then they were further processed to be used as museum objects (Fig. 2).

The dimensional traceability of micro-CT allows accurate geometrical analysis on 3D models. Methods to determine the size and volume of bones and extremities were worked out at Fraunhofer IOF (Fig. 3).



3 Bestimmung des Volumens der Gehirnkammer (Hirnventrikel) eines Mausschädels (roter Bereich). | Determination of the brain ventricle volume in a mouse skull (red area).

AUTHORS

Roland Ramm

Klaus Wechsler¹

Peter Kühmstedt

Gunther Notni

¹LL. Wechsler | Formen- und

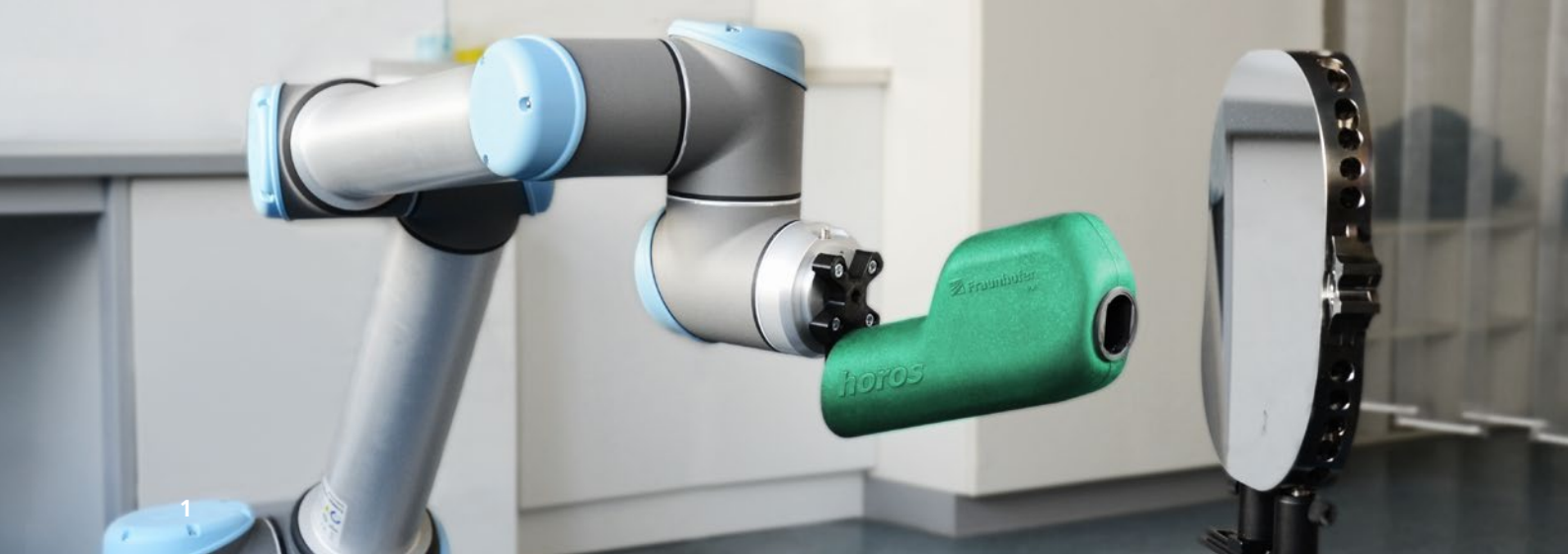
Modellbau biologischer Objekte

CONTACT

Dr. Peter Kühmstedt

Phone +49 3641 807-230

peter.kuehmstedt@iof.fraunhofer.de



ROBOTERGESTÜTZTE STREULICHTSENSORIK ZUR OBERFLÄCHENANALYSE ROBOT-ASSISTED LIGHT SCATTERING SENSOR FOR SURFACE ASSESSMENT

Unter existierenden Methoden zur Charakterisierung von Oberflächenunvollkommenheiten wie Rauheit und Defekten zeichnen sich streulichtbasierte Verfahren durch ihre Flexibilität, Robustheit, Berührungslosigkeit und Sensitivität aus. Insbesondere die Charakterisierung optischer Oberflächen und Komponenten erfordert üblicherweise den Einsatz hochsensitiver und komplexer Streulichtgoniometer. Diese Instrumente stoßen jedoch für große und komplex geformte Prüflinge an ihre Grenzen.

Innerhalb der letzten Jahre wurden am Fraunhofer IOF daher, zusätzlich zu goniometrischen Streulichtmesssystemen, sensitive und kompakte Streulichtsensoren entwickelt /1/, die sogar direkt in Fertigungsmaschinen integriert werden können /2/. Speziell entwickelte Analysemethoden erlauben Rückschlüsse von aufgenommenen winkelaufgelösten Streulichtverteilungen (BRDF) auf strukturelle Eigenschaften wie Rauheit und Homogenität /3/. Die Ergebnisse sind mit anderen Verfahren wie Weißlichtinterferometrie vergleichbar, sie sind jedoch oft deutlich schneller und einfacher zu gewinnen. Darüber hinaus liefern die Sensoren direkte Streulichtinformationen.

Um die neuen Möglichkeiten der kompakten Streulichtsensorik optimal zu nutzen, wurde diese nun mit einem kollaborierenden und interaktivem Roboter kombiniert.

For the characterization of surface imperfections such as roughness and defects, light scattering techniques have the advantages of being flexible, robust, non-contact, and highly sensitive. In particular, the characterization of optical surfaces and components usually requires highly sensitive, but complex, goniometer systems. However, with increasing size and complexity of the samples, these instruments reach their limitations in particular in sample handling.

In addition to goniometer based light scattering instruments, highly sensitive and compact light scattering sensors have been developed at Fraunhofer IOF in recent years /1/. These sensors combine the advantages of light scattering measurements with in-line capabilities and have even been implemented into manufacturing machines /2/. Analysis methods specifically developed for this approach provide links between the angle resolved scattering (BRDF) results and the structural properties of optical components /3/ like surface roughness or homogeneity. The measurement results are comparable to other approaches such as white light interferometry, but are acquired more easily and faster. In addition, direct information on the scattering properties is obtained.

The compact light scattering sensor has now been combined with a collaborative and interactive robot in order to

1 *Roboterassistierte Streulichtsensorik an einem diamantgedrehtem Aluminiumspiegel. |*

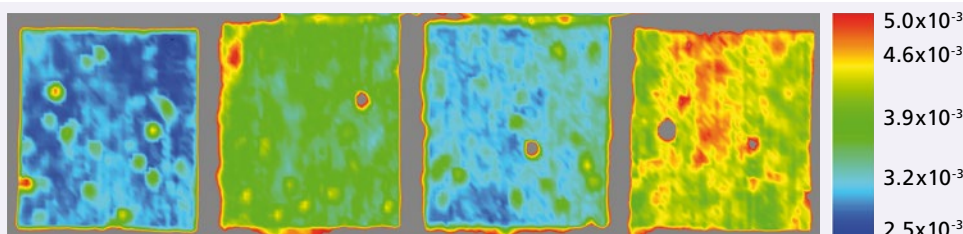
Robot-assisted light scattering sensor at a diamond turned aluminum mirror.

Zusammen mit neu entwickelten Softwaremodulen ermöglicht dieses System die Führung des Sensors über komplex geformte Oberflächen mit Durchmessern von bis zu 1 m. So können diese Oberflächen beispielsweise hinsichtlich ihrer Rauheit vollflächig kartiert werden. Die kollaborativen Eigenschaften des Roboters mit den integrierten Schutzmechanismen halten dabei den Sicherheitsaufwand gering und würden sogar den mobilen Einsatz ermöglichen. Gleichzeitig ist es möglich, den Sensor per Hand auf ausgewählte Probenpositionen auszurichten und die gewonnen Ergebnisse in der Oberflächenkarte zu registrieren.

fully exploit its potential. This system and novel software modules enable the sensor to be automatically traced over complex shaped surfaces with diameters of up to 1 m to map the entire surface e.g. for roughness. On the other hand, the collaborative robot with its integrated protective mechanisms keeps the safety efforts minimal and would even enable a mobile application of the entire system. The collaborative operation also allows positioning of the sensor at selected sample positions by hand. Thereby the sensor position is tracked and the results are registered in a surface map.

Literatur / References

- /1/ S. Schröder, T. Herffurth, A. Duparré, and G. Notni:
Device and method for angularly resolved scattered light measurement, Patent WO 002010127872 (2010).
- /2/ M. Trost, T. Herffurth, S. Schröder, A. Duparré, M. Beier, S. Risse, A. Tünnermann and N. Böwering: In situ and ex situ characterization of optical surfaces by light scattering techniques, Opt. Eng. 53 (2014).
- /3/ T. Herffurth, S. Schröder, M. Trost, A. Duparré, and A. Tünnermann: Comprehensive nanostructure and defect analysis using a simple 3D light-scatter sensor, Appl. Opt. 52 (2013).



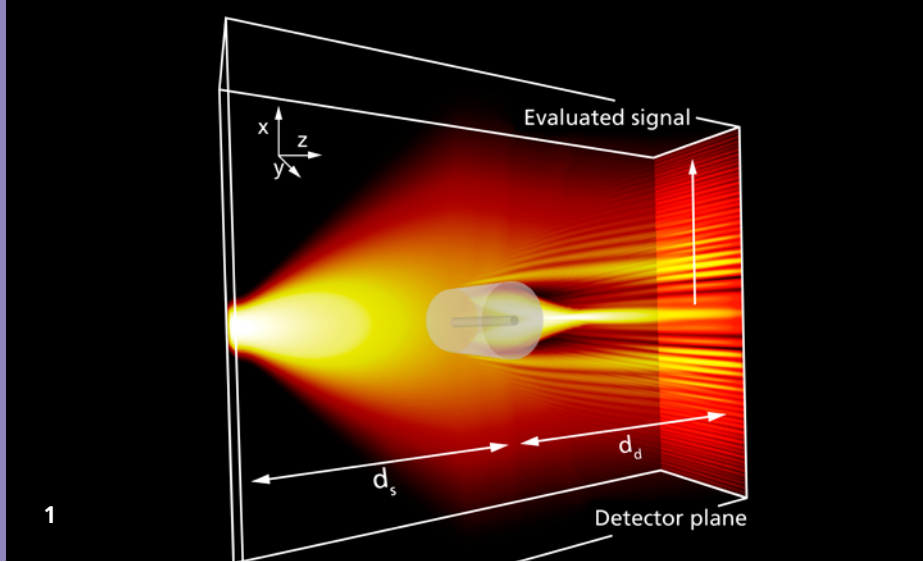
2 Streuverlustkarte zeigt Defekte und Homogenität verschiedener holographischer Gitter (je 25 mm x 25 mm). | Mapping of scattering loss shows defects and homogeneity of holographic gratings (each 25 mm x 25 mm).

AUTHORS

Tobias Herffurth
Sven Schröder

CONTACT

Dr. Sven Schröder
Phone +49 3641 807-232
sven.schroeder@iof.fraunhofer.de



IN-LINE HOLOGRAFISCHE MESSUNG ZUR CHARAKTERISIERUNG OPTISCHER FASERN

IN-LINE HOLOGRAPHIC MEASUREMENTS FOR THE METROLOGY OF OPTICAL FIBERS

Optische Fasern bilden einen der zentralen Grundbausteine der modernen Optikindustrie. Steigende Anforderungen an die optische Funktionalität erfordern immer komplexere, mikrostrukturierte Faserdesigns. Um die nötige Fertigungsqualität und damit deren Funktionalität gewährleisten zu können, ist es wünschenswert, die Fasern bereits während des Ziehprozesses charakterisieren zu können.

In-line holografische Messprinzipien können hierbei vielfältige Charakterisierungsmöglichkeiten bieten. Hierbei beleuchtet ein monochromatischer kohärenter Laserstrahl seitlich die zu untersuchende Faser. Die Faser beugt den einfallenden Strahl und an der Position eines entfernten Detektors wird die Interferenz aus gebeugtem Signal und ungestörten Teilen des einfallenden Strahls detektiert. Das hierbei entstehende Messsignal ist charakteristisch für die zu untersuchende Faser und aus dem Vergleich zwischen Messsignal und numerischen Simulationen der gesamten Struktur kann auf strukturelle Parameter der Faser rückgeschlossen werden.

Exemplarisch wird im Folgenden diese Methodik zur Analyse von Kapillarfasern angewendet. Diese bestehen aus einem Quarzglas Mantel (Cladding) und einem konzentrisch angeordneten hohlen Luftkern. Während des Ziehprozesses der Faser kann der Durchmesser des Luftkerns D_{Kern} durch einen entsprechend eingesetzten Überdruck im Hohlkern angepasst werden. Die Möglichkeit bereits während des Ziehprozesses

Optical fibers are one of the most important building blocks in modern photonic industries. Increasing demands on their functionality require the realization of complex, microstructured optical fibers. The metrological characterization of these fibers during the drawing-process is of fundamental importance to ensure their quality and, therefore, their optical functionality.

A versatile tool to characterize optical fibers is in-line holography. The optical fiber under investigation is side-illuminated by a coherent, monochromatic beam with a large diameter. Part of the beam is diffracted by the fiber and creates a characteristic fringe pattern at the position of a distant detector due to interference with the unperturbed part of the incoming beam. Analyzing the detected signal and comparing it to numerical simulations of the entire structure allows us to retrieve structural parameters of the optical fiber.

As an example, the proposed method is used to analyze capillary fibers, which are specified by a cladding made out of Fused-Silica and a hollow air-core which is arranged concentrically. The diameter of this capillary hole can be adjusted during the drawing process by controlling an overpressure in the hollow core. The ability to monitor this core diameter on-line is of particular importance. It can enable a feedback mechanism to accurately control the resulting diameter of the hollow air core.

1 Schematische Darstellung des Messaufbaus. | Illustrative sketch of the measurement configuration.

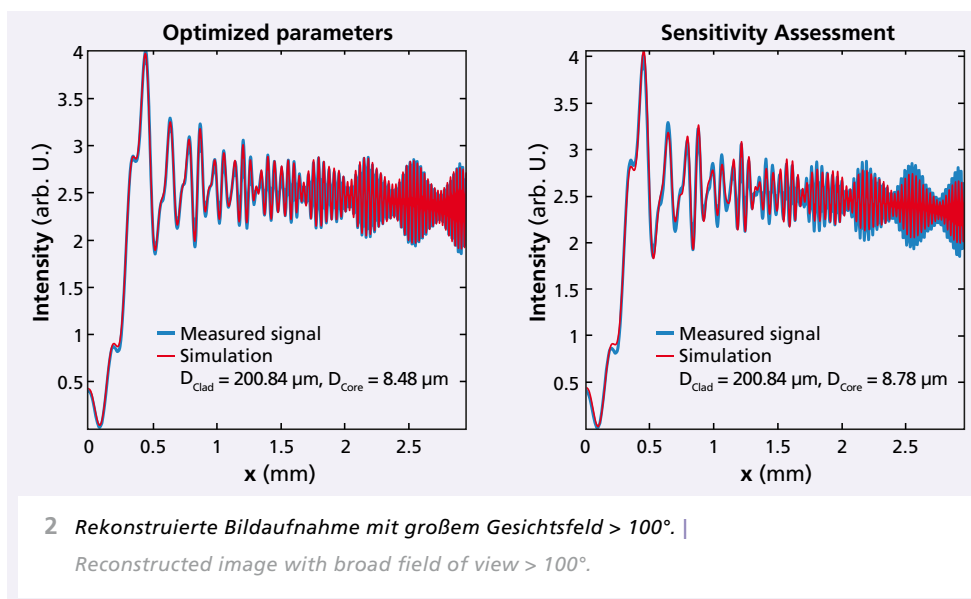
diesen Innendurchmesser messen zu können, ist von besonderer Bedeutung. Auf dieser Grundlage kann ein Feedback-Mechanismus realisiert werden, welcher die Kontrolle des hergestellten Durchmessers des Luftkerns ermöglicht.

