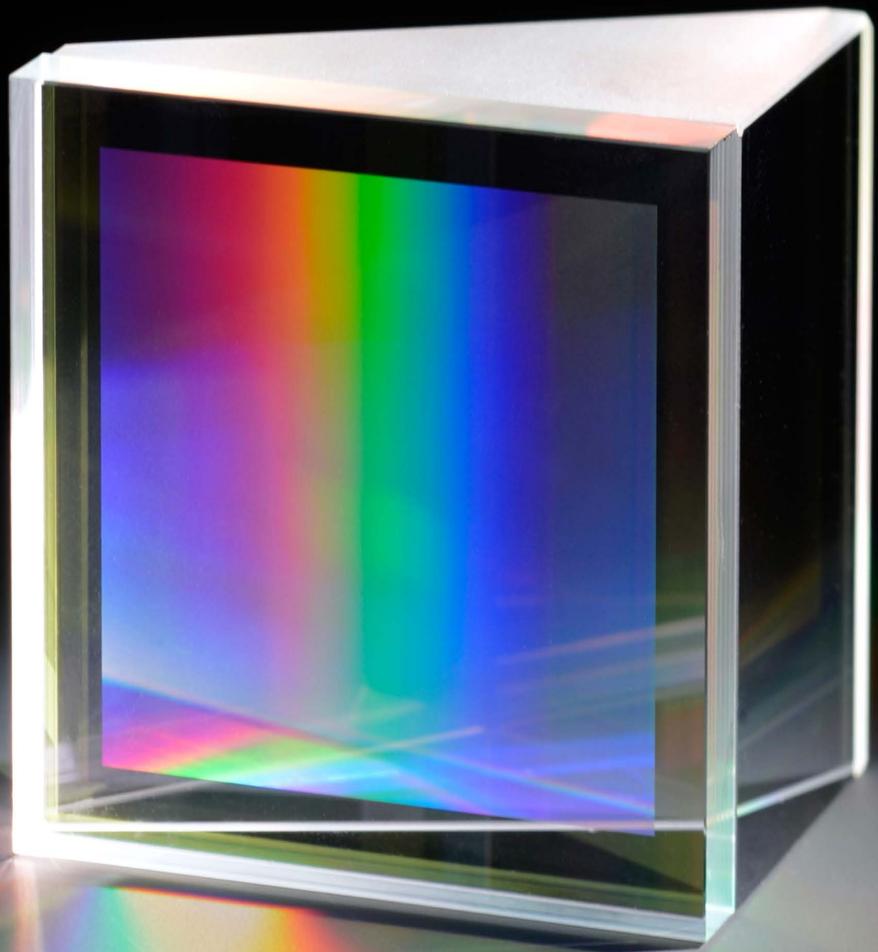


**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2015**



COVER Direkt gebondetes Kieselglas-GRISM (Prism + Grating) mit innenliegendem Gitter (Gitterfläche ALD beschichtet). | *Directly bonded fused silica GRISM (prism + grating) with ALD coated grating at the inner surface.*

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2015**

VORWORT

PREFACE

Das Jahr 2015 wurde von der UNESCO zum »Jahr des Lichts« ausgerufen. Es sollte »an die Bedeutung von Licht als elementare Lebensvoraussetzung für Menschen, Tiere und Pflanzen und daher auch als zentraler Bestandteil von Wissenschaft und Kultur erinnern. Wissenschaftliche Erkenntnisse über das Licht erlauben ein besseres Verständnis des Kosmos, führen zu besseren Behandlungsmöglichkeiten in der Medizin und zu neuen Kommunikationsmitteln.« Dass sich unser Institut in einem solchen Jahr besonders engagierte, liegt nicht nur in der Tradition des Standortes begründet, sondern insbesondere daran, dass Licht unsere Forschung inspiriert.

Wir nutzen Licht als Werkzeug, suchen nach neuen Anwendungsfeldern und legen mit unserer Grundlagenforschung die Basis für neue Lösungen mit Licht. Ich glaube, es ist uns mit verschiedenen Veranstaltungen in Jena gelungen, diese Faszination greifbar zu machen. Erwähnt seien hier als Beispiele die Wissens- und Experimentalshow »LICHTphänomene« in der Sparkassen-Arena, die Experimentierwoche in der Goethe Galerie sowie die »Highlights der Physik« auf dem Eichplatz. Ein herzliches Dankeschön an alle Kolleginnen und Kollegen, die am Gelingen dieser Veranstaltungen beteiligt waren.

Licht und Kultur kann aber noch viel mehr sein. Ein Team unter der Leitung von Peter Kühmstedt konnte, in Zusammenarbeit mit Forschern der Universität Jena, mittels optischer 3D-Vermessungstechniken eine Sammlung historischer Weltkugeln digitalisieren. Prämiert als Beitrag zum »Land der Ideen« zeigt das Projekt, wie Kulturgüter der globalen Gemeinschaft frei zugänglich gemacht werden können.

Der Spatenstich für das Fasertechnologiezentrum war ebenfalls ein Highlight im Jahr 2015. Das Fasertechnologiezentrum wird in diesem Jahr seinen Betrieb aufnehmen. In seinen Ziehtürmen werden die

The year 2015 was declared the "International Year of Light and Light-based Technologies" by the General Assembly of the United Nations. Its purpose was to "promote awareness of how optical technologies promote sustainable development and provide solutions to worldwide challenges in energy, education, agriculture, communications, and health". That our institute was particularly engaged in related activities, is, of course, attributed to its heritage but even more so to the way that light inspires our research.

We use light as a tool, seek new applications, and conduct fundamental research to lay the foundation for novel applications. I believe that we could instill this fascination in audiences in various year-of-light related events in Jena, such as the Science-Show "light phenomena" in the Sparkassen Arena, the hands-on-experiments week in the Goethe Galerie, and the "Highlights of Physics" event. I am grateful to all colleagues, who contributed to the success of each of these events.

However, light and culture can be so much more. A team guided by Peter Kühmstedt, in cooperation with researchers from Jena University, demonstrated that a valuable collection of historic globes can be fully digitized with high class optical 3D-measurement techniques. Their contribution was rewarded with a prestigious "Land of Ideas" award. Their work will help to increase the accessibility of cultural artefacts to the global community.

A further highlight of 2015 was the opening of the construction site for the new fiber technology center, which will begin operating at the end of this year. Its fiber draw towers will be the source for the most innovative laser fibers ever envisioned. At the same time, it is an important strategic stepping stone in the quest to enable a thriving European key industry to retain and enhance its advantage in a rapidly growing market. The center will, however, not only define a



innovativsten Laserfasern für die nächste Generation von Lasern entstehen und somit der europäischen Wirtschaft einen Vorsprung in diesem Zukunftsmarkt sichern. Das Zentrum setzt jedoch nicht nur technologisch Maßstäbe. Als Gemeinschaftsprojekt von Fraunhofer IOF, IPHT Jena, STIFT und dem Weltmarktführer NKT Photonics steht es als herausragendes Beispiel für eine öffentlich-private Partnerschaft, von der alle Beteiligten profitieren.

Das Jenaer Start-up »Active Fiber Systems« konnte, mit Beteiligung unseres Instituts, eine Ausschreibung zum Bau eines Faserlasers für das Laserforschungsprojekt ELI (Extreme Light Infrastructure) gewinnen. In der von der Europäischen Union geförderten Anlage soll mithilfe der weltweit stärksten Laser grundlegende Fragen der Naturwissenschaft nachgegangen werden. Für die grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiet der Faserlaser wurde mir im vergangenen Jahr ein ERC Advanced Grant des Europäischen Forschungsrats zugesprochen. Ohne die zahllosen brillanten Beiträge vieler Kolleginnen und Kollegen wäre diese Ehrung nicht zustande gekommen. Vielen Dank.

Die erfolgreich gelebte Dualität als Vermittler zwischen Grundlagenforschung und Anwendungsentwicklung spiegelt sich auch in der Markteinführung des Lichtteppichs im neuen BMW 7er wider. Hier wurden Grundlagen-ergebnisse des Fraunhofer-Stiftungsprojekts »facetVision« erfolgreich in marktfähige Innovationen umgesetzt. Auch in anderen Themenfeldern ist das Fraunhofer IOF ein gesuchter Kompetenzträger. Unter unzähligen anderen Projekten stechen die Etablierung des Exzellenzclusters »MIRO« mit der Ernst-Abbe-Hochschule zum Thema Infraroptiken, der Start des Fraunhofer-Max-Planck-Kooperationsprojekts »PowerQuant« mit dem Erlanger Institut für die Physik des Lichts zum Thema Quantenoptik, der Start des Verbundforschungsprojekts »THEFA2« zu Faserlasern sowie die Einwerbung von acht Forschungsprojekten aus dem Umfeld des Zwanzig20-Vorhabens »3Dsensation« hervor.

technological state of the art. As a private-public-partnership of Fraunhofer IOF, IPHT Jena, STIFT and the world market leader NKT Photonics, it sets an important example for the mutual benefit that can be gained if key players in research, economy and politics set their sights on common targets.