Die Bestimmung des Außen- und Innendurchmessers erfolgt hierbei durch den direkten Vergleich zwischen Simulation und Messung. Durch Optimierung der Durchmesser D_{Clad} und D_{Kern} wird eine optimale Übereinstimmung zwischen Messsignal und Simulation gesucht. Im untersuchten Fall kann hier eine Messgenauigkeit von $\Delta D_{Clad, Kern} < 0.3 \mu m$ erzielt werden.

To determine the core diameter, we compare the in-line holographic measurement of the capillary fiber to simulations of the entire structure. By optimizing the outer cladding and inner core diameter D_{Clad} , D_{Core} an optimal match between simulation and measurement is examined. This approach allowed us to retrieve the diameters with an accuracy of $\Delta D_{Clad, Kern} < 0.3 \mu m$.

References / Literatur

/1/ Schmidt, S. et al.: Wave-optical modeling beyond the thin-element-approximation Optics Express 24(26), 30188-30200 (2016). <https://doi.org/10.1364/OE.24.030188>



AUTHORS

Sören Schmidt

Tobias Tieß¹

Siegmond Schröter¹

Herbert Gross

¹Leibniz IPHT

CONTACT

Sören Schmidt

Phone +49 3641 947-803

soeren.schmidt@iof.fraunhofer.de

FEMTOSEKUNDEN-CARS FÜR DIE GASSPEKTROSKOPIE

FEMTOSECOND-CARS FOR GAS ANALYSIS

Die effiziente Nutzung fossiler Brennstoffe ist eine zentrale Herausforderung unserer Zeit. So ist abzusehen, dass die Erschließung neuer Erdöl-, Gas- und Kohlevorkommen immer kostenintensiver und u. U. umstrittene Techniken erfordern wird, wie die Diskussion über das »Fracking« zeigt. Dennoch wird man auf absehbare Zeit auf die Nutzung fossiler Energieträger nicht verzichten können. Umso mehr besteht die Notwendigkeit, die Effizienz der Energiegewinnung aus diesen Brennstoffen zu erhöhen. Hierfür ist zunächst ein verbessertes Verständnis für diese Konversionsprozesse Voraussetzung. Sie sind bislang für diagnostische in-situ Techniken schwer zugänglich, da die Überführung von Kohle in brennbare gasförmige Verbindungen unter extremen Umgebungsbedingungen ($\leq 1400\text{ °C}$, $\leq 40\text{ bar}$) abläuft. Die deshalb zurzeit vorrangige Untersuchungsmethode ist die thermogravimetrische Analyse (TGA), die einzig die Gewichtsabnahme der Kohle während des Konversionsprozesses bestimmt. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojekts HITECOM (»High Temperature Conversion Optical Measurement«, FKZ: 03Z1H532, 03Z1H533) werden am Leistungszentrum Photonik neue Spektroskopietechniken für den Einsatz unter extremen Umgebungsbedingungen entwickelt. In Zusammenarbeit mit der TU Bergakademie Freiberg ist ein Hochdruck-/Hochtemperaturofen realisiert worden, der optischen Zugang mittels vier Fenstern erlaubt (Abb. 1) /1/.

Ein vielversprechender spektroskopischer Ansatz ist die kohärente Anti-Stokes-Ramanspektroskopie. Durch Verwendung

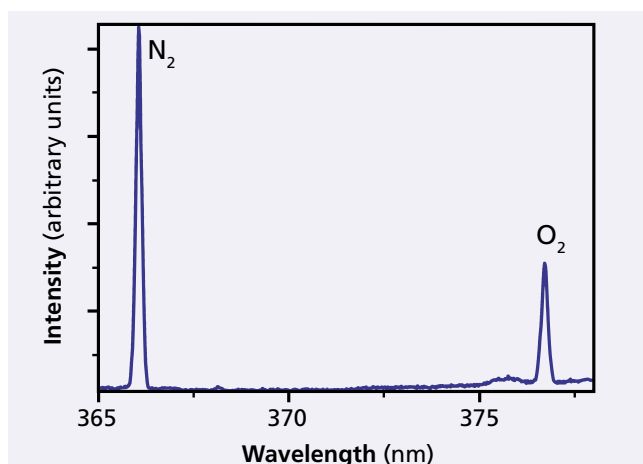
The efficient use of fossil fuels is a major challenge for our society as the development of new oil, gas or coal fields will increasingly require cost-intensive techniques, such as the highly controversial 'fracking'. Nevertheless, the use of fossil fuels will be indispensable in the foreseeable future. Thus, there is a growing demand to improve the efficiency of conversion processes of fossil fuels. An essential prerequisite for this task is to acquire a better understanding of the processes involved. However, experimental access to these processes is limited as the technical gasification of coal, for example, takes place under extreme ambient conditions ($\leq 1400\text{ °C}$, $\leq 40\text{ bar}$). Therefore, the preferred research method is currently the thermogravimetric analysis (TGA), for which the decrease in weight is the only accessible parameter. In the scope of the joint-project HITECOM ("High Temperature Conversion Optical Measurement"), which is funded by the BMBF (grant-IDs: 03Z1H532, 03Z1H533), new spectroscopic techniques are being developed for use in these extreme ambient conditions. In collaboration with the TU Bergakademie Freiberg, a high pressure/high temperature oven was implemented, providing optical access by means of four sapphire windows (Fig. 1) /1/.

A promising spectroscopic approach for the process analysis is the coherent anti-Stokes Raman scattering using femtosecond laser pulses ('fs-CARS'). The short pulse durations enable the excitation of molecular states of a gas, before detrimental molecular collisions take place. This feature makes fs-CARS ideally suited for thermometry and gas concentration measurements under

1 Kohlepartikel mit Halterung im Hochdruck-/Hochtemperaturofen während Konversionsprozess. |

Coal particle with holder in high pressure/high temperature oven during gasification.

ultrakurzer Pulsdauern (»fs-CARS«) ist es möglich, die Molekülzustände eines Gases abzufragen, bevor störende Molekülstöße stattfinden. Damit ist diese Technik prädestiniert für die Thermometrie und Gaskonzentrationsmessungen im HITECOM-Ofen /2/. Die zur Anregung des Ramanübergangs nötige Energiedifferenz wird in der Regel durch einen Ultrakurzpuls-Verstärkersystem und einen optisch-parametrischen Verstärker erzeugt. Diese Technik erfordert jedoch eine empfindliche Justage der räumlichen und zeitlichen Pulsüberlappung. Zudem kann immer nur eine Gasspezies gleichzeitig untersucht werden, die zuvor bekannt sein muss. Durch Verwendung eines faserverbasierten, optisch-parametrischen Verstärkers (OPCPA) ist es im HITECOM-Projekt gelungen, mit Hilfe eines ultrabreitbandigen ~ 7 fs Pulses die Ramanübergänge sämtlicher bei der Kohlevergasung infrage kommender Gasspezies anzuregen /3/. Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein fs-CARS-Spektrum von Luft mit Ramansignalen von Stickstoff und Sauerstoff. In einem weiteren Schritt wird nun ein Verfahren entwickelt, das die gleichzeitige Temperatur- und Konzentrationsbestimmung anhand eines einzelnen fs-CARS-Spektrums ermöglicht.



2 fs-CARS-Spektrum von Luft bei Anregung durch einen ~ 7 fs-Puls. | fs-CARS spectrum of air using a ~ 7 fs pulse as excitation.

high temperature and high pressure conditions /2/. Usually, the required energy difference for the Raman transition is provided by a femtosecond laser and an optical parametric amplifier. Using a fiber-based optical parametric amplifier (OPCPA), we have successfully shown that a ~ 7 fs may excite the Raman transitions of all gas species that are relevant for coal gasification /3/. Figure 2 shows exemplarily a fs-CARS spectrum of air with the Raman signals of nitrogen and oxygen, respectively. In a next step, a technique is being developed which allows the simultaneous determination of the gas temperature and concentration by means of a single fs-CARS spectrum.

References / Literatur

- /1/ F. Küster, P. Nikrityuk, M. Junghanns, S. Nolte, A. Tünnermann, R. Ackermann, S. Guhl, A. Richter, L. Kampioni, and B. Meyer: In situ investigation of single particle gasification in a defined gas flow applying TGA with optical measurements, *Fuel* (2016).
- /2/ R. P. Lucht, S. Roy, T. R. Meyer, and J. R. Gord: Femtosecond coherent anti-Stokes Raman scattering measurement of gas temperatures from frequency-spread dephasing, *Applied Physics Letters* 89, 251112 (2006).
- /3/ G. Matthäus S. Demmler, M. LeBugle, F. Küster, J. Limpert, A. Tünnermann, S. Nolte and R. Ackermann: Ultra-broadband two beam CARS using femtosecond laser pulses, *Vibrational Spectroscopy* 85, 128-133 (2016).

AUTHORS

Roland Ackermann¹

Stefan Nolte^{1,2}

Andreas Tünnermann^{1,2}

¹ Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

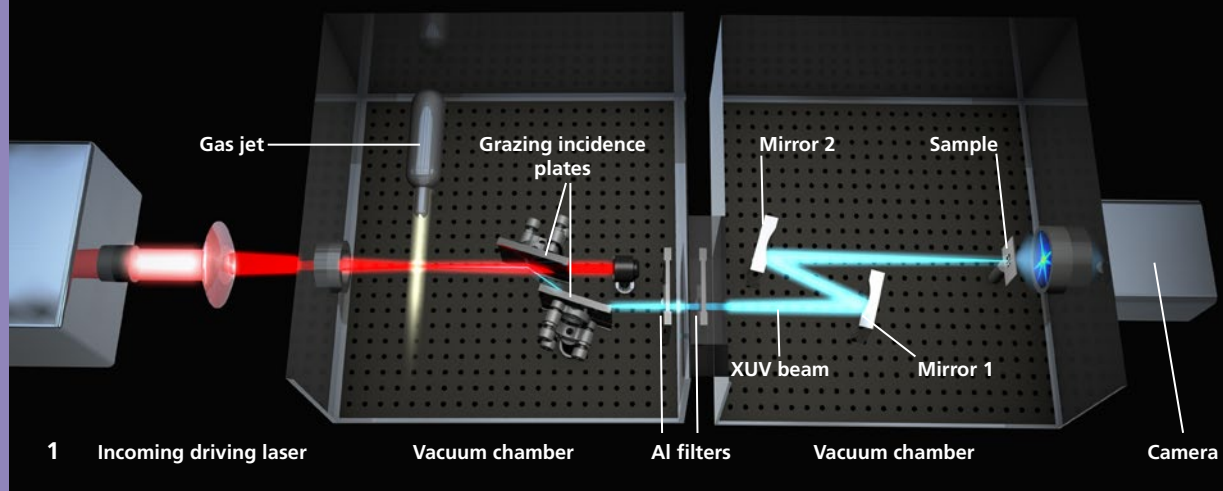
² Fraunhofer IOF

CONTACT

Roland.Ackermann

Phone +49 3641 9-47 821

roland.ackermann@uni-jena.de



XUV NANOSKOPIE IM LABORMASSSTAB TABLE-TOP NANOSCALE IMAGING WITH XUV LIGHT

Kohärente Beugungsmikroskopie ist heutzutage eine etablierte Methode an Synchrotron-Strahlquellen und ermöglicht Bildgebung mit einer Auflösung von nur wenigen Nanometern. Da nur das Beugungsmuster detektiert wird und daraus das Objekt über iterative Computer Algorithmen rekonstruiert werden kann, sind keine abbildenden Optiken nötig. Daher ist die Auflösung des Nanoskops nur durch die genutzte Wellenlänge und den maximal detektierbaren Beugungswinkel mit ausreichendem Signal-zu-Rausch-Verhältnisses begrenzt.

Diese Technik wurde nun im Labormaßstab umgesetzt (Abb. 1), wobei das XUV Licht als hohe Harmonische eines infraroten Femtosekunden Faserlasers erzeugt wird. Das XUV-Licht (18 nm Wellenlänge) wird nach der Trennung vom treibenden Laser mittels zweier konkaver XUV-Spiegel (OPTIXFAB) auf die Probe fokussiert. Ein typisches Beugungsbild einer Teststruktur wird in Abbildung 2 gezeigt.

Aufgrund des hohen Photonenflusses der genutzten XUV Quelle ^{1/}, als auch wegen der herausragenden Strahlqualität und räumlichen Kohärenz, kann das Beugungsmuster mit einer numerischen Apertur von 0,7 aufgenommen werden (Abbe-Limit: 12 nm). Abbildung 3(a) und (b) zeigen

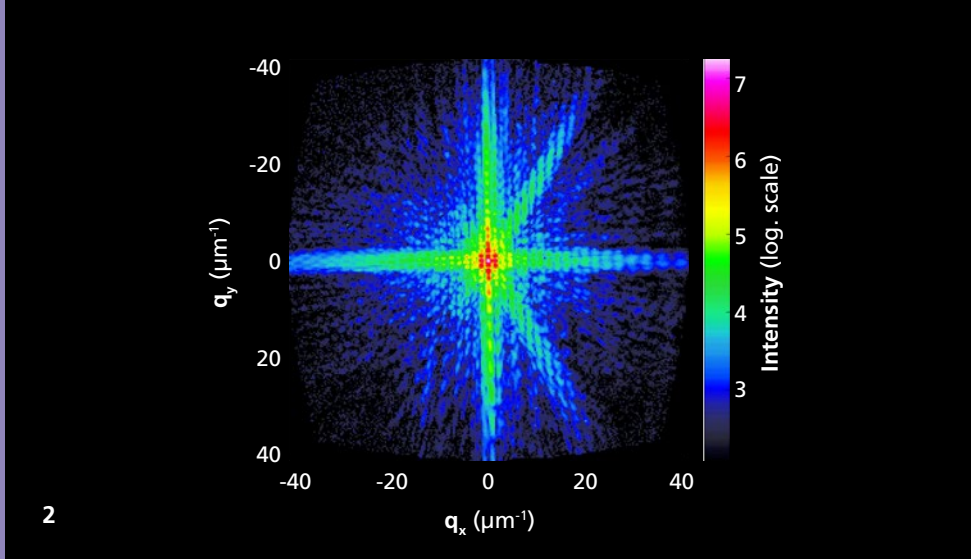
Coherent diffractive imaging is nowadays a well-established technique at synchrotron light sources and allows nano-scale imaging with only a few nanometers resolution. As only the diffraction pattern is detected and the object exit wave is reconstructed by iterative computer algorithms, no imaging optics are required. Therefore, the resolution is solely determined by the wavelength and the maximum scattering angle which can be detected with sufficient signal-to-noise ratio.

We developed a table-top implementation of this technique by using high harmonics generated by focusing an infrared femtosecond fiber laser into an argon gas jet (Fig. 1). The generated XUV radiation (18 nm wavelength) is separated from the fundamental infrared light and re-focused onto the sample by using two concave multilayer mirrors. A typical diffraction pattern of a test structure, recorded by an XUV-CCD, is shown in Figure 2(a).

Due to the record high photon flux of our table-top XUV source ^{1/}, as well as the excellent beam quality and spatial coherence, the diffraction pattern (Fig. 2(a)) has been detected with a numerical aperture as high as 0.7. Figure 3(a) and (b) display the reconstructed amplitude and phase of

¹ *Experimenteller Aufbau des XUV Nanoskops. XUV Licht wird durch Fokussierung eines Faserlasers in ein Edelgas erzeugt. Danach wird das XUV Licht auf die Probe fokussiert und das Beugungsbild wird von einer CCD-Kamera aufgenommen. | Experimental setup of the table-top XUV Nanoscope. XUV light is generated by focusing femtosecond pulses from an infrared fiber laser into an argon gas jet. It is then refocused onto the sample and a CCD-Camera records the diffraction pattern behind the sample.*

² *Aufgenommenes Beugungsbild einer Teststruktur. | Measured diffraction pattern of a test structure.*

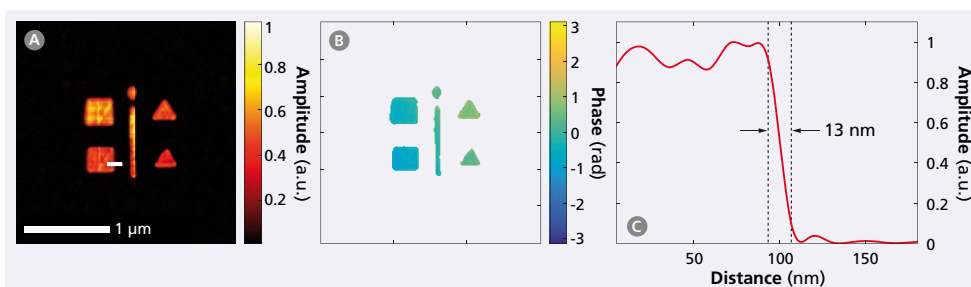


die rekonstruierte Amplitude und Phase des Lichtes am Ort der Teststruktur. Die erreichte Auflösung beträgt 13 nm, ein Querschnitt ist in Abbildung 3(c) gezeigt. Dies stellt einen neuen Auflösungsrekord für XUV- und Röntgen Mikroskopie im Labormaßstab dar. Des Weiteren wurde mit einer Belichtungszeit von nur 3 s eine Auflösung von ~25 nm erreicht, was das Mikroskopieren von ausgedehnten Proben und 3D-Tomografie in naher Zukunft ermöglichen wird. Die Weiterentwicklung von Femtosekunden Faserlasern und darauf basierenden Lichtquellen wird letztendlich wenige Nanometer Auflösung an 3D-Nanostrukturen ermöglichen und somit völlig neue Einblicke in die Nanowelt erlauben.

the light wave exiting the employed sample. The achieved spatial resolution is better than 13 nm (Abbe-limit: 12 nm) and represents a new record for table-top XUV and X-ray microscopes. Moreover, a single 3 s acquisition is sufficient to achieve ~25 nm resolution, which will allow scanning on extended samples and 3D tomography on the nanoscale in the near future. Further advances in femtosecond fiber laser technology and high harmonic generation will ultimately enable few-nanometer resolution imaging of 3D nanostructures e.g. modern nano-optical and nano-electronic devices.

References / Literatur

- /1/ J. Rothhardt, S. Hädrich, Y. Shamir, M. Tschernajew, R. Klas, A. Hoffmann, G. K. Tadesse, A. Klenke, T. Gottschall, T. Eidam, J. Limpert, A. Tünnermann, R. Boll, C. Bomme, H. Dachraoui, B. Erk, M. Di Fraia, D. A. Horke, T. Kierspel, T. Mullins, A. Przystawik, E. Savelyev, J. Wiese, T. Laarmann, J. Küpper, and D. Rolles: High-repetition-rate and high-photon-flux 70 eV high-harmonic source for coincidence ion imaging of gas-phase molecules, *Opt. Express* 24, 18133-18147 (2016).
- /2/ G. K. Tadesse, R. Klas, S. Demmler, S. Hädrich, I. Wahyutama, M. Steinert, C. Spielmann, M. Zürrh, T. Pertsch, A. Tünnermann, J. Limpert, and J. Rothhardt: High Speed and High Resolution Table-Top Nanoscale Imaging, *Opt. Lett.* 41, 5170-5173 (2016).



3 a) Rekonstruierte Amplitude, b) rekonstruierte Phase, c) Querschnitt einer Kante des Objekts – die erreichte Auflösung ist ~13 nm. | a) Reconstructed amplitude, b) reconstructed phase, c) cross section of an edge of the object. The achieved resolution is ~13 nm.

AUTHORS

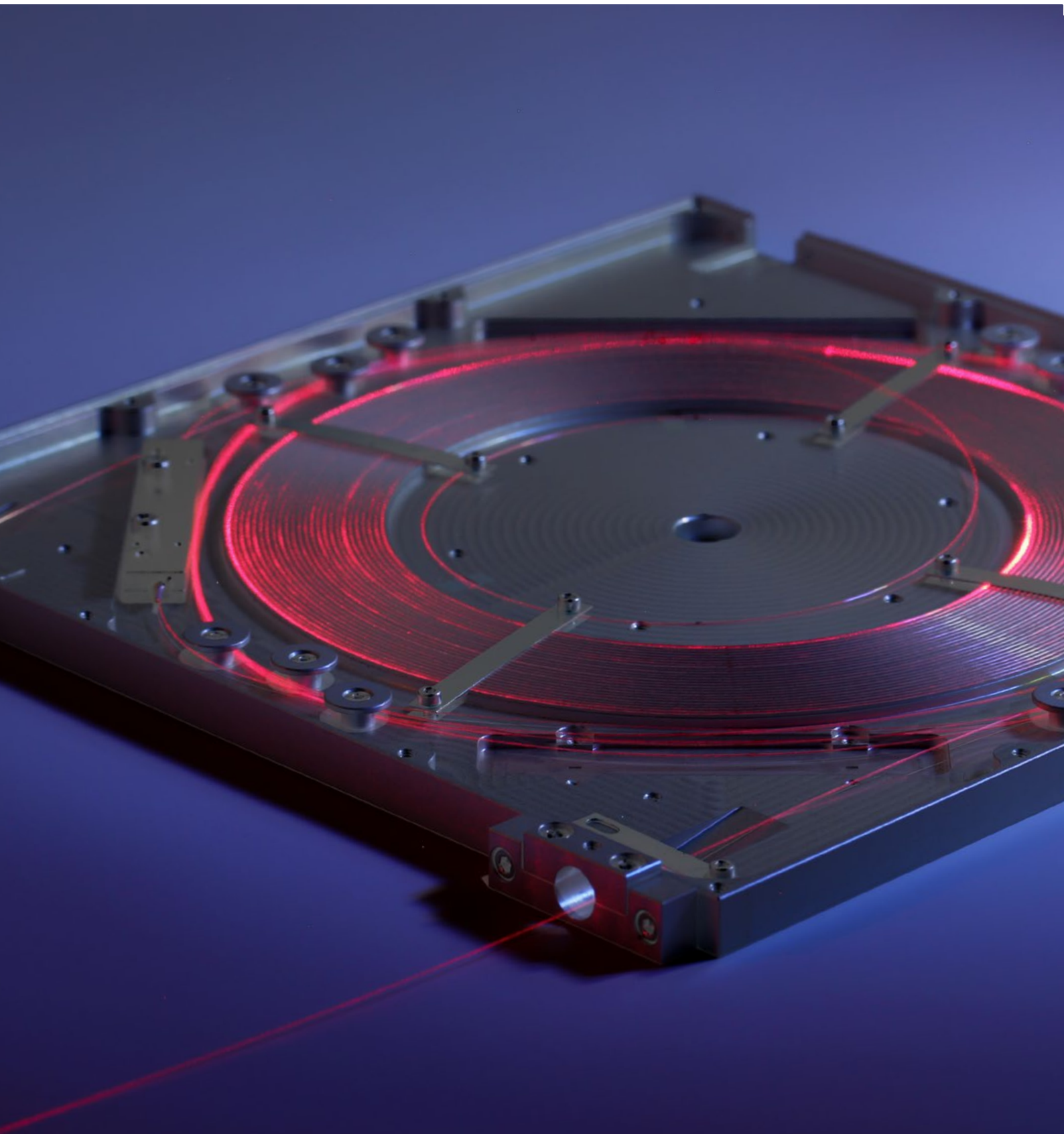
Getnet Kassa Tadesse¹
Robert Klas¹
Stefan Demmler¹
Jens Limpert¹
Jan Rothhardt¹

¹ Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

CONTACT

Dr. Jan Rothhardt
Phone +49 3641 947-818
jan.rothhardt@uni-jena.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



LASERTECHNIK

LASER TECHNOLOGY

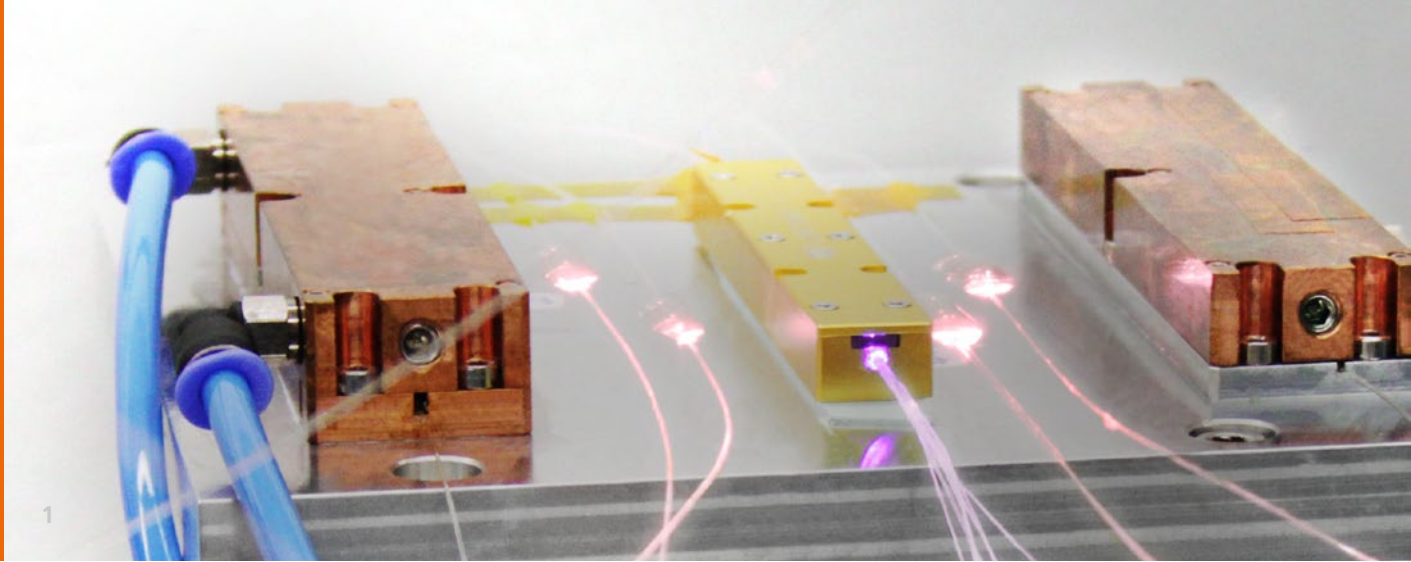
In dem Geschäftsfeld Lasertechnik werden neuartige Hochleistungsfaserlaser, sowie Prozesse zur Laser-Mikro-Materialbearbeitung entwickelt. Arbeitsschwerpunkte sind die Leistungsskalierung beugungsbegrenzter Faserlaser im Multi-Kilowatt-Bereich, die Erschließung des gesamten optischen Spektrums vom EUV bis zu THz durch nichtlinear-optische Techniken, die Erzeugung ultrakurzer Attosekundenimpulse in Faserlasern, sowie die Führung und Formung von Laserstrahlung höchster Leistung und Intensität. Zudem führt das Fraunhofer IOF Untersuchungen zur Laser-Materie-Wechselwirkung ultrakurzer Pulse durch und entwickelt aus den Ergebnissen Lasermaterialbearbeitungsprozesse.

Sowohl in der Faserlaserentwicklung als auch in der Ultrakurzpuls-Präzisionsbearbeitung gehört das Fraunhofer IOF zu den forschungstärksten Instituten mit globaler Sichtbarkeit und zahlreichen technologischen Alleinstellungsmerkmalen. Durch die systematische Optimierung von aktiven Faserpreformen auf die speziellen Bedürfnisse der eigenentwickelten Faserlaser wird das Fraunhofer IOF erstmals in die Lage versetzt, Multi-Kilowatt-Laserquellen monolithisch aufzubauen. Durch den Zuwachs an Robustheit qualifizieren sich diese Hochleistungslaser sowohl für Anwendungen in extremen Umgebungen, wie z. B. dem Weltraum, als auch als wirtschaftliche Prozessquellen hoher Verfügbarkeit für die im Hause entwickelten industriellen Strukturierungs- und Materialbearbeitungstechniken.

Novel high performance fiber lasers, as well as processes for laser micro-machining are developed in the laser technology business field. Areas of expertise include the power scaling of diffraction limited fiber lasers into the multi-kilowatt range, the coverage of the complete optical spectrum from the EUV to THz by nonlinear optical methods, the generation of ultra short pulses down to attosecond pulse durations, and the guiding and shaping of pulses with extreme power and intensity. The Fraunhofer IOF also conducts research on laser-matter interaction of ultrashort pulses and derives industrial solutions that utilize ultrashort pulse laser material processing.

In fiber laser development as well as precision machining using ultrashort laser pulses the Fraunhofer IOF is among the global leaders in research and defines the technological state of the art. By systematically optimizing active fiber preforms and the development of in-house drawing capabilities it is now able to breach the kilowatt limit for monolithic fiber lasers. The resulting growth in robustness and reduction in footprint make these lasers suitable for novel applications in extreme environments, e.g. in the aerospace industry, and triggers cross-pollination effects, where ultrashort pulse laser material processing strategies become more reliable and economical, opening new markets to the laser industry as a whole.

LEFT *Hochleistungsfaser bei 1 μm Wellenlänge in monolithischer Integration. | Monolithically integrated high power fiber for 1 μm wavelength.*



LEISTUNGSSTARKE FASERLASER BEI 1 μm UND 2 μm HIGH POWER FIBER LASERS AT 1 μm AND 2 μm

Faserlaser setzen sich im Hochleistungssegment zunehmend gegenüber althergebrachten Festkörperlasern durch, da sie gute Systemintegrierbarkeit bei hoher Ausgangsleistung, guter Strahlqualität und einfacher Kühlung bieten. Insbesondere im Bereich der Materialbearbeitung steigt ihr Marktanteil kontinuierlich. Je nach Werkstück sind dabei unterschiedliche Arbeitswellenlängen von Vorteil. Am Fraunhofer IOF wurden daher Faserlasersysteme hoher Leistung in den Spektralbereich um 1 μm und 2 μm Wellenlänge erforscht.

Für die faserbasierte Laserverstärkung um 1 μm werden am Fraunhofer IOF seit einigen Jahren eigene Ytterbium-dotierte Fasern entwickelt und hergestellt. Durch Fortschritte im Faserdesign und in der Prozesskontrolle der Preformherstellung wurden Stufenindexfasern mit extrem niedriger numerischer Apertur möglich. Dies erlaubt eine Vergrößerung des Faserkerns bei Beibehaltung der transversalen Strahleigenschaften und resultiert in der Möglichkeit, hohe Laserleistungen im Grundmode-Betrieb durch Unterdrückung nichtlinearer Effekte zu erreichen. Parallel wurde die Wärmelast in der Faser durch geringe Dotierung reduziert, um thermischer Zerstörung und leistungslimitierenden thermischen Modeninstabilitäten entgegenzuwirken.