Using these fiber lasers, an innovative start-up from Jena – "Active Fiber Systems" –in cooperation with our institute, won the bid for the development of one of ELI's laser systems. ELI, the Extreme Light Infrastructure, is an EU-funded research facility that gathers the strongest lasers ever conceived to help researchers find answers to some of science's most fundamental questions. For aspects relating to the development of fiber lasers, I was also awarded an ERC Grant by the European Union. Without the countless brilliant contributions from colleagues, this success story would have been absolutely impossible. Thank you!

It is Fraunhofer's mission to bring ground-breaking innovations to the market. Its successful implementation is reflected in the "Welcome light carpet" that comes fitted in the new BMW model 7. It makes use of fundamental results developed by the Fraunhofer-Foundation project "facetVision" and carries them over into successful innovations, driving the automotive lighting market.

Fraunhofer IOF is a sought-after partner in a wide variety of topics. Among the countless projects of 2015, I would like to bring just a few to attention: the establishment of the Excellence Cluster "MIRO" with the Ernst-Abbe University of Applied Sciences on infrared optics, the start of "PowerQuant", a Fraunhofer-Max-Planck collaboration project with the Institute of the Physics of Light in Erlangen on Quantum Optics, the kick-off of "THEFA2" on fiber lasers, and the Zwanzig20 project "3Dsensation", in which the institute could secure funding for no less than eight sub-projects in 2015.

All in all, the excellent work of all colleagues is reflected by the unusually high number of publications, patents, projects and

LÖSUNGEN MIT LICHT SOLUTIONS WITH LIGHT



Im Großen spiegelt sich die exzellente Forschungsarbeit der Kolleginnen und Kollegen ganz konkret in der hohen Zahl an Publikationen, Patenten, Projekten und Abschlussarbeiten wieder, welche das Fraunhofer IOF zum zweiten Mal in Folge zum forschungstärksten Fraunhofer-Institut macht. Exzellenz findet sich jedoch nicht nur auf der Ebene der Wissenschaft, sondern wird von allen Berufsgruppen im Haus täglich gelebt. In diesem Zusammenhang gratuliere ich Anna Franziska Gottwald, die von der IHK Ostthüringen als landesbeste Auszubildende in der Fachrichtung Physiklaborant(in) des Abschlussjahrgangs 2015 ausgezeichnet wurde. Ebenso wurde sie von der Fraunhofer-Gesellschaft als eine der besten Auszubildenden ausgezeichnet.

Als abschließendes i-Tüpfelchen ehrten uns die Besuche des Bundeswirtschaftsministers Sigmar Gabriel, des Ministerpräsidenten des Landes Thüringen Bodo Ramelow sowie des Thüringer Ministers für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft Wolfgang Tiefensee sehr und zeichneten hierdurch die Exzellenz unserer Arbeit aus.

All diese großen und kleinen Resultate machten 2015 erneut zu einem erfolgreichen Jahr für das Fraunhofer IOF. Dieser Erfolg ist nur denkbar durch die kreative und leidenschaftliche Mitarbeit aller Kolleginnen und Kollegen des Hauses sowie durch das Vertrauen unserer Partner in Wissenschaft, Industrie, Politik und Gesellschaft. Wie jedes Jahr bekenne ich: Es war mir eine Freude und Ehre mit Ihnen allen zu arbeiten. Aber noch mehr freue ich mich auf das Jahr 2016: Auf neue Gelegenheiten Gedanken auszutauschen, Ideen zu entwickeln, Ergebnisse zu bestaunen und Erfolge zu feiern.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Direktor des Fraunhofer IOF | Director of the Fraunhofer IOF

theses, which helped secure Fraunhofer IOF's position among the scientifically most excellent of all Fraunhofer Institutes. Excellent results are, however, not restricted to scientists, but are created by all colleagues alike. In this respect I would like to congratulate former apprentice Anna Franziska Gottwald, who was named the best examined physics lab technician by the IHK Ostthüringen in 2015 and rated among the best apprentices in the Fraunhofer Society.

We have also been honoured by visits of Sigmar Gabriel, vice chancellor of Germany and federal minister for economic affairs, as well as Bodo Ramelow, Thuringia's prime minister and Wolfgang Tiefensee, minister for economy, science and digital society who took the opportunity to find out about the excellent work of the institute. Let me express my gratitude to all colleagues and partners, who helped make these visits successful and memorable.

All those results, major leaps and small steps alike, have, once again, made 2015 a successful year for the Fraunhofer IOF. This fantastic success is created by the passionate work of all colleagues and members of the IOF. It is enabled by the earned trust of our esteemed partners in science, industry, politics and society. And just like every year, I say: It was a great pleasure and honour to have the privilege of working with you, to have the chance of exploring light and its applications with the brightest minds and best team I can possibly imagine. And therefore I once again look forward to the following year: to new chances of exchanging thoughts, developing ideas, marvelling at results, and seeing photonic innovations in action.

LEFT Bundesminister für Wirtschaft und Energie Sigmar Gabriel im Gespräch mit Prof. Dr. Andreas Tünnermann während seines Besuchs am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF im August 2015. | Federal Minister for Economic Affairs and Energy Sigmar Gabriel talking to Prof. Dr. Andreas Tünnermann during his visit at the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF in August, 2015.

INHALT

Das Institut im Profil	8
Ausgewählte Ergebnisse 2015	32
Optische Komponenten und Systeme	34
Freie Sicht dank Freiform	36
Erzeugung beliebiger Beleuchtungsverteilungen	38
Deterministische diffraktiv-refraktiv-hybrid Diffusoren	40
Biosensor für Markierungsfreie Analyse und Fluoreszenzsensorik	42
Nanogitter – künstlich lokale Doppelbrechung in Gläsern	44
Asymmetrischer richtungsselektiver Filter auf Basis von Gitterstrukturen	46
Sentinel-4 NIR-Gitterentwicklung	48
Adaptiv optisches System für Weltraum-Erde Laserkommunikation	50
Feinmechanische Komponenten und Systeme	52
Spannungsarm gelötete Linsen für Hochleistungs-Objektive	54
Leichtgewichtsspiegel	56
Opto-mechanisches Design eines abbildenden Spektrometers zur Erdbeobachtung	58
Funktionale Oberflächen und Schichten	60
Vibrationsbasierte Kontaktwinkelanalyse	62
Schichten für die Breitbandentspiegelung optischer Linsen	64
Atomlagenabscheidung von Antireflexbeschichtungen	66
Hochreflektierende XUV-Multilayer-Spiegel	68
Spektrale Laserzerstörungsschwellenmessung	70
Photonische Sensoren und Messsysteme	72
Tragbarer 3D-Handscanner für die forensische Spurensicherung	74
Hochgeschwindigkeits-3D-Vermessung der Airbag-Entfaltung	76
Multiaperturkamera für Automotive-Anwendungen im Hochdynamikbereich	78
Infrarot-Optische Charakterisierung von Festkörperproben	80
Lasertechnik	82
Fasertechnologie für modeninstabilitätsfreie multi-kW Faserlaser	84
Ultrakurzpuls-Faserlaser im infraroten Spektralbereich	86
Ultrapräzise Metall-Scanspiegel für Ultrakurzpuls laser	88
Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces und die Fraunhofer-Gesellschaft	90
Namen, Daten, Ereignisse	96

CONTENT

Profile of the institute	8
Selected results 2015	32
Optical components and systems	34
Freeform-based monolithic night vision objective	36
Generation of arbitrary illumination distributions	38
Deterministic refractive-diffractive hybrid diffusors	40
Biosensor combining label-free and fluorescence analysis	42
Nanogratings – artificial local birefringence in glasses	44
Asymmetric direction selective filter based on grating structures	46
Sentinel-4 NIR-grating development	48
Adaptive optical system for Earth-Space laser communication	50
Precision engineering components and systems	52
Low-stress soldered lenses for high-performance objectives	54
Lightweight mirrors	56
Opto-mechanical design of an imaging spectrometer for earth observation	58
Functional surfaces and layers	60
Vibration based contact angle analysis	62
Broadband antireflection coatings for optical lenses	64
Atomic layer deposition of antireflection coatings	66
High-reflective XUV multilayer mirrors	68
Spectral laser induced damage measurement	70
Photonic sensors and measuring systems	72
Mobile 3D-scanner for evidence recovery at crime scenes	74
High-speed 3D-measurement of airbag deflation	76
High-dynamic-range multi-aperture camera for automotive application	78
Infrared optical characterization of solid samples	80
Laser technology	82
Fiber technology for mode instability-free multi kW fiber lasers	84
Ultrafast fiber lasers in the infrared spectral region	86
Ultra-precise metal scan-mirrors for ultrashort pulse lasers	88
Fraunhofer Group Light & Surfaces and Fraunhofer-Gesellschaft	90
Names, dates, activities	96



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 opto-mechanischer 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 opto-mechanical 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 opto-mechanischer und opto-elektronischer Mikro- und Makrosysteme. Dies umfasst Montagetechnologien (Positionieren, Justieren), Füge-technologien (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 opto-mechanical 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 Füchsel
---	--

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

BUSINESS FIELDS

 Optical components and systems Dr. Andreas Bräuer	 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
--	--	--	---

STRATEGIC PROJECTS

<p>ultra optics® Center of innovation competence Prof. Dr. Andreas Tünnermann</p> 	<p>3Dsensation Innovation alliance Prof. Dr. Andreas Tünnermann</p> 	<p>Holistic concept and simulation of modern optical systems Prof. Dr. Herbert Gross</p> 
---	--	--

KURATORIUM ADVISORY COMMITTEE



Technical services
Wieland Stöckl



Optics and photonics
materials
Prof. Dr. Thomas
Pertsch



Laser technology
Prof. Dr. Stefan
Nolte

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 2015 ist gegenüber dem Vorjahr um 1 % zurückgegangen, wobei die Aufwendungen für Personal nahezu gleich blieben, während die Sachausgaben um 3,5 % reduziert wurden. Basis ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag erreichte abermals mehr als 10 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten ebenfalls fast 11 Millionen Euro.

Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2015 wurden insgesamt 4,8 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

Personal

Mit leicht reduziertem Betriebshaushalt konnten 2015 keine neuen Arbeitsplätze geschaffen werden. Die Zahl der Mitarbeiter reduzierte sich gegenüber 2014 um 6,7 %. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere

Operating budget

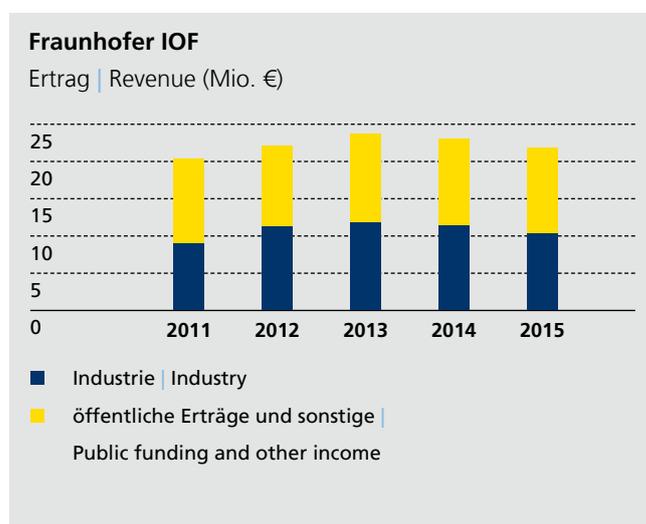
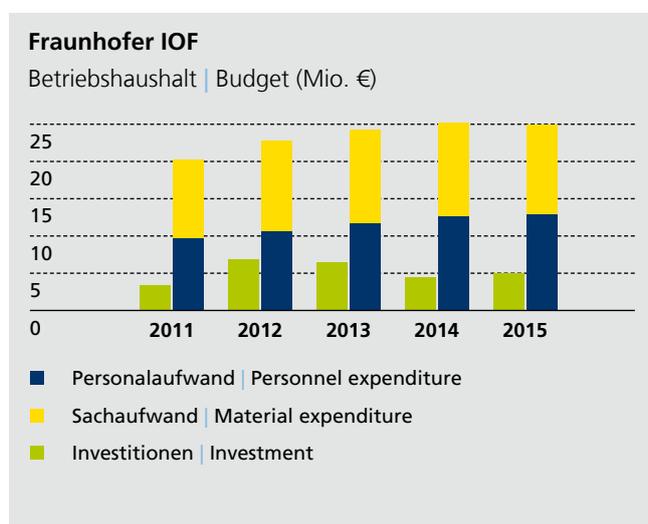
Compared to the previous year the operating budget decreased by 1 % in 2015, with expenditure for staff keeping on the same level while material costs decreased by 3.5 %. Basis still is the high share of revenue from contract research. The industry revenue again reached more than 10 million euros. The received public funding also reached nearly 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 4.8 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2015.

Staff

The slightly reduced operating budget didn't give us the possibility to create new jobs in 2015. The total number of employees has fallen by 6.7 % compared to 2014. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher education, in particular the



der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Ernst-Abbe-Hochschule Jena.

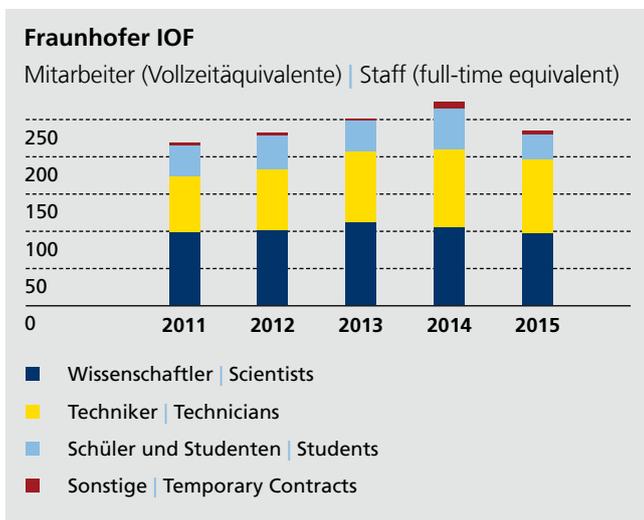
Das FSU-IAP 2015 in Zahlen

Die Mitarbeiter des Institut für Angewandte Physik (IAP) konnten für 2015 Drittmittel in Höhe von 8,9 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2015 7 Professoren, 52 wissenschaftliche und 16 technische Mitarbeiter sowie 100 Doktoranden und 61 Studenten. Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

Friedrich Schiller University Jena and the Ernst Abbe University of Applied Sciences Jena.

The FSU-IAP in figures 2015

Employees at IAP acquired external funds worth 8.9 million euros in 2015 (see table). A total staff of 7 professors, 52 research assistants, 16 technical assistants, 100 doctoral candidates and 61 students were working at IAP in 2015. The majority of completed theses are listed in the attachment.



FSU-IAP
Drittmittelleinnahmen IAP 2015 | Contract research revenue IAP 2015

Fördergeber Contracts with	Zuwendung Funds T€
BMBF	3.902
DFG	776
EU	644
Thüringen Thuringia	197
Stiftungen Foundations	580
Industrie Industry	2.819



3Dsensation

Mensch · Maschine · Umwelt · ZUKUNFT



Ideengenerierung



Ideenbewertung



Auswahl



Konzepterarbeitung



Testing 



Markteinführung

DESIGN THINKING IM INNOVATIONSPROZESS

DESIGN THINKING IN THE INNOVATION PROCESS

Entwicklungsprojekte an Fraunhofer-Instituten sind in einem technologiegetriebenen Forschungsumfeld zumeist hochkomplex. Wissenschaftler und Produktentwickler stehen durch die einzigartigen Fragestellungen der Industriekunden vor großen Herausforderungen. Um diesen Problemstellungen gerecht zu werden, wird bei der Produktentwicklung am Fraunhofer IOF immer häufiger zu der Innovationsmethode Design Thinking gegriffen. Wichtige Aspekte dieser Methode sind eine stärkere Anwenderorientierung, Einfühlungsvermögen und viel Experimentierfreudigkeit im Prototypenbau. Mit Design Thinking lassen sich Technologien nutzergerecht gestalten und emotional ansprechende Lösungen entwickeln.

Über die Entwicklung von nutzerzentrierten Produkten hinaus, nimmt das Fraunhofer IOF auch den positiven Einfluss dieser Prinzipien auf die eigene Organisationsentwicklung wahr. Die Denkart von Design Thinking führt spürbar zu einer produktiveren und innovativeren Arbeitsweise. Die Transformation des Arbeitsumfelds durch diesen Ansatz ist zwar ein langfristiger Prozess, kann aber dazu beitragen, dass sich die Mitarbeiter durch die Würdigung ihrer individuellen Beiträge stärker wertgeschätzt fühlen und gleichzeitig schneller auf Änderungen reagieren können.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts »Ideen-Invention-Innovation« (I³) der Innovationsallianz 3Dsensation werden jährlich maximal zehn Innovationsideen mit dem Potenzial zu radikalen Innovationen gefördert. Projektbegleitend werden die Ideenträger methodisch dabei unterstützt, den Innovationsprozess bis zur Fertigung eines Prototyps zu durchlaufen. Design Thinking Workshops unterstützen die Projektbeteiligten darin, Produkte und Prozesse neu zu denken und applikationsorientiert in Prototypen darzustellen.

Am Fraunhofer IOF wird Design Thinking noch breiter eingesetzt werden. Weiterhin bietet Fraunhofer IOF internen und externen Kunden an, maßgeschneiderte Design Thinking und Prototypen-Workshops durchzuführen.

Development projects at Fraunhofer Institutes are mostly technology-driven and highly complex. The unique problems of industry customers often present significant challenges for scientists and product developers. In order to respond to these challenges in product development, Fraunhofer IOF has been using the innovation method Design Thinking more and more frequently. Thus, a stronger user orientation, intuition, and eagerness to experiment when constructing prototypes are central to this method. Design Thinking enables the developers to generate emotionally appealing technologies according to the user's needs.

Beyond user-centric design, Fraunhofer IOF also recognizes the positive influence of these principles on its organizational development. The Design Thinking mindset leads to a perceptibly more productive and innovative way of working. The working environment's transformation using this method is a long-term process, but it can contribute to more appreciation of the employees' individual contributions and the ability to react to changes more quickly.