Mithilfe einer eigenen aktiven Faser mit 23 μm Kerndurchmesser und einer numerischen Apertur $< 0,04$ konnte am

Fiber lasers are continuously increasing their market share in the field of high power lasers for material processing. They can be easily integrated into complex machines, efficiently cooled and provide good beam quality. Depending on the processed material, lasers with different spectral emission properties are advantageous. Fraunhofer IOF has developed high power fiber laser systems around 1 μm and 2 μm wavelength.

For the past few years, Fraunhofer IOF has been developing ytterbium-doped fibers. Significant progress has been made concerning fiber design and preform fabrication, enabling the drawing of step index fibers with ultra-low numerical aperture. This allowed the fiber core size to be increased while still maintaining single transverse mode operation, suppressing nonlinear effects and making higher laser powers possible. Simultaneously, the average heat load in the fiber was reduced by tailoring the doping concentration to avoid thermal destruction and the onset of (power limiting) modal instabilities.

By using an in-house fiber with a 23 μm core diameter and a numerical aperture of less than 0.04, Fraunhofer IOF was able to present an output power of 3.5 kW from a narrow-linewidth (180 pm) fiber system at 1067 nm central wavelength. Due to low ytterbium doping concentration,

1 *Komponenten des Thulium-Hochleistungssystems im Betrieb.* |
Components of high power thulium fiber laser in operation.

Fraunhofer IOF erstmals eine Laserleistung von 3,5 kW bei schmalbandiger Emission (180 pm Bandbreite) bei 1067 nm Wellenlänge realisiert werden. Dabei kam ein diodengepumptes zweistufiges Verstärkersystem zum Einsatz, das eine Kontrolle über die spektralen Eigenschaften des Lasers erlaubt. Modeninstabilitäten konnten durch die geringe Dotierung der aktiven Faser vollständig unterdrückt werden; eine nahezu grundmodige Strahlqualität blieb entsprechend erhalten. Durch Erhöhung der spektralen Bandbreite auf 7 nm konnten leistungslimitierende nichtlineare Effekte vermieden und die Ausgangsleistung auf 4,3 kW gesteigert werden, limitiert nur durch die verfügbare Pumpleistung. Damit zeigte das Fraunhofer IOF die bisher höchste Laserleistung dieser Klasse.

Speziell für medizinische Anwendungen, aber auch für die Bearbeitung von Kunststoffen sind Laser im »augensicheren« Spektralbereich von 2 µm Wellenlänge von Interesse. Das Fraunhofer IOF entwickelte hierfür einen Faserlaser bei 1970 nm Wellenlänge auf Basis Thulium-dotierter Fasern. Die erhöhte Wärmeentwicklung im Lasermedium und die Reinheitsanforderungen an die verwendeten Glaskomponenten stellten dabei besondere Herausforderungen dar. Durch exzellente Kühlung und optimierte Spleißtechnologie konnte ein rein faserbasierter Oszillator mit 567 W Ausgangsleistung und guter Strahlqualität realisiert werden, der stabil betrieben werden konnte und in der Leistung nur durch die verfügbare Pumpleistung beschränkt war.

the heat load could be reduced and modal instabilities were avoided, maintaining near diffraction-limited beam quality. By increasing the spectral linewidth to 7 nm, power-limiting nonlinear effects could be further suppressed, increasing the achieved output power to a pump-limited level of 4.3 kW. This is the highest output power presented so far for such a system.

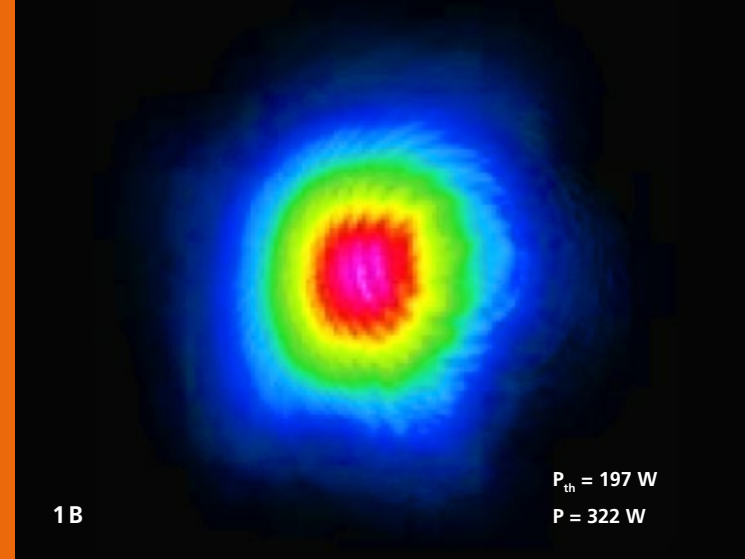
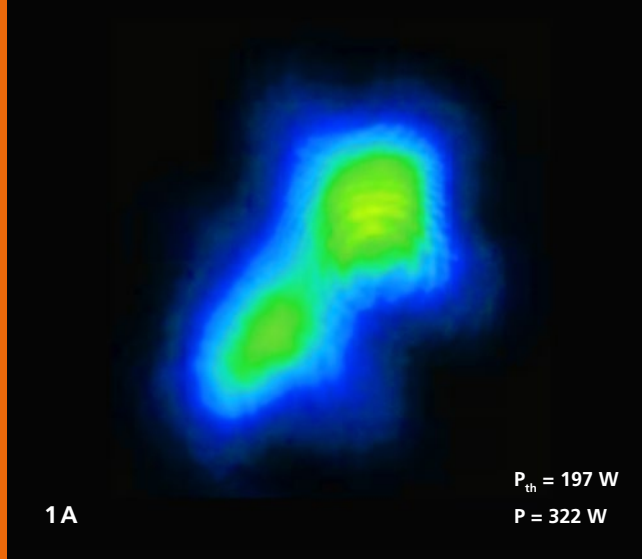
The "eye-safe" spectral region around two microns is particularly interesting for medical applications, but also for the processing of plastics. Fraunhofer IOF has developed a diode-pumped monolithic fiber laser at 1970 nm wavelength based on thulium-doped fibers. The high quantum defect (generating additional heat) and high purity requirements for glasses in all components are specific challenges in such a system. By applying excellent cooling and optimizing splice technology, an all-fiber oscillator with 567 W output power and good beam quality could be implemented. It was stable in operation and only power-limited by available pump power.

AUTHORS

Till Walbaum
Franz Beier
Thomas Schreiber

CONTACT

Dr. Thomas Schreiber
Phone +49 3641 807-352
thomas.schreiber@iof.fraunhofer.de



BEKÄMPFUNG VON MODENINSTABILITÄTEN IN HOCHLEISTUNGSFASERLASERN MITIGATION OF MODE INSTABILITIES IN HIGH-POWER FIBER LASER SYSTEMS

Die Durchschnittsleistung von Faserlasern und Faserverstärkern ist in den letzten 20 Jahren exponentiell gestiegen /1/. Dieser Trend stoppte jedoch abrupt, als im Jahr 2010 die ersten Veröffentlichungen zu einem neuen Phänomen /2/, den sogenannten transversalen Modeninstabilitäten (TMI), erschienen. TMI ist ein komplett neuer, nichtlinearer Effekt, der die Durchschnittsleistung von Faserlasern mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität limitiert. Allein dadurch hebt er sich von den bereits bekannten Effekten ab, die in Faserlasern auftreten.

TMI beschreibt die plötzliche Verschlechterung der Strahlqualität und der Strahlstabilität eines Faserlasers, sobald eine bestimmte Durchschnittsleistung erreicht ist (Abb. 2). Die Ursache für TMI ist die Interferenz zweier transversaler Moden in einer few-mode Faser, welche über den thermo-optischen Effekt ein langperiodisches Brechzahlgitter generiert. Dieses kann wiederum potentiell zu einem Energietransfer zwischen den interferierenden Moden führen.

Kürzlich haben wir erkannt, dass Photodarkening (PD) in Yb-dotierten Fasern zu einer signifikanten Senkung der TMI-Schwelle führt /3/. Die langfristige Strategie, um TMI zu bekämpfen, ist es dementsprechend, ein optisches Material zu finden, das kein PD aufweist.

The output power of fiber laser and amplifier systems has increased exponentially over the last 20 years /1/. However, in 2010 the first reports of a new phenomenon /2/, transverse mode instabilities (TMI), promptly announced the stagnation of this trend. TMI is an effect which limits the average power of fiber laser systems with diffraction-limited beam quality. This alone sets TMI apart from any other known effect occurring in a fiber laser system.

TMI refers to the sudden degradation of the quality and stability of the beam emitted by a fiber laser system observed as soon as a certain average power threshold is reached (Fig. 2). TMI is caused as the interference of two transverse modes in a few-mode fiber creates, via the thermo-optic effect, a long period grating which can potentially lead to an energy exchange between the interfering modes.

Recently we have revealed that photodarkening (PD) in Yb-doped fiber laser systems results in a significant reduction of the TMI threshold /3/. Consequently, a long-term mitigation strategy for TMI is to look for better optical materials devoid of PD.

1 TMI ohne Pumpmodulation (a) und stabilisiert mit Pumpmodulation (b). |

TMI without pump modulation (a) and stabilized with pump modulation (b).

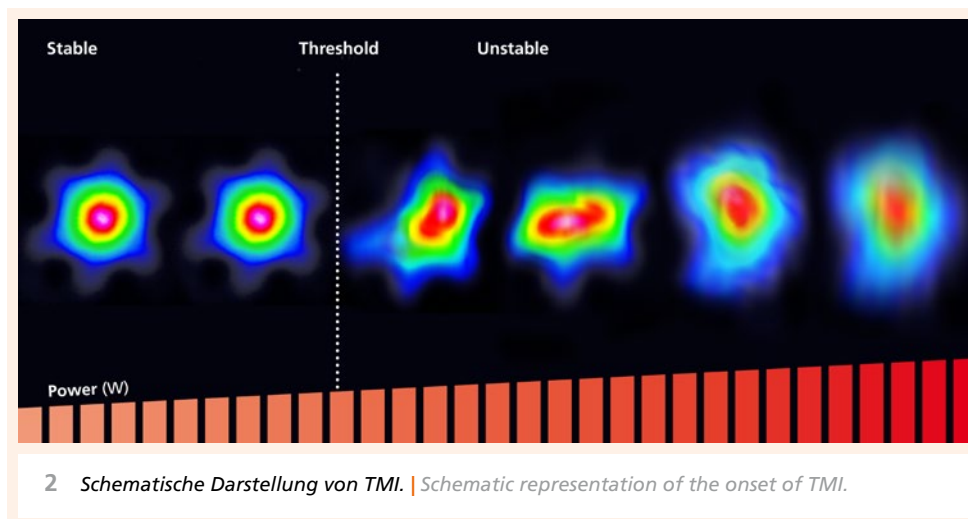
Außerdem konnten wir vor kurzem eine neue Methode entwickeln, die es uns erlaubt, den Strahl oberhalb der TMI Schwelle zu stabilisieren. Dabei wird die Pumpleistung mit Frequenzen im Bereich von 1 kHz moduliert, was dazu führt, dass das thermisch induzierte Brechzahlgitter ausgewaschen und somit der Energietransfer geschwächt wird (Abb. 1). Mit dieser Technik ließ sich die TMI Schwelle bereits verdreifachen.

Mit den von uns entwickelten Strategien kann der Effekt der Modeninstabilitäten bekämpft und die Zukunft der Faserlasertechnologie wieder positiv gestaltet werden.

Literatur / References

- /1/ C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann: High-power fibre lasers, Nat. Photonics 7, 861-867 (2013).
- /2/ T. Eidam et al.: Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers., Opt. Express 19, 13218-13224 (2011).
- /3/ H.-J. Otto, N. Modsching, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann: Impact of photodarkening on the mode instability threshold, Opt. Express 23, 15265 (2015).

In a recent development, a new mitigation of TMI has been demonstrated, which allows the stabilization of the beam above the TMI threshold by modulating the pump power with frequencies around 1kHz. This modulation washes out the thermally-induced index grating and weakens the energy transfer (Fig.1). With this technique, an increase of the TMI threshold by a factor of 3 has already been achieved. Such mitigation strategies make the future of fiber laser technology look bright again.

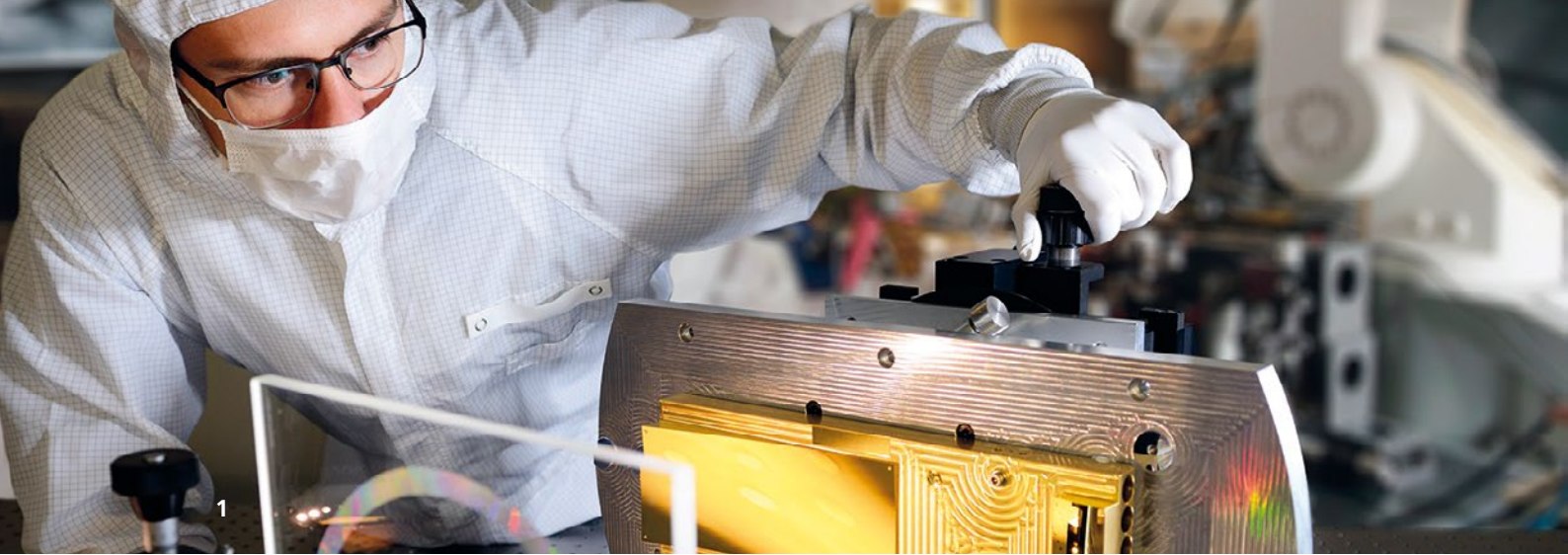


AUTHORS

Cesar Jauregui Misas
Christoph Stihler
Jens Limpert

CONTACT

Dr. Cesar Jauregui Misas
Phone +49 3641 947-816
cesar.jauregui-misas@uni-jena.de



FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

FRAUNHOFER GROUP 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

Geschäftsfelder

- Abtragen und Trennen
- Bildgebung und Beleuchtung
- Fügen und Generieren
- Lichtquellen und Lasersysteme
- Lithographie
- Materialprüfung und Analytik
- Medizintechnik und Biophotonik

Competence by networking

Six Fraunhofer institutes cooperate in the Fraunhofer Group Light & Surfaces. Co-ordinated competences allow quick and flexible alignment of research work on the requirements of different fields of application to answer actual and future challenges, especially in the fields of energy, environment, production, information and security. This market-oriented approach ensures an even wider range of services and creates synergetic effects for the benefit of our customers.