In the framework of the project "Ideas-Invention-Innovation" (I³) funded by the BMBF that is realized by the innovation alliance 3Dsensation, ten innovative ideas with the potential for radical innovations are funded every year. During the course of the project, the innovators are methodically supported on the journey from the idea to prototype construction. Design Thinking workshops enable the project participants to think about the products and processes in a new way, and visualize them through prototypes.

At Fraunhofer IOF, Design Thinking will be used in more and more areas. Furthermore, the Institute offers tailor-made Design Thinking and Prototyping workshops to their internal and external customers.

LEFT *Design Thinking Workshop.*

SIGMAR GABRIEL AM FRAUNHOFER IOF

SIGMAR GABRIEL VISITED THE FRAUNHOFER IOF



Am 25. August 2015 besuchte der Bundesminister für Wirtschaft und Energie Sigmar Gabriel das Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF während seiner Sommerreise durch die neuen Bundesländer.

Im Fokus seines Besuches standen die Optik- und Photonikbranche, neue Modelle zur Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und Wissenschaft sowie die Mensch-Maschine-Interaktion in zukünftigen Arbeits- und Lebenswelten. Der Minister trat hier in regen Austausch mit Vertretern des Fraunhofer IOF und der lokalen optischen Industrie und nahm viele inspirierende Diskussionspunkte auf.

Im Rahmen des nachfolgenden Presserundgangs wurden Herrn Gabriel Forschungshighlights aus den Bereichen Luftfahrt und Weltraum sowie der Mensch-Maschine-Interaktion demonstriert. Mit besonderem Interesse blickte der Bundesminister dabei auf die neue Near-to-Eye-Datenbrille und die 3D-Hochgeschwindigkeitsvermessung des Fraunhofer IOF.

An weiteren Stationen experimentierte der Bundesminister mit dem humanoiden Roboter NAO der Fachhochschule Erfurt und agierte an einem Arbeitsplatz mit visueller Montageassistenz des Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung IFF.

On August 25, 2015, the Federal Minister for Economic Affairs and Energy Sigmar Gabriel visited the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF during his summer trip through the new federal states.

The focus of his visit were the optics and photonics sector, new models for cooperation between business and science, as well as the man-machine-interaction in future work and life. The minister had a lively exchange with representatives of the Fraunhofer IOF and the local optical industry and took on many inspiring discussion points.

During the subsequent press tour research highlights were demonstrated to the Minister in the fields of aviation and space, as well as man-machine-interaction. With particular interest, the Federal Minister glanced to the new near-to-eye display designed for use with data glasses and the 3D high-speed measurement system of the Fraunhofer IOF.

At other stations, Sigmar Gabriel experimented with the humanoid robot NAO of the University of Applied Sciences Erfurt, and acted in an installation workplace with visual assistance of the Fraunhofer IFF.

LEFT *Dr. Andreas Bräuer präsentiert dem Bundesminister für Wirtschaft und Energie Sigmar Gabriel das am Fraunhofer IOF entwickelte Near-to-Eye-Display zur Verwendung in Datenbrillen. | Dr. Andreas Bräuer presents Federal Minister for Economic Affairs and Energy Sigmar Gabriel the near-to-eye display for use in data glasses developed at Fraunhofer IOF.*



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015



JENA
LICHTSTADT.



INTERNATIONALES JAHR DES LICHTS 2015

INTERNATIONAL YEAR OF LIGHT 2015

2015 leuchtete es an der Saale: die »Lichtstadt Jena« beteiligte sich mit vielen Aktivitäten und Veranstaltungen am »Internationalen Jahr des Lichts«. Dieses Themenjahr wurde von der UNESCO, der Kulturorganisation der Vereinten Nationen, ausgerufen, um die Bedeutung von Licht und lichtbasierten Technologien ins Bewusstsein der Bevölkerung zu bringen.

In Jena fanden hierzu zahlreiche Aktionen und Veranstaltungen statt. Den Anfang machten eine Ausstellung in der Goethe Galerie und die Eröffnungs-Show »LICHTphänomene« am 17. Januar 2015 mit dem Fernsehmoderator Ralph Caspers. Zusammen mit Jenaer Optikexperten erklärte er auf der Bühne spannende Licht-Phänomene mit anschaulichen Live-Experimenten. Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF war hier neben dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT) federführend involviert.

Vom 15. bis 18. April veranstalteten das Fraunhofer IOF, das Institut für Angewandte Physik (IAP) der FSU Jena und das Optische Museum eine Mitmachausstellung in der Goethe Galerie. Hier konnten Kinder sowie ihre Eltern spannende Optikexperimente erleben.

Besonders Schülerinnen und Schüler sollten im Jahr des Lichts einen Einblick erhalten, wie wichtig Physik, Optik und Photonik in unserer Gesellschaft sind und welche spannenden Studien- und Berufsmöglichkeiten im Zusammenhang mit dem Thema ‚Licht‘ existieren. Genau diesem Anliegen diente auch der Höhepunkt des »Internationalen Jahr des Lichts« im September: das Wissenschafts-Festival »Highlights der Physik« in der Jenaer Innenstadt. Vom 22. bis 26. September fanden neben einer großen Wissenschaftsshow mit Ranga Yogeshwar eine interaktive Physik-Ausstellung mit Live-Experimenten zum Mitmachen und Ausprobieren, Workshops, ein Schülerwettbewerb und spannende Vorträgen statt. Mit einem Besucherrekord von 53.000 Teilnehmern erfreute sich die Highlight-Woche sehr großer Beliebtheit.

In 2015 the area around the Saale River glowed brighter than ever: the "City of Light Jena" participated with lots of activities and events at the "International Year of Light". This theme year, UNESCO, the cultural agency of the United Nations, proclaimed to bring the importance of light and light-based technologies into the consciousness of the population.

In Jena numerous actions and events took place. It started with an exhibition at the Goethe Galerie and the opening show "light phenomena" on 17 January 2015, with TV host Ralph Caspers. Together with Jena optics experts he showed and explained exciting light phenomena with vivid live experiments on stage. The Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF was involved responsible here together with the Leibniz Institute of Photonic Technology (IPHT).

From April 15 to 18, the Fraunhofer IOF, the Institute of Applied Physics of the FSU Jena, and the Optical Museum, organized a hands-on exhibition in the Goethe Galerie. Here children and their parents could try out exciting optical experiments.

During the "International Year of Light" especially students should get an insight on how important physics, optics, and photonics are for our society, and what exciting study and career opportunities related to the topic "light" exist. This was precisely the goal of the culmination of the "International Year of Light" in September: the Science Festival "Highlights of Physics" in the City of Jena. From September 22. to 26. besides the large science show with Ranga Yogeshwar an interactive physics exhibition (with the participation of the Fraunhofer IOF and the IAP of the FSU Jena) took place, with live experiments to join and try out, workshops, student competition, and stimulating talks. With a record attendance of 53,000 participants the highlight-week attracted very great popularity.

LEFT *Physikstudent Christian Plass erklärt Schülern das 3D-Messsystem des Fraunhofer IOF. | Christian Plass explains students the 3D measuring system of Fraunhofer IOF.*

PHOTONIK-AKADEMIE IN DER LICHTSTADT PHOTONICS ACADEMY IN THE CITY OF LIGHT



Die vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und dem Institut für Angewandte Physik (IAP) der Friedrich-Schiller-Universität Jena organisierte Photonik-Akademie vom 14. bis 18. September 2015 in der Lichtstadt bot ausgewählten Studierenden der Ingenieur- und Naturwissenschaften die Möglichkeit, die optische Industrie und Forschung am Standort Jena näher kennenzulernen und sich intensiv mit der Photonik zu beschäftigen.

Die 16 Nachwuchswissenschaftler konnten sich am Fraunhofer IOF und dem Leibniz-Institut für photonische Technologien (IPHT) ein Bild von der Praxis machen und im Anschluss an Laborführungen und Fachvorträge mit den Professionals über künftig relevante Forschungsthemen diskutieren.

Das Highlight der Akademiewoche war der Bau eigener Mikroskope am Institut für Angewandte Physik. Aus Legosteinen, 3D-Drucken, LEDs und Linsen entstanden 16 Mikroskope mit 40-facher Vergrößerung. Dr. Ralf Hambach und Prof. Dr. Herbert Gross halfen den Studierenden bei der aufwendigen Berechnung und Konstruktion ihrer optischen Instrumente. Im Anschluss trafen sich die Teilnehmer in entspannter Atmosphäre mit Entscheidern aus Industrie und Wissenschaft. Mit den »alten Hasen« konnten sie sich austauschen und Tipps für eine erfolgreiche Karriere in der Photonik-Branche erhalten.

An den letzten Exkursionstagen besuchten die Teilnehmer gemeinsam mit ihrem Betreuer Dr. Stefan Riehemann die Produktionshallen und Entwicklungsabteilungen führender Unternehmen der Photonikindustrie. Hier standen Besuche bei der Optics Balzers Jena GmbH, der Carl Zeiss Jena GmbH, der asphericon GmbH und der microfluidic ChipShop GmbH auf dem Programm.

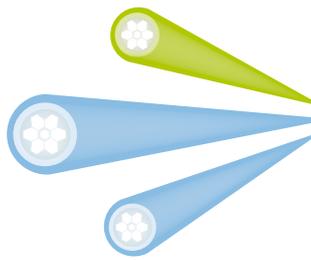
Photonics Academy in the City of Light - organized by the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF and the Institute of Applied Physics of the University of Jena - offered selected students of engineering and natural sciences the possibility to deal intensively with photonics and gain a closer insight into the optical industry and research in Jena. The excursion week from 14th to 18th September offered the 16 participants a varied program.

The young scientists gained an insight into practice at the Leibniz-Institute of Photonic Technology (IPHT) and the Fraunhofer IOF. After lab tours and lectures with professionals, they discussed relevant future research topics with them.

The week's highlight was the construction and assembly of their own microscopes at the Institute of Applied Physics. Lego, 3D printed parts, LEDs, and lenses resulted in 16 microscopes with 40x magnification. Dr. Ralf Hambach and Prof. Dr. Herbert Gross helped the students to elaborate calculation and design of their optical instruments. Afterwards participants met decision-makers from industry and science in a relaxed atmosphere. They were able to exchange ideas with the "old hands" and get tips for a successful career in the photonics industry.

In the last few days the participants visited the production facilities and development departments of leading companies in the photonics industry together with their supervisor Dr. Stefan Riehemann. The programme included visits to Optics Balzers Jena GmbH, Carl Zeiss Jena GmbH, asphericon GmbH, and microfluidic ChipShop GmbH.

LEFT Prof. Dr. Andreas Tünnermann mit den Teilnehmern der Photonik-Akademie 2015. | Prof. Dr. Andreas Tünnermann with the participants of the Photonics Academy in the City of Light 2015.



center of
photonic fibers



NEUES FASERTECHNOLOGIEZENTRUM IN JENA

NEW FIBER TECHNOLOGY CENTER IN JENA

Die Region Jena ist heute einer der weltweit führenden Standorte auf dem Gebiet der Optik und Laserentwicklung. Um die Lasertechnologie in Deutschland voranzutreiben und die Spitzenposition der deutschen Laserindustrie weiter auszubauen, errichtet die Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen (STIFT) mit räumlicher Anbindung an das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF das Fasertechnologiezentrum Jena.

Die STIFT verfolgt mit dem Bau des neuen Fasertechnologiezentrums das Ziel, optimale Bedingungen für die Erforschung und Entwicklung von optischen Fasern zur Erzeugung und Übertragung von Laserstrahlung höchster Leistung zu schaffen. Hinter der Fassade des modernen Zweckbaus entstehen Speziallabore für die Fertigung von aktiven und passiven mikro- und nanostrukturierten optischen Fasern. Auch die Installation eines Ziehturms zur Herstellung der Spezialfasern ist geplant. Wenn Anfang 2017 mit der Forschungs- und Entwicklungsarbeit im neuen Zentrum begonnen werden kann, bündeln sich am Jena-Beutenberg einmalige Kompetenzen im Bereich Lasertechnik und Fasertechnologie. Somit kann am Fasertechnologiezentrum die gesamte Prozesskette, vom Design bis zur Anwendung, realisiert werden.

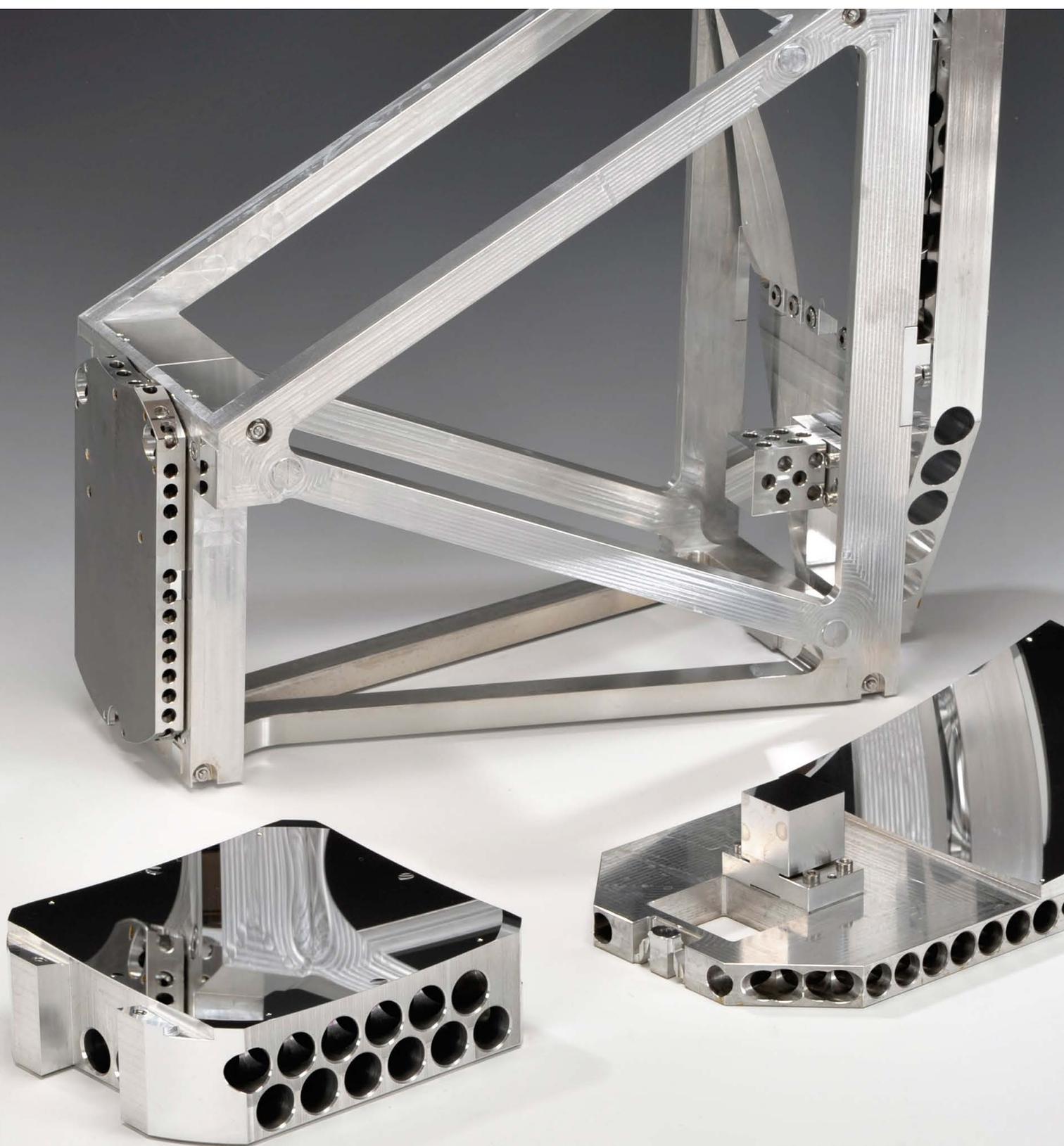
Ein weiterer wichtiger Baustein für die künftige Entwicklung der Fasertechnologie am Standort Jena ist die kürzlich etablierte strategische Forschungsallianz zwischen NKT Photonics A/S und dem Fraunhofer IOF. Im Rahmen dieser Kooperation lizenziert NKT Photonics A/S Teile seiner einzigartigen Technologie für photonische Kristallfasern an das Fraunhofer IOF. Das Fraunhofer IOF ist mit seiner exzellenten Markterfahrung der ideale Partner für NKT Photonics A/S, erklärt CEO Jakob Skov: »Unser Ziel ist es, die industrielle Anwendung der PCF-Technologie weiter voranzutreiben. Wir glauben, dass wir dies am besten durch Partnerschaften und Zusammenarbeit erreichen. Eine starke Patentposition in diesem Bereich bringt eine gewisse Verantwortung mit sich, und wir möchten andere dabei unterstützen, durch die Nutzung unserer Technologien erfolgreich zu sein.«

Today the Jena area is a leading location in the field of optics and laser development. In order to drive laser technology in Germany and ensure the leading position of the German laser industry, the Foundation for Technology, Innovation, and Research Thuringia (STIFT), with spatial connection to the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering (IOF), established the fiber technology center Jena.

With the construction of the new fiber technology center the STIFT aims to provide optimal conditions for research and development of optical fibers for generating and transmitting laser radiation with exceptional performance. Behind the facade of the modern functional building, there are special laboratories for the manufacturing of active and passive micro- and nanostructured optical fibers. In addition, the installation of a drawing tower for the preparation of special fibers is planned. Research and development work in the new center can be started in early 2017, pooling a unique expertise in the field of laser- and fibertechnology at Jena Beutenberg. Thus, the fiber technology center charts and realizes the entire process chain from design to application.

A further important building block for the future development of fiber technology in Jena is the recently established strategic research alliance between NKT Photonics A/S and the Fraunhofer IOF. Within this cooperation, NKT Photonics A/S licensed parts of its unique technology for photonic crystal fibers to the Fraunhofer IOF. With its excellent market experience, the Fraunhofer IOF is the ideal partner for NKT Photonics A/S, explains CEO Jakob Skov: "Our goal is to further promote the industrial application of PCF technology. We believe that we can best achieve this through partnerships and collaboration. A strong patent position in this area brings a certain responsibility with it, and we want to help others succeed through the use of our technologies."