Core competences of the group

- Surface and coating functionalization
- Laser-based manufacturing processes
- Laser development and nonlinear optics
- Materials in optics and photonics
- Microassembly and system integration
- Micro and nano technology
- Carbon technology
- Measurement methods and characterization
- Ultra precision engineering
- Material technology
- Plasma and electron beam sources

Business Fields

- Ablation and cutting
- Imaging and illumination
- Additive manufacturing
- Light sources and laser systems
- Lithography
- Material testing and analytics
- Medical engineering and biophotonics
- Micro systems and sensors

- Mikrosysteme und Sensoren
- Optische Systeme und Instrumentierung
- Werkzeuge und Formenbau

Kontakt

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

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

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

- Optical systems and instrumentation
- Tooling and mold making

Contact

Prof. Dr. Reinhard Poprawe (Group Chairman)
Phone +49 241-8906-110

Gabriela Swoboda (Group Assistant)
Phone +49 241-8906-8347
gabriela.swoboda-barthel@ilt.fraunhofer.de

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative optische Systeme zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zu dessen Anwendung. Unser Leistungsangebot umfasst die gesamte photonische Prozesskette vom optomechanischen und optoelektronischen Systemdesign bis zur Herstellung von kundenspezifischen Lösungen und Prototypen. Das Institut ist in den fünf Geschäftsfeldern Optische Komponenten und Systeme, Feinmechanische Komponenten und Systeme, Funktionale Oberflächen und Schichten, Photonische Sensoren und Messsysteme sowie Lasertechnik aktiv.

www.iof.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF

The Fraunhofer IOF develops innovative optical systems to control light from the generation to the application. Our service range covers the entire photonic process chain from optomechanical and opto-electrical system design to the manufacturing of customized solutions and prototypes.

The institute works in the five business fields of Optical Components and Systems, Precision Engineering Components and Systems, Functional Surfaces and Layers, Photonic Sensors and Measuring Systems and Laser Technology.

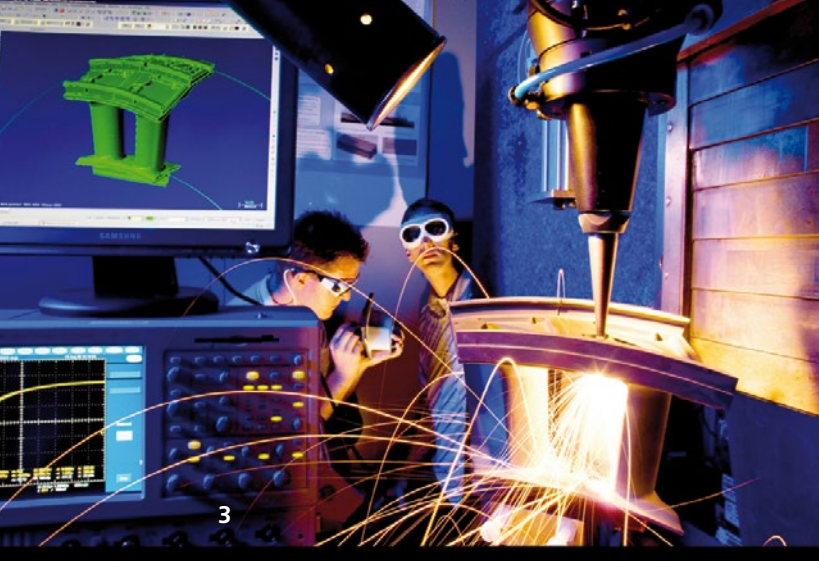
www.iof.fraunhofer.de

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

Das Fraunhofer FEP arbeitet an innovativen Lösungen im Bereich der Vakuumbeschichtung, der Oberflächenbehandlung und der organischen Halbleiter. Grundlage dieser Arbeiten sind die Kernkompetenzen Elektronenstrahltechnologie, Sputtern, plasmaaktivierte Hochratebedampfung und Hochrate-PECVD sowie Technologien für organische Elektronik und IC-/System-

Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP

Fraunhofer Technology FEP works on innovative solutions in the fields of vacuum coating, surface treatment as well as organic semiconductors. The core competences electron beam technology, sputtering, plasma-activated deposition and high-rate PECVD as well as technologies for organic electronics and IC/system design provide a basis for these activities.



design. Unsere Technologien und Prozesse finden Anwendung im Maschinenbau, im Transportwesen, der Biomedizintechnik, der Architektur und für den Kulturguterhalt, in der Verpackungsindustrie, im Bereich Umwelt und Energie, der Optik, Sensorik und Elektronik sowie in der Landwirtschaft.
www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Mit über 400 Patenten seit 1985 ist das Fraunhofer ILT ein gefragter FuE-Partner der Industrie für die Entwicklung innovativer Laserstrahlquellen, Laserverfahren und Lasersysteme. Unsere Technologiefelder umfassen Laser und Optik, Lasermesstechnik, Medizintechnik und Biophotonik sowie Lasermaterialbearbeitung. Hierzu zählen u. a. das Schneiden, Abtragen, Bohren, Schweißen und Löten sowie die Oberflächenbearbeitung, die Mikrofertigung und das Rapid Manufacturing. Übergreifend befasst sich das Fraunhofer ILT mit Laseranlagentechnik, Prozessüberwachung und -regelung, Modellierung sowie der gesamten Systemtechnik.
www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Das Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST bietet als innovativer FuE-Partner Lösungen in der Oberflächentechnik, die gemeinsam mit Kunden aus Industrie und Forschung erarbeitet werden. Das »Produkt« ist die Oberfläche, die durch Modifizierung, Strukturierung und/oder Beschichtung für Anwendungen primär in den folgenden Geschäftsfeldern optimiert ist: »Maschinenbau, Werkzeuge und Fahrzeugtechnik«; »Luft- und Raumfahrt«; »Energie und Elektronik«; »Optik« und »Life Science und Umwelt«. Die Kompetenzen des Fraunhofer IST in der Schichtherstellung und Schichtanwendung werden unterstützt durch eine entsprechende Schicht- und Oberflächenanalytik sowie durch die Simulation der vakuumbasierten Beschichtungsprozesse.
www.ist.fraunhofer.de



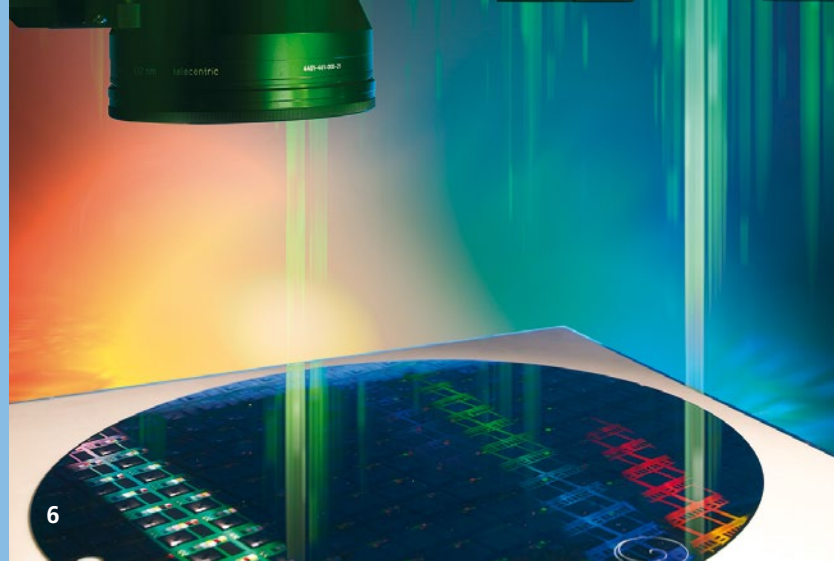
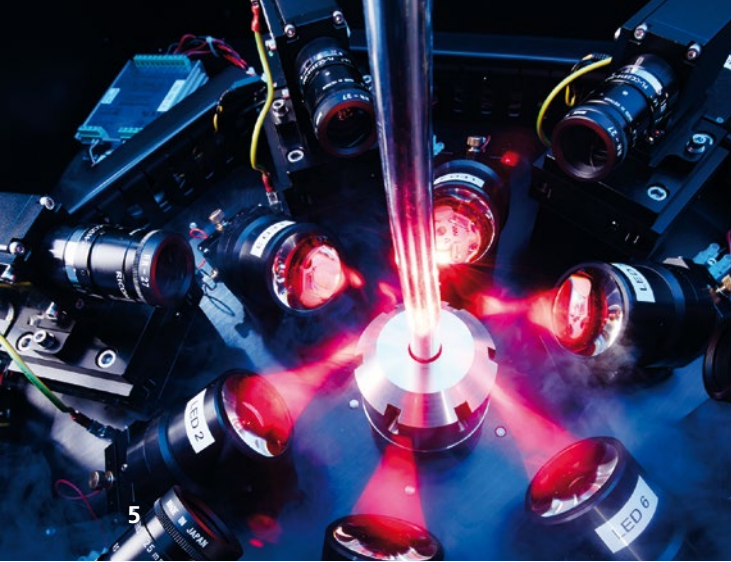
Fraunhofer FEP continuously enhances them and makes them available to a wide range of industries: mechanical engineering, transport, biomedical engineering, architecture and preservation, packaging, environment and energy, optics, sensor technology and electronics as well as agriculture.
www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT

With more than 400 patents since 1985 the Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT develops innovative laser beam sources, laser technologies, and laser systems for its partners from the industry. Our technology areas cover the following topics: laser and optics, medical technology and biophotonics, laser measurement technology and laser material processing. This includes laser cutting, caving, drilling, welding and soldering as well as surface treatment, micro processing and rapid manufacturing. Furthermore, the Fraunhofer ILT is engaged in laser plant technology, process control, modeling as well as in the entire system technology.
www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST

As an innovative R&D partner the Fraunhofer IST offers complete solutions in surface engineering which are developed in cooperation with customers from industry and research. The IST's "product" is the surface, optimized by modification, patterning, and/or coating for applications in the business units automotive, tools and mechanical engineering, aerospace, energy and electronics, optics, and also life science and ecology. The extensive experience of the Fraunhofer IST with thin film deposition and film applications is complemented by excellent capabilities in surface analysis and in simulating vacuum-based processes.
www.ist.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Das Fraunhofer IPM entwickelt maßgeschneiderte Messtechniken, Systeme und Materialien für die Industrie. Dadurch ermöglichen wir unseren Kunden, den Energie- und Ressourceneinsatz zu minimieren und gleichzeitig Qualität und Zuverlässigkeit zu maximieren. Fraunhofer IPM macht Prozesse ökologischer und gleichzeitig ökonomischer. Langjährige Erfahrungen mit optischen Technologien und funktionalen Materialien bilden die Basis für Hightech-Lösungen in der Produktionskontrolle, der Materialcharakterisierung und -prüfung, der Objekt- und Formerfassung, der Gas- und Prozesstechnologie sowie im Bereich Funktionelle Materialien und Systeme.

www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM

The Fraunhofer IPM develops tailor-made measuring techniques, systems and materials for industry. In this way we enable our customers to minimize their use of energy and resources while at the same time maximizing quality and reliability. Fraunhofer IPM makes processes more ecological and at the same time more economical. Many years of experience with optical technologies and functional materials form the basis for high-tech solutions in the fields of production control, materials characterization and testing, object and shape detection, gas and process technology as well as functional materials and systems.

www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

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

www.iws.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS

The Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology is known for its innovations in the business units joining and cutting as well as in the surface and coating technology. Across all business units our interdisciplinary topics include energy storage systems, energy efficiency, additive manufacturing, lightweight construction and big data. Our special feature is the expertise of our scientists in combining the profound know-how in materials engineering with the extensive experience in developing system technologies. Every year, numerous solutions with regard to laser material processing and coating technology have been developed and have found their way into industrial applications.

www.iws.fraunhofer.de

- 1 Fraunhofer IOF
- 2 Fraunhofer FEP
- 3 Fraunhofer ILT
- 4 Fraunhofer IST
- 5 Fraunhofer IPM
- 6 Fraunhofer IWS

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

THE 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 69 Institute und Forschungseinrichtungen. 24 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,1 Milliarden Euro. Davon fallen 1,9 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Mehr als 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die dann in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

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

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Regionen, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern

Research of practical utility lies at the heart of all activities pursued by the Fraunhofer-Gesellschaft. Founded in 1949, the research organization undertakes applied research that drives economic development and serves the wider benefit of society. Its services are solicited by customers and contractual partners in industry, the service sector and public administration.

At present, the Fraunhofer-Gesellschaft maintains 69 institutes and research units. The majority of the 24,500 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of 2.1 billion euros. Of this sum, 1.9 billion euros is generated through contract research. More than 70 percent of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. Almost 30 percent is contributed by the German federal and state governments in the form of base funding, enabling the institutes to work ahead on solutions to problems that will not become acutely relevant to industry and society until five or ten years from now.

International collaborations with excellent research partners and innovative companies around the world ensure direct access to regions of the greatest importance to present and future scientific progress and economic development.

With its clearly defined mission of application-oriented research and its focus on key technologies of relevance to the future, the Fraunhofer-Gesellschaft plays a prominent role in the German and European innovation process. Applied research has a knock-on effect that extends beyond the direct benefits perceived by the customer: Through their research and development work, the Fraunhofer Institutes help to reinforce the competitive strength of the economy in their local region, and throughout Germany and Europe. They do so by promoting innovation, strengthening the technological base, improving the acceptance of new technologies, and helping to train the urgently needed future generation of scientists and engineers.

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.

www.fraunhofer.de

As an employer, the Fraunhofer-Gesellschaft offers its staff the opportunity to develop the professional and personal skills that will allow them to take up positions of responsibility within their institute, at universities, in industry and in society. Students who choose to work on projects at the Fraunhofer Institutes have excellent prospects of starting and developing a career in industry by virtue of the practical training and experience they have acquired.

The Fraunhofer-Gesellschaft is a recognized non-profit organization that takes its name from Joseph von Fraunhofer (1787–1826), the illustrious Munich researcher, inventor and entrepreneur.

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE

NAMES, DATA, ACTIVITIES



Besondere Gäste | Special Guests

Ministerpräsident Bodo Ramelow

Freistaat Thüringen, Germany

Minister Wolfgang Tiefensee

Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und
Digitale Gesellschaft, Germany

Delegation des Auswärtigen Amts der Bundesrepublik Deutschland

Reimund Neugebauer

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, Germany

Karsten Danzmann

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Germany

Benjamin Eggleton

University of Sydney, Australia

Alexei Erko

Helmholtz-Zentrum Berlin, Germany

Roberto Morandotti

INRS-EMT, Canada

F. Ömer Ilday

Ultrafast Optics & Lasers Laboratory UFOLAB, USA

LEFT *Vom ersten Rubinlaser zum lasergestützten Gravitationswellendetektor – Der Wegbereiter der modernen Lasertechnik*
Prof. Dr. Herbert Welling zu Gast am Fraunhofer IOF.

From the first generation of ruby lasers to laser-assisted gravitational wave detector - the pioneer of modern laser technology
Prof. Dr. Herbert Welling gave a talk at the Fraunhofer IOF.