LEFT *Baufortschritt Fasertechnologiezentrum Jena. | Progress of the fiber technology center Jena.*



WACHSTUMSKERN fo^+

REGIONAL GROWTH CORE fo^+

Mithilfe von Freiformflächen lassen sich optische Funktionen realisieren, die mit klassischen Linsen und Spiegeln nicht oder nur in aufwendigen Kombinationen erreicht werden können. Dadurch ist es möglich, Systeme und Komponenten mit neuen Eigenschaften zu realisieren. Im regionalen Wachstumskern fo^+ [freeform optics plus] entwickeln acht Unternehmen und zwei Forschungseinrichtungen der Thüringer Photonikbranche die Grundlagen für die Herstellung, Anwendung und Vermarktung von innovativen freiformoptischen Systemen. Im Fokus der Arbeiten stehen abbildende freiformoptische Systeme für den ultravioletten bis infraroten Spektralbereich (UV-VIS-IR). Das Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik IOF ist durch vielfältige Arbeiten beteiligt und engagiert sich maßgeblich in den Bereichen Systemdesign und Datenfluss, der freiformoptischen Fertigung und der Systemintegration. So wurden Design-Richtlinien erarbeitet, welche Randbedingungen an Spiegelsysteme stellen, so dass diese unter Verwendung bestimmter Fertigungskonzepte bearbeitbar sind.

Im Rahmen des Wachstumskerns ist unter anderem der Aufbau eines freiformbasierten Three-Mirror-Anastigmat-Teleskops für den Bereich Luft- und Raumfahrt geplant. Darüber hinaus werden weitere Linsen- und Filtersubsysteme als auch mikrostrukturierte Gitterspektrometer und antireflexstrukturierte Primäroptiken für photovoltaische Konzentratorsysteme auf Basis der Freiformoptik entwickelt. Zur Halbzeit der Projektlaufzeit konnte eine positive Bilanz gezogen werden – optische und mechanische Designanalysen wurden unter Tolerierungsbetrachtungen durchgeführt und die fertigungstechnischen Grundlagen sind erarbeitet. Zudem wurden bereits erste Demonstratoren realisiert.

Weiterhin konnte gezeigt werden, wie mehrere Freiformflächen auf einem Substrat in einem iterativen Zugang mit sehr guten Formtoleranzen bearbeitet werden konnten. Für Anwendungen im sichtbaren Spektralbereich (VIS) sind Nachbearbeitungen durch Polieren (< 1 nm rms) und eine finale Beschichtung notwendig. Diese Schritte der Prozesskette werden ebenfalls in Teilprojekten des Wachstumskerns fo^+ adressiert.

Optical functions that would normally need a complex combinations of classical lenses and mirrors or are even unable to achieve can be realized with freeform surfaces. Using freeform optics can improve system characteristics and realize new optical features. In the Regional Growth Core fo^+ [freeform optics plus], eight companies and two research institutes in the Thuringian photonics industry are developing the basics for the production, application, and marketing of innovative freeform optical systems. The focuses of the development are imaging freeform optical systems for the ultraviolet to infrared spectral range (UV-VIS-IR).

The Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF is involved through a variety of work and is committed in the areas of system design and data flow, freeform optical manufacturing, and system integration. Design guidelines that provide constraints on mirror systems have been developed, so that they can be processed using certain manufacturing concepts.

Within the Regional Growth Core, the construction of a free-form-based Three-Mirror-Anastigmat-Telescope for the aerospace industry is planned. Moreover, further filter and lens subsystems, as well as micro structured grating spectrometers and antireflection structured primary optics for photovoltaic concentrator systems are developed on the basis of freeform optics. At the project's halfway point, a positive balance could be drawn; optical and mechanical design analysis are carried out under tolerance considerations and the manufacturing bases are elaborated. First demonstrators have already been realized. Furthermore, it could be shown that multiple freeform surfaces on one substrate in an iterative access with very good shape tolerances have been developed. For applications in the visible spectral range (VIS) reworking by polishing (< 1 nm RMS) or final coating is necessary. These steps of the process chain are also addressed in sub-projects of the Regional Growth Core fo^+ .

TOP *Freiformspiegel* | *Freeform mirror*.

HISTORISCHE WELTANSICHTEN AUS JENA HISTORIC WORLD VIEWS FROM JENA





Die Forscher Dr. Andreas Christoph (Friedrich-Schiller-Universität Jena und kulturhistorisches Museum Ernst-Haeckel-Haus) und Dr. Peter Kühmstedt (Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF) sind mit dem Projekt »Digitale Weltansichten online: 3D-Modelle historischer Globen« als Preisträger im bundesweiten Innovationswettbewerb »Ausgezeichnete Orte im Land der Ideen« 2015 geehrt worden. Zum Thema »Stadt, Land, Netz! Innovationen für eine digitale Welt« liefert das Projekt in der Kategorie Kultur eine Antwort auf die Frage, wie dank eines neuen 3D-Scanners räumliche Abbilder historischer Globen aus Museumsmagazinen erstellt werden können.

Von wegen »die Erde ist eine Scheibe«: Spätestens seit dem 15. Jahrhundert gibt es Globen, die den historischen Wissensstand der Geographie und Astronomie sowie kulturelle Vorstellungen ihrer Epoche repräsentieren. Die meisten dieser historischen Globen stauben in Museumsmagazinen ein. Eine Kooperation des Fraunhofer IOF mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena und dem kulturhistorischen Museum Ernst-Haeckel-Haus macht sie nun virtuell verfügbar: Mit einem innovativen 3D-Scanner, der sowohl Form als auch Farbe erfasst, entstehen perfekte digitale Abbilder dieser Weltenmodelle, die für die Öffentlichkeit demnächst frei zugänglich im Internet bereitstehen sollen. Damit wurde ein Verfahren entwickelt, um nicht nur Globen, sondern perspektivisch Kulturschätze aller Art in die digitale Ära zu überführen.

The researchers Dr. Andreas Christoph (Friedrich Schiller University of Jena and the cultural history museum Ernst Haeckel House) and Dr. Peter Kühmstedt (Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF) were honored as prize winners in the 2015 nationwide innovation competition "Excellent Landmarks in the Land of Ideas" for their project "Digital World Views Online: 3D models of historical globes". On the subject "City, country, network! Innovations for a digital world", the project in the category Culture, offers an answer to the question of how spatial images of historic globes can be created from museum magazines by a new 3D scanner.

No way! "The earth is flat". Since the 15th century at the latest, there have been globes that represent the historical knowledge of Geography and Astronomy and cultural ideas of their time. Most of these historic globes are gathering dust in a museum magazines. A cooperation between the Fraunhofer IOF, the Friedrich-Schiller-University of Jena and the cultural history museum Ernst Haeckel House has now made them virtually available. With an innovative 3D scanner that scans both form and color, perfect digital images of these world models are created. These will be soon freely accessible to the public on the Internet. Thus, a method has been developed to transform not only globes, but all kinds of cultural treasures in the digital era.

TOP Dr. Andreas Christoph und Dr. Peter Kühmstedt erhalten den Preis »Ausgezeichneter Ort«. | Dr. Peter Kühmstedt and Dr. Andreas Christoph receive the prize "Landmarks in the Land of Ideas".

LEFT Der mobile 3D-Scanner des Fraunhofer IOF erfasst Form und Farbe des historischen Globus, um daraus eine perfektes dreidimensionales Bild zu erstellen. | Using a mobile 3D scanner to scan form and color of a historical world models in order to create a perfect digital image.

ERFOLGREICHES AUSBILDUNGSMODELL SUCCESSFUL VOCATIONAL TRAINING



PHYSIKLABORANTIN ANNA GOTTWALD

PHYSICS LABORATORY ASSISTANT

ANNA GOTTWALD

Anna Franziska Gottwald hat 2015 ihre Ausbildung zur Physikalaborantin als Landesbeste am Fraunhofer IOF abgeschlossen. Im Gespräch gibt sie einen Einblick in die wissenschaftlich geprägte Ausbildung an einem Forschungsinstitut.

Wieso hast du dich für eine Ausbildung entschieden?

Ich habe angefangen Physik zu studieren, aber festgestellt, dass mir das Studium zu theoretisch ist und habe dann nach einer praktischeren Alternative gesucht und die Berufsbeschreibung des Physikalaboranten gefunden. Diese passte genau auf mich.

Wie war die Ausbildung strukturell aufgebaut?

Zwei Jahre habe ich grundlegende Fertigkeiten in einem externen Bildungszentrum erworben und anschließend Praxiserfahrung am Fraunhofer IOF sammeln dürfen. Die theoretische Ausbildung fand in den drei Jahren begleitend an einer auf Prüftechnik spezialisierten Berufsschule statt.

Welche Erwartungen hattest du an die Ausbildung?