Internationale Kooperationen | International Co-operations

Australia

CUDOS at the University of Sydney, Benjamin Eggleton

Austria

Institut für Quantenoptik und Quanteninformation,
Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien,
Rupert Ursin

IQOQI - Institute for Quantum Optics and Quantum Information Vienna, Rainer Blatt

Brazil

University of Porto Alegre, Institute for Physics, Flavio Horowitz

Canada

University of Toronto, Aaron Wheeler, Peter Herman

Université Laval, Younés Messaddeq

INRS-EMT Varennes, Roberto Morandotti

Graduiertenschule Kanada, Stewart Aitchison

Czech Republic

Brno University of Technology, Miloslav Ohlídal

Indonesia

Institute for Technology Bandung, Aleksander Iskander

Israel

Ben Gurion University, Institute for Applied Research,
Alexander Cohen

Italy

University "La Sapienza" Rom, Francesco Michelotti
Insubria University, Paolo Di Trapani

People's Republic of China

Tongji University, Xinbin Cheng

Changchun Institute of Optics, fine Mechanics and Physics,
CAS, Xuejan Zhang, Catherine Hui Wang

Russia

Space Research Institute Moscow, Alexander Yascovich

Spain

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Andoni Moral

Switzerland

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Hans-Peter Herzig

The Netherlands

Netherlands Organisation for Applied Scientific Research TNO,
Stefan Bäumer

United States of America

Yale University, Colby Jurgenson

University Rochester, Tom Brown

German Center for Research and Innovation,
Annette Doll-Sellen

CREOL, College of Optics & Photonics, Martin Richardson

ILA Berlin Air Show

1.–4.6.2016, Berlin, Germany

OPTATEC

7.–9.6.2016, Frankfurt/M., Germany

GPEC – General Police Equipment Exhibition & Conference

7.–9.6.2016, Leipzig, Germany

SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation

26.6.–1.7.2016, Edinburgh, Scotland

K 2016

19.–26.10.2016, Düsseldorf, Germany

Karrieremesse Inova

25.–26.10.2016, Ilmenau, Germany

VISION

8.–10.11.2016, Stuttgart, Germany

Aus- und Weiterbildung | Education and further training

Die umfangreichen Aktivitäten des Fraunhofer IOF auf dem Gebiet der Aus- und Weiterbildung erstrecken sich von der Ausbildung von Physiklaboranten und Industriemechanikern über die Betreuung von Praktikanten, von Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten sowie von Doktoranden, das Halten von Vorlesungen, die Durchführung von Seminaren und Praktika an den Jenaer Hochschulen bis zur Organisation von Workshops und internationalen Konferenzen.

Comprehensive activities of Fraunhofer IOF in the field of education and further training range from professional training of laboratory technicians and industrial mechanics over the supervision of interns, graduates and postgraduates, giving lectures and seminars at the Jena universities up to the organization of workshops and international scientific conferences.

Messebeteiligungen | Fairs Participations

Photonics West

16.–18.2.2016, San Francisco, USA

HANNOVER MESSE, »Research & Technology«

25.–29.4.2016, Hannover, Germany

Control

26.–29.4.2016, Stuttgart, Germany

analytica

10.–13.5.2016, München, Germany

mtex+

31.5.–2.6.2016, Chemnitz, Germany

Vorlesungen I Lectures

Dr.-Ing. Erik Beckert

Optikmontage

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Norbert Kaiser

Beschichtungstechnologie

Nanooptik

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Gunther Notni

Systemtechnik und Systemtheorie in der Bildverarbeitung Qualitätsmanagement

Technische Universität Ilmenau

Prof. Dr. Andreas Tünnermann / Dr. Olaf Stenzel

Thin Film Optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann / Prof. Dr. Stefan Nolte

Atome und Moleküle II

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Stefan Nolte

Ultrafast optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Stefan Nolte / Prof. Dr. Jens Limpert

Laser Physics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Jens Limpert

Grundlagen der Laserphysik

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Robert Brunner

Mikrooptik, Mikroskopie

Spektrale Sensorik, Geometrische Optik

Optische Instrumente

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Herbert Gross

Lens design I, II

Design & correction of optical systems

Fundamentals of microscopic imaging

Imaging and aberration theory

Optical Engineering

Optical Metrology and Sensing

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Thomas Pertsch

Astrophotonics

Computational photonics, Computational Physics I

Fundamentals of modern optics

Introduction to nanooptics

Introduction to applications of modern optics and photonics in astronomy

Friedrich-Schiller-Universität Jena

PD Dr. Uwe Detlef Zeitner

Micro- and Nano-Technology

Introduction to Optical Modelling

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Frank Schreppe

Physik der Materie III (AMQ Lehramt)

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Conferences – Workshops – Events

20-th European OptiLayer Workshop

14.–16.3.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Sitzung des Fachbeirats »Arbeitskreis Hochschulbau«

7.–8.4.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Licht und Mobilität - Photonik im Automobil

19.–20.4.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Delegationsreise Auswärtiges Amt

21.4.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Treffen der Bezirksgruppe Thüringen der Deutschen

Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik

14.6.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Fraunhofer Technologietag »Technologien von Morgen

für die Raumfahrt von Heute«

22.6.2016, OHB System AG, Oberpfaffenhofen

ININTERACT CONFERENCE 2016 – 3Dsensation

23.–24.6.2016, Chemnitz

Fraunhofer Ausschuss / Tagung Bund / Länder-Kommission / Wissenschaftsrat

23.–24.6.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Laser Display and Lighting Conference – LDC 2016

4.–7.7.2016, Jena

OptoNet-Workshop »Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms«

21.–22.9.2016, Jena

Christian Plass

Vergleich optischer 3D-Messverfahren

Friedrich-Schiller-Universität Jena

22. Industriegespräch Chemnitz / Jena

27.9.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Fritz Proske

Adaption und Optimierung der optischen Rückstreuungstechnik zur Dämpfungsanalyse von hochleistungsfähigen Glasfasern mit extrem niedriger numerischer Apertur

Fachhochschule Münster

3Dsensations-Lenkungskreissitzung und I³-Call 2016 – Prototypen-Workshop

30.9.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Jenaer Optikgespräche

7.11.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Vera Todorova

Untersuchungen der infrarotoptischen Eigenschaften von Keramikproben

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Regionale Forschungs- und Innovationsstrategie für intelligente Spezialisierung für Thüringen – RIS3 Thüringen

30.11.2016, Fraunhofer IOF, Jena

Sebastian Töpfer

Untersuchungen zum berührungslosen, optischen, 3-dimensionalen Messen von Fingerabdrücken

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Preise | Prizes

OSA Fellow, Stefan Nolte

Josephine Wolf

Untersuchungen zur Wiederholbarkeit von Brechzahl und Absorptionskantenlage von Tantalpentoxidschichten

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2016

Peter Schreiber, Peter Dannberg

10. Jenaer Lasertagung – Beste Promotion

Marcus Trost

Diplom | Diploma

Science Slam German High Tech Champion Award

Kevin Füchsel, Reinhold Pabst

Henrik von Lukowicz

Untersuchung zum strukturellen Verhalten von Gehäuseelementen und Tragstrukturen für metalloptische Systeme für die Anwendung in der Raumfahrt

Technische Universität Dresden

STIFT Sonderpreis Thüringen

Susan Oxfart, Marcus Trost

Bachelorarbeiten | Bachelor Theses

Max Mäusezahl

High-temperature bondings for optical applications-solid-liquid interdiffusion (SLID)

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Elisa Bergner

Ebenheitsprüfung von Glasoberflächen mittels High-Speed-Projektion

Technische Universität Ilmenau

Denis Peters

Aufbau und Charakterisierung eines NIR-3D-Messsystems mit einem GOBO-Projektor

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Anika Bobzin

Nanostrukturierung von Polyethylen-Schichten durch Plasmaätzen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Aoife Brady

Modelling and Demonstration of Versatile 3D Imaging using PSF Engineering

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Craig O'Connell

Arbitrary pattern generation for ultrashort pulse materials processing

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Thorsten Goebel

Hochrobuste ultrakurzpulsgeschriebene Fasersensorarrays

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Saskia Hanke

Untersuchung zum Diffusionsverhalten von Wasser in Polymeren

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Julius Klenner

Streulichtreduzierte NiP-Schichten

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Ioannis Makos

Gas analysis using two beam ultra-broadband femtosecond Coherent Anti-Stokes Raman Scattering

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Anne-Sophie Munser

Streulichteigenschaften reflexmindernder Nanostrukturen in Kunststoff

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Kevin Murray

Thermische Eigenschaften und Spannungsminimierung in La/B basierten EUV-Multilayersystemen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Sabrina Mönch

Methodenentwicklung zur Prüfung der Wasserdampf- und Schwefelwasserstoffpermeation an geschütztem Silber

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Susanne Pfeifenbring

Untersuchung des Einflusses der Nanostruktur auf oleophobes und oleophiles Benetzungsverhalten

Technische Universität Ilmenau

Roman Posselt

Entwicklung und Evaluierung eines Verfahrens zur schnellen Kalibrierung photogrammetrischer Stereo-Kameras

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Tim Rehfeld

Characterization methods of the emission and absorption cross-sections of active optical fibers

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Sylvain Reinhard

Entwicklung einer Charakterisierungsmethode für Hochgeschwindigkeits-3D-Messsysteme basierend auf Musterprojektion

Technische Universität Ilmenau

Asis Rodriguez

Design of an objective lens for the tilted wave interferometer

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Tim Schultze

Optical Heterodyne Detection for Spectral Characterization of Few Longitudinal Mode Fiber Lasers

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Henning Stark

Electro-optically controlled divided-pulse amplification

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Johannes Stock

Investigations on freeform surfaces under real conditions

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Sandra Warzeschka

Entwicklung und Charakterisierung eines elektrolytischen Abscheidungsprozesses zur Erzeugung von Goldnanostrukturen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Li Xing

Buried curved Fresnel mirror for multi-channel see-through Near-to-Eye display

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dissertationen I Dissertations

Dr. rer. nat. Martin Baumgartl

Ultrafast Laser Sources based on Microstructured Fibers

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Astrid Bingel

Maßgeschneiderte TCO-Schichten und Schichtsysteme

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Frank Burmeister

Hoch-NA-Fokussierung von ultrakurzen Laserpulsen für die Zwei-Photonen-Polymerisation

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Stefan Demmler

High Average-Power Few-Cycle OPCPA System for Strong-Field Applications

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Reinhard Geiß

Micro and nanostructured Lithium niobate for integrated nonlinear optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Arno Klenke

Performance scaling of laser amplifiers via coherent combination of ultrashort pulses

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Reinhold Lehneis

Pulse shortening of passively Q-switched microchip lasers

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Dennis Lehr

Plasmonische Nanomaterialien auf Basis von Nanoringen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Constanze Pradarutti

Design und Entwicklung von optischen Messsystemen basierend auf bidirektionalen Sensorelementen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Martin Steglich

Black Silicon mittels ICP-RIE und seine Anwendungen in Optik und Optoelektronik

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Schutzrechte I Intellectual Property

Patentoffenlegungen I Patent First Publications

Beier, M.; Stumpf, D.; Gebhardt, A.; Risse, S.; Zeitner, U.

Verfahren und Anordnung zur interferometrischen Prüfung

DE 10 2014 117 511 A1

Brahm, A.; Notni, G.; Kühmstedt, P.

Vorrichtung und Verfahren zum berührungslosen Vermessen einer Objektfläche

DE 10 2015 211 954 A1; WO 2016/207442 A1

Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.

Vorrichtung und Verfahren zur relativen Positionierung einer Multiaperturoptik mit mehreren optischen Kanälen relative zu einem Bildsensor

TW 2016 06354 A

Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.

Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung eines Objektbereichs

TW 2016 07317 A; WO 2016/005345 A1

Coriand, L.; Duparré, A.; Notni, G.; Felde, N. (IAP)

Beschichtung für Glasoberfläche, Verfahren zu deren Herstellung und Glaselement

DE 10 2014 112 133 A1

Felde, N.; Coriand, L.; Duparré, A.; Dannberg, P.; Notni, G.

Funktionale Beschichtung und Verfahren zu deren Herstellung

DE 10 2014 119 233 A1

Füchsel, K.

Anordnung zur orts- und wellenlängenaufgelösten Erfassung von Lichtstrahlung, die von mindestens einer OLED oder LED emittiert wird

DE 10 2014 214 721 A1; WO 2016/012276 A1

Gottschall, T. (IAP); Limpert, J. (IAP); Tünnermann, A.; Baumgartl, M. (IAP)

Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung von kurzen Strahlungspulsen

EP 3 063 590 A1

Goy, M.; Reinlein, C.; Leonhard, N.; Appelfelder, M.
**Verfahren zur Formgebung und / oder Formkorrektur
mindestens eines optischen Elements**
DE 10 2015 106 184 A1; WO 2016/170043 A1

Heist, S. (IAP); Kühmstedt, P.; Notni, G.
**Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung einer
Oberfläche**
US 02016 0202051 A1

Kaiser, N.; Schulz, U.; Rickelt, F.; Munzert, P.
**Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht
auf einer Silikonoberfläche und optisches Element**
EP 2 966 481 A1

Lange, N.; Wippermann, F.
**Elektrostatistischer Aktor und Verfahren zum Herstellen
desselben**
EP 2 984 032 A1; CN 10 5392733 A; US 02016 0079884 A1

Oberdörster, A.
Mehrkanaloptik- Bildaufnahmeverrichtung
EP 3 085 070 A1; KR 10 2016 115916 A
US 02016 0295087 A1

Schulz, U.; Kaiser, N.; Munzert, P.; Rickelt, F.
**Verfahren zur Herstellung eines reflexionsmindernden
Schichtsystems und reflexionsminderndes Schichtsystem**
EP 3 011 370 A1; JP 2016 522452 A; KR 10 2016 021263 A
SG 11 2015 101 78 YA; CN 10 5378509 A

Schulz, U.; Rickelt, F.; Munzert, P.; Heiße, H.; Kaiser, N.
**Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht
für Kunststofflinsen**
DE 10 2015 101 135 A1; EP 3 051 321 A1
US 02016 0216409 A1; JP 2016 139138 A

Schürmann, M.; Müller, R.; Kaiser, N.; Schwinde, S. (IAP)
**Verfahren zur Herstellung eines Reflektorelements und
Reflektorelement**
DE 10 2015 103 494 A1; WO 2016/142428 A1

Sieler, M.; Schreiber, P.; Riedel, A.
**Multiapertur-Projektionsdisplay und Einzelbilderzeuger
für ein solches**
EP 2 984 819 A1; EP 3 007 439 A1 (Version 2)
JP 2016 520869 A; KR 10 2016 016848 A
US 02016 0065921 A1; CN 10 5409209 A

de Vries, O.; Plötner, M.; Limpert, J.
**Reduktion der Pulsrepetitionsfrequenz eines gepulsten
Lasersystems**
DE 10 2015 104 084 A1; WO 2016/139252 A1

Wippermann, F.; Lange, N.; Reimann, A.; Bräuer, A.
**Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und
Verfahren zur Herstellung derselben**
EP 3 004 962 A1; US 02016 0154203 A1
KR 10 2016 018496 A; JP 2016 521864 A; CN 10 5431762 A

Wippermann, F.; Reimann, A.; Bräuer, A.
**Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und
Verfahren zur Herstellung derselben**
EP 3 004 960 A1; CN 10 5324699 A; KR 10 2016 011186 A
JP 2016 522447 A

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.
**Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und
Verfahren zur Herstellung derselben**
EP 3 004 961 A1; CN 10 5556372 A; US 02016 0154202 A1
KR 10 2016 016801 A; JP 2016 520875 A

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.
**Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und
Verfahren zur Herstellung derselben**
US 02016 0187611 A1; JP 2016 508623 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
**Multiaperturvorrichtung und Verfahren zur Erfassung
eines Objektbereichs**
US 02016 0255330 A1; CN 10 5814888 A; EP 3 066 830 A1
KR 10 2016 079111 A

Wippermann, F.; Reimann, A.; Dunkel, J.; Bräuer, A.
**Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung einer Struk-
tur aus aushärtbarem Material durch Abformung**
EP 2 988 914 A1; CN 10 5263686 A; JP 2016 518274 A

Schreiber, P.; Sieler, M.; Kraus, M.
**Projektionsdisplay und Verfahren zum projizieren eines
Gesamtbildes**
HK1206819 A

Patenterteilungen | Patent Assignations

Beckert, E.; Pabst, O. (IAP)

Mikropumpe

DE 10 2011 107 046 B4

Beckert, E.; Burkhardt, T. (IAP); Damm, C.; Hornaff, M.

Gefasste optische Komponente, Verfahren zu deren Herstellung sowie deren Verwendung

US 9,233,430 B2

Böhme, S.; Schreiber, T.; Fabian, S.

Laserbasiertes Spleißen von Glasfasern auf optischen Komponenten

JP 5901786 B2

Böhme, S.; Peschel, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.; Limpert, J.

Vorrichtung zum Fügen und Tapern von Fasern oder anderen optischen Bauelementen

EP 2 291 695 B1

Bräuer-Burchardt, C.; Kühmstedt, P.; Notni, G.

Vorrichtung und Verfahren zum berührungslosem Messen von Oberflächenkonturen

DE 10 2013 208 466 B4

Brückner, A.; Berlich, R.; Bräuer, A.

Optikanordnung und Verfahren zur optischen Abtastung einer Objektebene mit einem Mehrkanalabbildungssystem

EP 2 681 605 B1

Danz, N.; Flämmich, M.

Strahlungsemitierende organisch-elektronische Vorrichtung und Verfahren zu deren Herstellung

CN 10 3262286 B; JP 6008869 B2

Duparre, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Leitel, R.;

Völkel, R. (SUSS); Bräuer, A.

Vorrichtung zur optischen Abbildung

US 9,383,557 B2

Ghazaryan, L. (IAP); Szeghalmi, A. (IAP); Kley, E.

Verfahren zur Herstellung optisch wirksamer Elemente

DE 10 2015 203 307 B3

Kalkowski, G.; Eberhardt, R.; Schürmann, M.; Fabian, S.;

Jahnke, C.

Verfahren zum silikatischen Bonden von beschichteten und unbeschichteten optischen Körpern

US 9,233,873 B2

Kalkowski, G.; Risse, S.; Eberhardt, R.

Verfahren zur Erzeugung von Leichstrukturelementen

EP 2 678 730 B1

Klenke, A. (IAP); Seise, E.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

Optische Verstärkeranordnung

US 9,484,709 B2

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Jauregui, C. (IAP); Jocher, C. (IAP)

Erzeugung azimuthal oder radial polarisierter Strahlung in optischen Wellenleitern

US 9,459,403 B2

Limpert, J. (IAP); Röser, F.; Eidam, T.; Jauregui, C.; Tünnermann, A.

Einzelmodenpropagation in mikrostrukturierten optischen Fasern

US 9,448,359 B2

Lutzke, P.; Schmidt, I.

Aufsatz und Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen einer Oberfläche

DE 10 2013 012 939 B4

Oberdörster, A.; Wippermann, F.; Brückner, A.;

Neubauer, H. (IIS); Schweiger, T. (IIS)

Bildsensor, Abbildungsvorrichtung und - Verfahren für einen Bildsensor

DE 10 2011 081 405 B4

Oberdörster, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.;

Neubauer, H. (IIS); Schweiger, T. (IIS)

Abbildungsvorrichtung und Verfahren für eine Abbildungsvorrichtung

DE 10 2012 218 834 B4

Oberdörster, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.;

Neubauer, H. (IIS); Schweiger, T. (IIS)

Bildsensor und Verfahren

DE 10 2012 218 835 B4

Palme, M.; Riehemann, S.; Notni, G.; Kühmstedt, P.;

Bräuer-Burchardt, C.

Vorrichtung und Verfahren zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur

EP 2 079 981 B1

Scheiding, S. (IAP); Risse, S.; Peschel, T.; Gebhardt, A.; Damm, C.; Steinkopf, R.

Verfahren zur Fertigung einer optischen Anordnung mit mindestens zwei optischen Funktionsflächen, optisches Gerät und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens
US 9,296,161 B2

Schmälzle, P.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Punke, M. (Uni Karlsruhe); Völkel, R. (Suss MicroOptics)

Mikrolinsen-Array mit integrierter Beleuchtung
EP 2 210 132 B1

Schulz, U.; Munzert, P.; Fahland, M.; Schöneberger, W. (FEP)
Kunststoffsubstrat mit einer porösen Schicht und Verfahren zur Herstellung der porösen Schicht
DE 10 2012 100 288 B4; US 9,499,902 B2

Schulz, U.; Wendling, I. (IAP); Munzert, P.; Kaiser, N.
Verfahren zur Herstellung eines optischen Elements mit einer reflexionsmindernden Antibeschlagsschicht
EP 2 118 691 B1

Sieler, M.; Schreiber, P.
Projektionsdisplay mit Mehrkanaloptik mit nicht kreisförmiger Gesamtaperatur
KR 10 1672024 B1

Sieler, M.; Schreiber, P.
Projektionsdisplay und Verfahren zum Anzeigen eines Gesamtbildes für Projektionsfreiformflächen oder verkippte Projektionsflächen
US 9,247,222 B2; RU 2 587 502 C2

Sieler, M.; Förster, E.; Schreiber, P.
Projektionsdisplay und dessen Verwendung
KR 10 1689564 B1; TW I54 771 8 B

Tünnermann, A.; Limpert, J.; Jansen, F. (IAP); Eidam, T. (IAP); Jauregui, C. (IAP); Otto, H.-J. (IAP); Stutzki, F. (IAP)
Method and device for reducing mode instability in an optical waveguide
US 9,235,106 B2

Voigtländer, C. (IAP); Nolte, S.; Thomas, J.U.; Tünnermann, A.; Williams, R. (Macquarie University)
Modenfilter mit Brechzahlmodifikation
US 9,360,617 B2

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben
DE 10 2013 209 829 B4

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben
DE 10 2013 209 814 B4

Wippermann, F.; Duparré, J.; Brückner, A.
Vorrichtung zur optischen Navigation und dessen Verwendung
US 9,454,261 B2

Yulin, S.; Nesterenko, V.; Kaiser, N.
Multilayer-Spiegel für den EUV- Spektralbereich
EP 2 864 825 B1

Wissenschaftliche Publikationen | Scientific Publications

Bücher | Books

Reichel, U., Notni, G., Duparré, A., Müller, F., König, S., Herold, V.
Hochtemperatur-Stabilität optikrelevanter Eigenschaften von transparenter MgAl_2O_4 -Spinell-Keramik
in: Handbuch Technische Keramische Kunststoffe (2016).

Stenzel, O.
The physics of thin film optical spectra: an introduction
Springer-Verlag, 2. erw. Aufl. (2016).

Zeitschriften | Journals

Anopchenko, A., Occhicone, A., Rizzo, R., Sinibaldi, A.,
Figliozzi, G., Danz, N., Munzert, P., Michelotti, F.
Effect of thickness disorder on the performance of photonic crystal surface wave sensors
Optics Express 24 (7), 7728-7742 (2016).

Beier, F., Hupel, C., Nold, J., Kuhn, S., Hein, S., Ihring, J., Sattler, B., Haarlammert, N., Schreiber, T., Eberhardt, R., Tünnermann, A.
Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbiumdoped low NA fiber amplifier
Optics Express 24 (6), 6011-6020 (2016).

Berlich, R., Bräuer, A., Stallinga, S.
Single shot three-dimensional imaging using an engineered point spread function
Optics Express 24 (6), 5946-5960 (2016).

Berlich, R., Richter, D., Richardson, M., Nolte, S.
Fabrication of computer-generated holograms using femtosecond laser direct writing
Optics Letters 41 (8), 1752-1755 (2016).

Bingel, A., Steglich, M., Naujok, P., Müller, R., Schulz, U., Kaiser, N., Tünnermann, A.
Influence of the $\text{ZnO}:\text{Al}$ dispersion on the performance of $\text{ZnO}:\text{Al}/\text{Ag}/\text{ZnO}:\text{Al}$ transparent electrodes
Thin Solid Films 616, 594-600 (2016).

Bingel, A., Stenzel, O., Naujok, P., Müller, R., Shestaeve, S., Steglich, M., Schulz, U., Kaiser, N., Tünnermann, A.
AZO/Ag/AZO transparent conductive films: Correlation between the structural electrical, and optical properties and development of an optical model
Optical Materials Express 6 (10), 3217-3232 (2016).

Blumröder, U., Hempel, H., Füchsel, K., Hoyer, P., Bingel, A., Eichberger, R., Unold, T., Nolte, S.
Investigating subsurface damages in semiconductor-insulator-semiconductor solar cells with THz spectroscopy
Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science (online), 1-8 (2016).

Brahm, A., Reetz, F., Schindwolf, S., Correns, M., Kühmstedt, P., Notni, G.
3D shape measurement with thermal pattern projection
Advanced Optical Technologies 5 (5-6), 405-413 (2016).

Bräuer-Burchardt, C., Heinze, M., Schmidt, I., Kühmstedt, P., Notni, G.
Underwater 3D Surface Measurement Using Fringe Projection Based Scanning Devices
Sensors 16 (1) 13 (2016)

Breitkopf, S., Wunderlich, S., Eidam, T., Shestaeve, E., Holzberger, S., Gottschall, T., Carstens, H., Tünnermann, A., Pupeza, I., Limpert, J.
Extraction of enhanced, ultrashort laser pulses from a passive 10-MHz stack-and-dump cavity
Applied Physics B: Lasers and Optics 122 (12), 297 (2016).

Carstens, H., Högner, M., Saule, T., Holzberger, S., Lilienfein, N., Guggenmos, A., Jocher, C., Eidam, T., Esser, D., Tosa, V., Pervak, V., Limpert, J., Tünnermann, A., Kleineberg, U., Krausz, F., Pupeza, I.
High-harmonic generation at 250 MHz with photon energies exceeding 100 eV
Optica, 3 (4) 366-369 (2016).

Dick, L., Risse, S., Tünnermann, A.
Process influences and correction possibilities for high precision injection molded freeform optics
Advanced Optical Technologies 5 (4), 277-287 (2016).

Dreisow, F., Döring, S., Ancona, A., König, J., Nolte, S.
Drilling with ultrashort laser pulses at high repetition rates
Springer Series in Optical Sciences 195, 175-200 (2016).

Felde, N., Coriand, L., Duparré, A., Tünnermann, A.
Wear-Resistant Nanostructured Sol-Gel Coatings for Functional Applications
Journal of Coating Science and Technology 3, 100-108 (2016).

Förster, E., Bohnert, P., Kraus, M., Kilper, R., Müller, U., Buchmann, M., Brunner, R.
Variable diameter CO_2 laser ring-cutting system adapted to a zoom microscope for applications on polymer tapes
Applied Optics 55 (33), 9370-9377 (2016).

Förster, E., Stürmer, M., Wallrabe, U., Korvink, J., Bohnert, P., Brunner, P.

Dual-mode spectral imaging system employing a focus variable lens

Advanced Optical Technologies 5 (2), 167-176 (2016).

Franke, C., Stenzel, O., Wilbrandt, S., Schürmann, M., Wolf, J., Todorova, V., Doherty, B., Kaiser, N.

Optische Konstanten von Substraten im NIR / MIR-Spektralbereich

Vakuum in Forschung und Praxis 28 (1), 28-32 (2016).

Frascella, F., Petri, C., Ricciardi, S., Napione, L., Munzert, P., Jonas, U., Dostalek, J., Bussolino, F., Pirri, C.F., Descrovi, E.

Hydrogel-Terminated Photonic Crystal for Label-Free Detection of Angiopoietin-1

Journal of Lightwave Thechnology 34 (15), 3641-3645 (2016).

Füchsel, K., Tünnermann, A., Thoss, A.

Ultrathin mobile cameras with facet optics are maturing

Laser Focus World 52 (11), 53-55 (2016).

Gaida, C.; Gebhardt, M.; Stutzki, F.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

Thulium-doped fiber chirped-pulse amplification system with 2 GW of peak power

Optics Letters 41 (17), 4130-4133 (2016).

Geiss, R., Sergeyev, A., Hartung, H., Solntsev, A., Sukhorukov, A., Grange, R., Schrepel, F., Kley, E.-B., Tünnermann, A., Pertsch, T.

Fabrication of free-standing lithium niobate nanowaveguides down to 50 nm in width

Nanotechnology 27 (6), 065301 (2016).

Genevée, P., Ahiavi, E., Janunts, N., Pertsch, T., Oliva, M., Kley, E.-B., Szeghalmi, A.

Blistering during the atomic layer deposition of iridium

Journal of Vacuum Science and Technolgy A, 34, 01A113 (2016).

Ghazaryan, L., Kley, E.-B., Tünnermann, A., Szeghalmi, A.

Encapsulation of optical gratings using nanoporous alumina layers

Asian Journal of Physics 25, 7-8 (2016).

Ghazaryan, L., Kley, E.-B., Tünnermann, A., Szeghalmi, A.

Nanoporous SiO₂ thin films made by atomic layer deposition and atomic etching

Nanotechnology 27 (25), 255603 (2016).

Hädrich, S., Kienel, M., Müller, M., Klenke, A., Rothhardt, J., Klas, R., Gottschall, T., Eidam, T., Drozdy, A., Jójárt, P., Várallyay, Z., Cormier, E., Osvay, K., Tünnermann, A., Limpert, J.

Energetic sub-2-cycle laser with 216 W average power

Optics Letters 41 (18), 4332-4335 (2016).

Hädrich, S., Rothhardt, J., Demmler, S., Tschernajew, M., Hoffmann, A., Krebs, M., Liem, A., Vries, O. de, Plötner, M., Fabian, S., Schreiber, T., Limpert, J., Tünnermann, A.

Scalability of components for kW-level average power few-cycle lasers

Applied Optics 55 (7), 1636-1640 (2016).

Hädrich, S., Rothhardt, J., Krebs, M., Demmler, S., Klenke, A., Tünnermann, A., Limpert, J.

Single-pass high harmonic generation at high repetition rate and photon flux

Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 49 (17), 172002 (2016).

Hauptvogel, M.; Schmidt, I.; Schröder, S.; Kühmstedt, P.; Notni, G.

Geschickt kombiniert - Simultane Erfassung von 3D-Geometrie und Oberflächenrauheit

QZ Qualität und Zuverlässigkeit 61 (11), 70-72 (2016).

Heist, S., Kühmstedt, P., Tünnermann, A., Notni, G.

Experimental comparison of aperiodic sinusoidal fringes and phase-shifted sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement

Optical Engineering 55 (2), 024105 (2016).

Heist, S., Lutzke P., Schmidt, I., Dietrich, P., Kühmstedt, P., Tünnermann, A., Notni, G.

High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection

Optics and Lasers in Engineering 87, 90-96 (2016).