Ich habe eine abwechslungsreiche Ausbildung erwartet und sie auch erhalten. Während der Zeit am Fraunhofer IOF hatte ich die Möglichkeit, alle Forschungsabteilungen kennenlernen zu dürfen. Dabei wurde auch sichtbar, wie stark die Abteilungen interdisziplinär arbeiten und aufeinander aufbauen. Das war faszinierend.

Was sind deine aktuellen Aufgaben, nachdem du vom Fraunhofer IOF übernommen wurdest?

Ich beschäftige mich vor allem mit der Analyse von Rauheits- und Benetzungseigenschaften von Oberflächen und Beschichtungen. Ich untersuche, wie sich deren Verhalten bei der Benetzung mit Öl oder Wasser beeinflussen lässt. Diese Zusammenhänge sind wichtig, um beispielsweise die Verschmutzung von Oberflächen zu reduzieren.

Das Fraunhofer IOF fördert die Höherqualifizierung seiner Mitarbeiter. Welchen Weg würdest du für dich wählen?

Ich strebe die Weiterbildung zur Industriemeisterin an.

Anna Franziska Gottwald successfully completed her vocational training at Fraunhofer IOF in 2015. In this interview she talks about her scientifically shaped vocational training at a research institute.

Why did you opt for vocational training?

I started to study physics, but it was too theoretical for me, so I searched for a more practical alternative and found the matching job description of a physics laboratory assistant.

How was the vocational training structured?

For two years I learned basic skills in an external training center and afterwards I could gain practical experience at the Fraunhofer IOF. The theoretical training took place over the entire training period in an accompanying vocational school.

What were your expectations for the vocational training?

I expected varied vocational training and that is exactly what I got. I got to know every research department of the institute and so I was able to see the interdisciplinary work between all departments. To see how they are based on each other was fascinating.

What are your current tasks at Fraunhofer IOF?

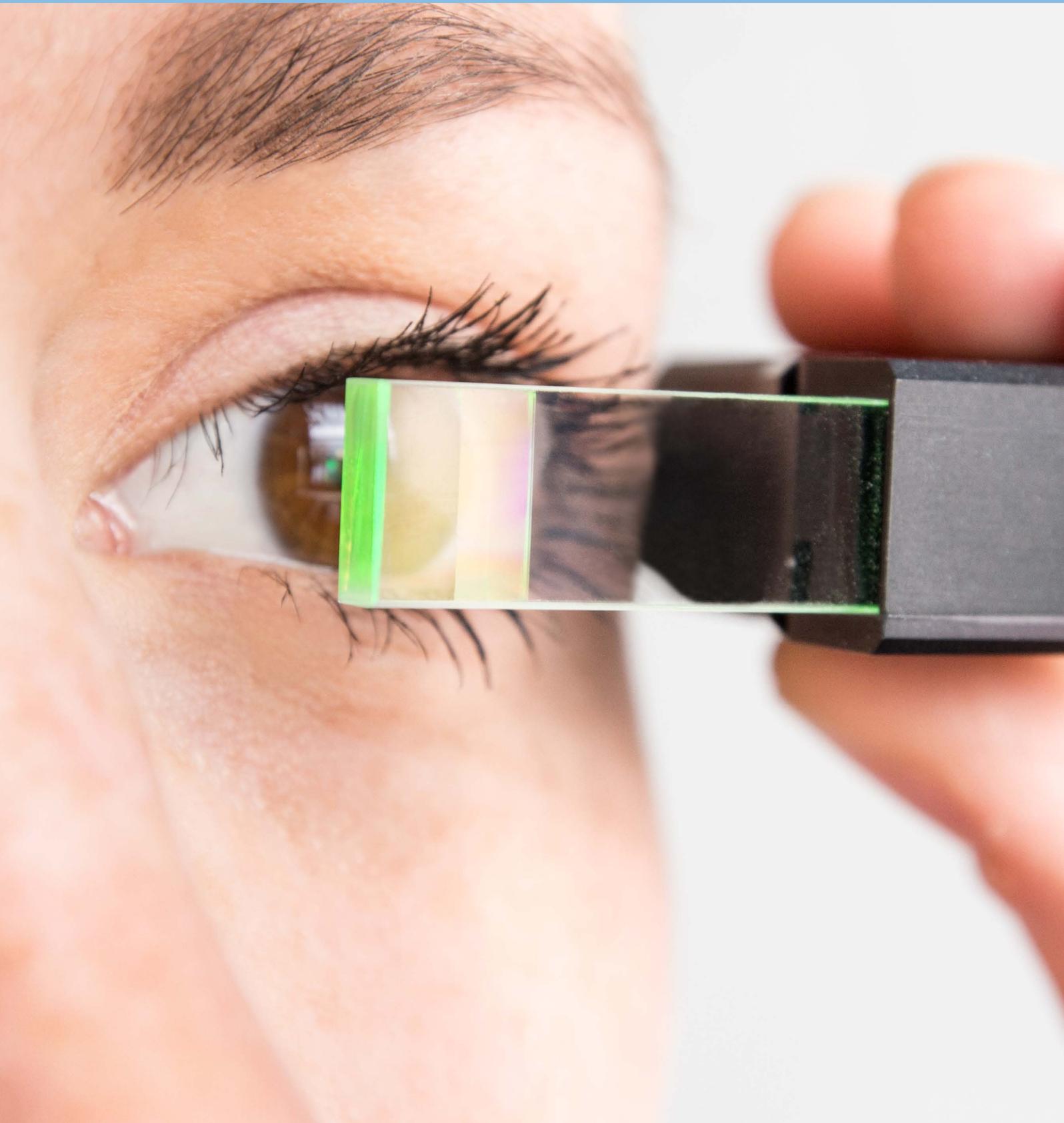
I mainly deal with the analysis of roughness and wetting properties of surfaces and coatings. I examine how wetting with oil or water can affect their behavior. This is important, for example, to reduce surface contamination.

The Fraunhofer IOF supports the upskilling of its employees. Which way would you choose for yourself?

I aim for further training as a forewoman in the field of optics.

LEFT Funktionalisierung einer Oberfläche mittels Sol-Gel-Prozess. |
Functionalization of a surface with sol-gel process.

AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2015
SELECTED RESULTS 2015



Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative Lösungen mit Licht für die Zukunftsfelder Energie, Umwelt, Information, Kommunikation, Gesundheit, Produktion, Sicherheit und Mobilität. Dazu verknüpft es angewandte Forschung und Entwicklung mit exzellenter Grundlagenwissenschaft. In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena entwickelt es herausragende Lösungen zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zur Anwendung.

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 2015, sowohl aus internen Projekten als auch aus Forschungsaufträgen, 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

The Fraunhofer IOF develops innovative solutions with light for the cutting-edge fields of energy, environment, information, communication, health, production, security, and mobility. In close cooperation with the Institute of Applied Physics at the Friedrich Schiller University Jena, it combines applied research and development with scientifically excellent basic research ranging from the creation and manipulation of light to its application.

The Fraunhofer IOF is a worldwide leading and pioneering research institute for photonics and optical system engineering. 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 the Fraunhofer IOF. Its work is performed both in the context of publicly funded initial research projects as well as directly on behalf of the industry.

The following pages present selected research results which were obtained last year in internal projects or jointly with partners and clients. The examples show solutions for 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

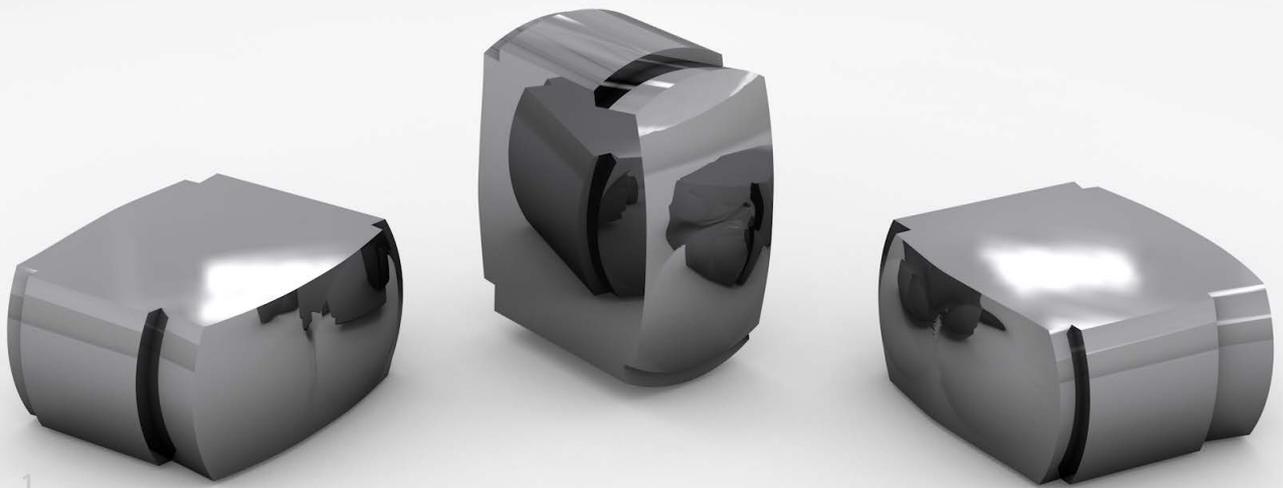
Das Fraunhofer IOF entwickelt kundenspezifische optische und mikrooptische Komponenten, Subsysteme und Systeme für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche. Alleinstellungsmerkmal ist dabei die Beherrschung der kompletten Prozesskette – vom Design über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung – sowie die Bereitstellung von sowohl klassischen Bearbeitungsverfahren als auch von Laser-, Photo- und Elektronenstrahlolithographie. So werden unter anderem metalloptische Komponenten und Systeme für Objektive, Teleskope und Spektrometer entwickelt. Zu deren Herstellung werden unterschiedliche Varianten der Ultrapräzisionsbearbeitung eingesetzt, um sphärische, asphärische und freiform-optische Komponenten und Subsysteme herzustellen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung und Herstellung von ein- und doppelseitigen refraktiven Mikrolinsenarrays sowie von diffraktiven mikrooptischen Bauelementen.