Heusinger, M., Flügel-Paul, T., Zeitner, U.D.

Large-scale segmentation errors in optical gratings and their unique effect onto optical scattering spectra

Applied Physics B: Lasers and Optics 122 (8), 222 (2016).

Hoera, C., Skadell, M., Pfeiffer, S., Pahl, M., Shu, Z., Beckert, E., Belder, D.

A chip-integrated highly variable thermal flow rate sensor

Sensors and Actuators, B: Chemical (225), 42-49 (2016).

Jardim, P.L.G., Horowitz, F., Felde, N., Schröder, S., Coriand, L., Duparré, A.

Determination of the Wenzel roughness parameter by the power spectral density of functional alumina surfaces
Thin Solid Films 606, 57-62 (2016).

Jauregui, C., Otto, H.-J., Bretkopf, S., Limpert, J., Tünnermann, A.
Optimizing high-power Yb-doped fiber amplifier systems in the presence of transverse mode instabilities
Optics Express 24 (8), 7879-7892 (2016).

Kaiser, N.

New optical surfaces

Vakuum in Forschung und Praxis 28 (3), 3-3 (2016).

Kaiser, N.

Vakuumbeschichtungen - Urknall der optischen Technologien: Seit der ersten Antireflexbeschichtung im Jahr 1935 unerlässlich bei der Fertigung von Präzisionsoptiken
Vakuum in Forschung und Praxis 28 (2), 8-8 (2016).

Kienel, M., Müller, M., Klenke, A., Limpert, J., Tünnermann, A.
12 mJ kW-class ultrafast fiber laser system using multidimensional coherent pulse addition
Optics Letters 41 (14), 3343-3346 (2016).

Kinast, J., Beier, M., Gebhardt, A.

Ultrapräzise Fertigung von Metalloptiken basierend auf hochphosphorhaltigen Chemisch Nickel Schichten
Galvanotechnik 107 (8), 1546-1550 (2016).

Klas, R., Demmler, S., Tschernajew, M., Hädrich, S., Shamir, Y., Tünnermann, A., Rothhardt, J., Limpert, J.

Table-top milliwatt-class extreme ultraviolet high harmonic light source
Optica 3 (11), 1167-1170 (2016).

Leonhard, N., Berlich, R., Minardi, S., Barth, A., Mauch, S., Mocci, J., Goy, M., Appelfelder, M., Beckert, E., Reinlein, C.

Real-time adaptive optics testbed to investigate point-ahead angle in pre-compensation of Earth-to-GEO optical communication
Optics Express 24 (12), 13157-13172 (2016).

Matthäus, G., Demmler, S., Lebugle, M., Küster, F., Limpert, J., Tünnermann, A., Nolte, S., Ackermann, R.

Ultra-broadband two beam CARS using femtosecond laser pulses
Vibrational Spectroscopy 85, 128-133 (2016).

Müller, M., Kienel, M., Klenke, A., Eidam, T., Limpert, J., Tünnermann, A.

Phase stabilization of spatiotemporally multiplexed ultrafast amplifiers
Optics Express 24 (8), 7893-7904 (2016).

Müller, M., Kienel, M., Klenke, A., Gottschall, T., Shestae, E., Plötner, M., Limpert, J., Tünnermann, A.
1 kW 1 mJ eight-channel ultrafast fiber laser
Optics Letters 41 (15), 3439-3442 (2016).

Munzert, P., Danz, N., Sinibaldi, A., Michelotti, F.

Multilayer coatings for Bloch surface wave optical sensors

Surface and Coatings Technology (online), 1-8 (2016).

Naujok, P., Yulin, S., Müller, R., Kaiser, N., Tünnermann, A.
Interface characterization in B-based multilayer mirrors for next generation lithography
Thin Solid Film 612, 414-418 (2016).

Notni, G., Kühmstedt, P.

Hochgeschwindigkeits-3D-Messungen
Photonik 3, 54-58 (2016).

Pfeiffer, K., Shestae, S., Bingel, A., Munzert, P., Ghazaryan, L., Helvoirt, C. van, Kessels, W.M., Sanli, U.T., Grévent, C., Schütz, G., Putkonen, M., Buchanan, I., Jensen, L., Ristau, D., Tünnermann, A., Szeghalmi, A.

Comparative study of ALD SiO₂ thin films for optical applications
Optical Materials Express 6 (2), 660-670 (2016).

Puthankovilakam, K., Scharf, T., Kim, M.S., Naqavi, A., Herzig, H.P., Weichelt, T., Zeitner, U., Vogler, U.D., Voelkel, R.

Intensity and phase fields behind phase-shifting masks studied with high-resolution interference microscopy
Journal of Micro / Nanolithography, MEMS, and MOEMS 15 (2), 021203 (2016).

Reinlein, C., Damm, C., Lange, N., Kamm, A., Mohaupt, M., Brady, A., Goy, M., Leonhard, N., Eberhardt, R., Zeitner, U., Tünnermann, A.

Temporally-stable active precision mount for large optics
Optics Express 24 (12), 13527-13541 (2016).

Ribes-Pleguezuelo, P., Inza, A.M., Basset, M.G., Rodríguez, P., Rodríguez, G., Laudisio, M., Galan, M., Hornaff, M., Beckert, E., Eberhardt, R., Tünnermann, A.

Assembly processes comparison for a miniaturized laser used for the Exomars ESA mission
Optical Engineering 55 (11), 116107 (2016).

Ribes-Pleguezuelo, P., Koechlin, C., Hornaff, M., Kamm, A., Beckert, E., Fiault, G., Eberhardt, R., Tünnermann, A.

High-precision optomechanical lens system for space applications assembled by a local soldering technique
Optical Engineering 55 (6), 065101 (2016).

Richter, S., Naumann, F., Zimmermann, F., Tünnermann, A., Nolte, S.
Fracture toughness of ultrashort pulse-bonded fused silica
Applied Physics A: Materials Science and Processing 122 (2), 131, 1-6 (2016).

Richter, S., Zimmermann, F., Tünnermann, A., Nolte, S.
Laser welding of glasses at high repetition rates - Fundamentals and prospects (Invited)
Optics and Laser Technology 83, 59-66 (2016).

Rosenberger, M., Zhang, Ch., Votyakov, P., Preißler, M., Celestre, R., Notni, G.
EMVA 1288 camera characterisation and the influences of radiometric camera characteristics on geometric measurements
Acta IMEKO 5 (4), 81-87 (2016).

Rothhardt, J., Hädrich, S., Shamir, Y., Tschernajew, M., Klas, R., Hoffmann, A., Tadesse, G.K., Klenke, A., Gottschall, T., Eidam, T., Limpert, J., Tünnermann, A., Boll, R., Bomme, C., Dachraoui, H., Erk, B., Di Fraia, M., Horke, D.A., Kierspel, T., Mullins, T., Przystawik, A., Savelyev, E., Wiese, J., Laarmann, T., Küpper, J., Rolles, D.
High-repetition-rate and high-photon-flux 70 eV high-harmonic source for coincidence ion imaging of gas-phase molecules
Optics Express 24 (16), 18133-18147 (2016).

Rothhardt, J., Rothhardt, C., Müller, M., Klenke, A., Kienel, M., Demmler, S., Elsmann, T., Rothhardt, M., Limpert, J., Tünnermann, A.
100 W average power femtosecond laser at 343 nm
Optics Letters 41 (8), 1885-1888 (2016).

Sandfuchs, O., Brunner, R.
Efficiency-achromatized reflective dispersion grating by a double-blaze configuration: Theoretical conditions for optimal material selection
Asian Journal of Physics 25 (9), 897-906 (2016).

Satzer, B., Bösel, C., Hartung, J., Jende, R., Srokos, K., Eberhardt, R., Notni, G., Gross, H.
RGB-Projektor mit feinstrukturierter Strahlformungsoptik
Photonik 6, 46-49 (2016).

Schmidt, S., Klein, A.E., Paul, T., Gross, H., Diziain, S., Steinert, M., Assafrao, A.C., Pertsch, T., Urbach, P., Rockstuhl, C.
Image formation properties and inverse imaging problem in aperture based scanning near field optical microscopy
Optics Express 24 (26), 4128-4142 (2016).

Schmidt, S., Tiess, T., Schröter, S., Hambach, R., Jäger, M., Bartelt, H., Tünnermann, A., Gross, H.
Wave-optical modeling beyond the thin-element-approximation
Optics Express 24 (26), 30188-30200 (2016).

Schmieder, S., Weißpflog, J., Danz, N., Klotzbach, U., Sonntag, F.
Detection of miRNA using a surface plasmon resonance biosensor and antibody amplification
Current Directions in Biomedical Engineering 2 (1), 135-138 (2016).

Shu, Z., Pabst, O., Beckert, E., Eberhardt, R., Tünnermann, A.
Inkjet printed organic light-emitting electrochemical cells for disposable lab-on-chip applications manufactured at ambient atmosphere
Materials Today: Proceedings 3 (3), 733-738 (2016).

Sieber, I., Li, L., Gengenbach, U., Beckert, E., Steinkopf, R., Yi, A.Y.
Optical performance simulation of free-form optics for an eye implant based on a measurement data enhanced model
Applied Optics 55 (24), 6671-6679 (2016).

Siefke, T., Kroker, S., Pfeiffer, K., Puffky, O., Dietrich, K., Franta, D., Ohlidal, I., Szeghalmi, A., Kley, E.-B., Tünnermann, A.
Materials Pushing the Application Limits of Wire Grid Polarizers further into the Deep Ultraviolet Spectral Range
Advanced Optical Materials 4, 1780-1786 (2016).

Steglich, M., Käsebier, T., Kley, E.-B., Tünnermann, A.
Black Germanium fabricated by reactive ion etching
Applied Physics A: Materials Science and Processing 122 (9), 836 (2016).

Tadesse, G.K., Klas, R., Demmler, S., Hädrich, S., Wahyutama, I., Steinert, M., Spielmann, C., Zürich, M., Pertsch, T., Tünnermann, A., Limpert, J., Rothhardt, J.
High speed and high resolution table-top nanoscale imaging
Optics Letters 41 (22), 5170-5173 (2016).

Tugchin, B.N., Janunts, N., Steinert, M., Dietrich, K., Sivun, D., Ramachandran, S., Nerkararyan, K.V., Tünnermann, A., Pertsch, T.
Controlling the excitation of radially polarized conical plasmons in plasmonic tips in liquids
RSC Advances 6 (58), 53273-53281 (2016).

Tünnermann, A.

Solid-state and fiber laser advances lead to real-world applications

Laser Focus World 52 (4), 24-25 (2016).

Wahyutama, I.S., Tadesse, G.K., Tünnermann, A., Limpert, J., Rothhardt, J.

Influence of detector noise in holographic imaging with limited photon flux

Optics Express 24 (19), 22013-22027 (2016).

Walbaum, T., Heinzig, M., Schreiber, T., Eberhardt, R., Tünnermann, A.

Monolithic thulium fiber laser with 567 W output power at 1970 nm

Optics Letters 41 (11), 2632-2635 (2016).

Weber, C., Schulz, U., Mühlig, C., Kaiser, N., Tünnermann, A.

Investigation of vacuum deposited hybrid coatings of protic organic UV absorbers embedded in a silica matrix used for the UV protection of Polycarbonate glazing

Optical Materials Express 6 (11), 3638-3650 (2016).

Weichelt, T., Kinder, R., Zeitner, U.D.

Photomask displacement technology for continuous profile generation by mask aligner lithography

Journal of Optics 18 (12), 125401 (2016).

Wilbrandt, S., Stenzel, O.

Analytical elimination of substrate backside reflections from reflectance measurements

Applied Optics 55 (25), 6983-6988 (2016).

Zhang, Ch., Rosenberger, M., Notni, G.

Ein neuartiges multispektrales 3D-Bildaufnahmesystem

Forum Bildverarbeitung 2016, KIT Scientific Publishing, 173-184 (2016).

Zimmermann, F., Lancry, M., Plech, A., Richter, S., Babu, B.H., Poumellec, B., Tünnermann, A., Nolte, S.

Femtosecond laser written nanostructures in Ge-doped glasses

Optics Letters 41 (6), 1161-1164 (2016).

Zimmermann, F., Lancry, M., Plech, A., Richter, S., Ullsperger, T., Poumellec, B., Tünnermann, A., Nolte, S.

Ultrashort pulse laser processing of silica at high repetition rates-from network change to residual strain

International Journal of Applied Glass Science(online), 1-8 (2016).

Zimmermann, F., Plech, A., Richter, S., Tünnermann, A., Nolte, S.

The onset of ultrashort pulse-induced nanogratings

Laser and Photonics Reviews 10 (2), 327-334 (2016).

**ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN ONLINE |
ADDITIONAL INFORMATION ONLINE**

Im Jahr 2016 haben die Mitarbeiter des Fraunhofer IOF viele Vorträge auf Konferenzen und Workshops gehalten. Die vollständige Liste ist im Internet unter www.iof.fraunhofer.de abrufbar.

In 2016, the employees of the Fraunhofer IOF had given many presentations at conferences and workshops. The full list is available on the internet at www.iof.fraunhofer.de.



IMPRESSUM IMPRINT

Herausgeber | Editor

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
Albert-Einstein-Straße 7
07745 Jena
Telefon +49 3641 807-0
info@iof.fraunhofer.de
www.iof.fraunhofer.de

Institutsleiter | Director

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Telefon +49 3641 807-201
andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de

Redaktion | Editorial staff

Dr. Kevin Füchsel
Dr. Stefan Riehemann
Dr. Falk Eilenberger
Annika Höft
Sylvia Bathke
Dr. Stephanie Hesse-Ertelt
Dr. Reinhold Pabst
Anne Groß
Elisabeth Lehmann
Peggy Stöckner

Redaktionsschluss | Editorial deadline

30.03.2017

Gestaltung | Graphic design

Walter Oppel

Druck | Print

Buchdruckerei Emil & Dr. Edgar Richter
Amtsplatz 4
07646 Stadtroda
www.druck-richter.de

Bildnachweis | Photo Acknowledgements

Seite | page: 3: © Fotostudio Arlene Knipper

Seite | page: 22: © Dirk Mahler / Fraunhofer

Seite | page: 24-25:

© jeibmann photographic /

Quelle: Jenoptik, Idee: Hilger & Boie Design

Seite | page: 26-27:

© Wachstumskeim *fo*⁺ [freeform optics plus]

Seite | page: 26(2), 51(2), 56, 84, 92:

© Christian Süß / Fraunhofer IOF

Seite | page: 46, 52(1), 54, 62, 64, 70, 76, 79(3), 100(1):

© Michael Weimer / Fraunhofer IOF

Seite | page: 42, 44, 48, 49, 50, 51, 58, 60, 68, 71, 72, 74,
78, 79(2), 80, 83(2), 85, 86, 88, 90, 96, 98:

© Die Autoren / the authors / Fraunhofer IOF

Seite | page: 94: © Dr. Andreas Liem / Fraunhofer IOF

Seite | page: 101: © Fraunhofer FEP

Seite | page: 102(3): © Fraunhofer ILT

Seite | page: 102(4): © Fraunhofer IST

Seite | page: 103(5): © Fraunhofer IPM

Seite | page: 103(6): © Fraunhofer IWS

Seite | page: 102(3): © Fraunhofer FEP

Seite | page: Titel / Cover, 4, 8, 12, 16, 18, 20, 21, 28, 30,
32, 34, 36, 38, 40, 52(2), 66, 82, 106:

© Walter Oppel / Fraunhofer IOF



WWW.IOF.FRAUNHOFER.DE