Die Bandbreite der in 2015 abgeschlossenen Projekte in diesem Geschäftsfeld zeigen die nachfolgenden Beiträge. Hier wurden unter anderem Themen wie Gitter für Weltraumanwendungen, optische Freiformsysteme, adaptive optische Systeme zur Laserkommunikation und mikrooptische Systeme mit photonischen Kristallen bearbeitet.

The Fraunhofer IOF develops customized optical and micro-optical components, subsystems, and systems for a variety of application areas. A unique feature is its control of the entire process chain – from design and manufacturing to characterization – and the provision of traditional processing methods as well as laser-, photo- and electron-beam-lithography. We develop e.g. metal optical components and systems for objectives, telescopes, and spectrometers. Different variants of ultra-precision manufacturing technologies are used to produce spherical, aspherical, and freeform optical components and subsystems. A further focus is the development and manufacture of single and double-sided refractive microlens arrays and diffractive micro-optical components using lithographic technologies.

The range of projects completed in 2015 in this business field will be shown by the following contributions. Here adaptive optical systems for laser communications and micro-optical systems with photonic crystals were processed among other issues such as gratings for space applications or optical freeform systems.

LEFT Kompakte Optiken ermöglichen Fahrer-Assistenzsysteme im Automotive-Bereich. | *Compact optical systems enable driver assistance systems in the automotive sector.*



FREIE SICHT DANK FREIFORM FREEFORM-BASED MONOLITHIC NIGHT VISION OBJECTIVE

Nachtsichtkameras helfen, Unfälle zu vermeiden und gehören heute schon zur Ausstattung moderner Wagen der gehobenen Mittelklasse. Jedoch ist der Justageaufwand von mehrlinsigen IR-Objektiven in der Fertigung immer noch verhältnismäßig hoch.

Daher wurde am Fraunhofer IOF im Rahmen des Verbundprojekts fo+ ein kompaktes Objektivdesign, bestehend aus einem monolithischen Element, erarbeitet. Das für den Monolithen verwendete neuartige IG-Glas eignet sich zum Blankpressen. Bei hohen Stückzahlen lassen sich durch gepresste Rohlinge sowohl Material als auch Bearbeitungszeit bei der anschließenden Ultrapräzisionsbearbeitung einsparen. Das Chalkogenidglas ist daher besser zur Massenproduktion geeignet, als beispielsweise Germanium. Aufgrund seiner geringeren Brechzahl von ca. 2,6 stellt es jedoch höhere Anforderungen an das optische Design. Die vier optisch wirksamen Flächen untergliedern sich in die brechenden Ein- und Austrittsflächen und zwei verspiegelte Außenflächen des Monolithen. Durch die Faltung des Strahlenganges reichen in der abbildenden Optik rotationssymmetrische Flächen nicht mehr aus und es wird die Verwendung von Freiformelementen erforderlich. Ein optischer Designprozess beginnt typischerweise bei einem Startsystem, welches bereits nah an den geometrisch-optischen Anforderungen liegt. In der Optimierung wird es dann zum finalen Design iteriert. Im jungen Feld der Freiformflächen gibt es auf Grund der hohen Anzahl an Freiheitsgraden eine große Vielfalt an möglichen Systemgeometrien. Jedoch ist die Auswahl an Startsystemen bisher gering. In diesem Fall wurde daher ein Startsystem mit Hilfe von asphärischen Flächen generiert. Dieser Ansatz ermög-

Night vision cameras can save lives and are therefore already included in many higher-priced cars. However they typically consist of multiple IR-lens elements which bring about large adjustment efforts.

Fraunhofer IOF has therefore developed a compact lens design consisting of one single element. The work was done within the research project fo+. The material of this monolithic element is a novel IG-glass. This chalcogenide glass is suitable for injection molding. With pressed pre-forms, the material volume and time of ultra-precision milling is reduced, resulting in the production process becoming cheaper for mass production. This offers an advantage in comparison to the typical IR material germanium. However its refractive index is in the range of 2.6 and thus comparably low for this wavelength range, making the requirements on the optical design larger. The element is described by four optical surfaces, of which the entrance and exit surface are refractive, while the two remaining surfaces are metalized and used as mirrors. Compactness is achieved by a folded ray path which breaks the rotational symmetry. Thus, the imaging application requires the use of a freeform surface. Typically the optical designer starts with an optical system that is already close to the aimed specifications. The final design is then reached with an iterative optimization process. However, freeform surfaces come with a huge variety of possible system geometries, while the number of existing starting configurations is very small. Therefore the starting configuration for the monolithic design is built from aspherical surfaces, which allows a perfect

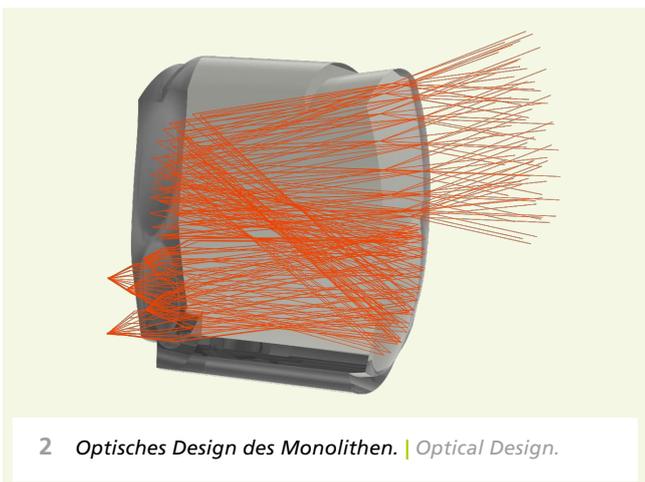
1 Ansicht des kompakten Volumenkörpers (ca. 2 cm x 2 cm x 1 cm). | View of the compact solid body.

licht bei monochromatischem Licht eine ideale Abbildung auf der Achse. Im Speziellen wurde das einfallende Licht zunächst durch einen Off-Axis-Paraboloiden in ein Zwischenbild fokussiert und dann anschließend mit einem Ellipsoiden in die Sensorebene abgebildet. Im anschließenden Optimierungsprozess ist das Bildfeld mit Hilfe einer Freiformfläche aufgeweitet und die spektrale Bandbreite auf $8\ \mu\text{m} - 14\ \mu\text{m}$ erhöht worden. Die verwendete Freiformfläche ist durch ein Zernike-Fringe-Polynom beschrieben. Im Ergebnis werden $37^\circ \times 25^\circ$ Feldwinkel über das gesamte Bildfeld bei $17\ \mu\text{m}$ Pixelabstand und einer Blendenzahl von 1 gut abgebildet. Durch das reale Zwischenbild ist ein kompaktes Bauvolumen von ca. $2\ \text{cm} \times 2\ \text{cm} \times 1\ \text{cm}$ realisiert. Ein Design mit einem größeren Feldwinkel von $60^\circ \times 40^\circ$ wurde ebenfalls erfolgreich getestet.

In dem fertigungsgerechten Design sind die freigeformten und asphärischen Flächen so angeordnet, dass sich jeweils zwei Flächen gemeinsam durch Ultrapräzisionsbearbeitung fertigen lassen und eine Verstärkung der Werkzeugpfade unterstützt wird. Dadurch beschränkt sich die Fertigung auf zwei Flächen, die zudem zu einer gemeinsamen Drehachse als Drehteil hergestellt werden können. Dadurch können bei minimalem Fertigungs- und Vorrichtungsaufwand sehr enge Lagetoleranzen gewährleistet werden.

image for one monochromatic on-axis point. In particular an off-axis parabolic mirror focuses the incoming light bundle of the pilot ray into an intermediate image plane, which is then imaged by an ellipsoid onto the sensor. The optical design is optimized until it reaches the desired field of view of $37^\circ \times 25^\circ$ with help of a freeform surface. The freeform is described by a Zernike polynomial in Fringe convention. The bandwidth is expanded to 8 to $14\ \mu\text{m}$. As a result, good image quality over the whole field of view with $17\ \mu\text{m}$ pixel pitch is achieved together with an f-number of 1. The real intermediate image allows a compact lens volume of $2\ \text{cm} \times 2\ \text{cm} \times 1\ \text{cm}$. In addition a design with $60^\circ \times 40^\circ$ field of view has been tested successfully.

The design is sustainable for manufacturing with help of ultra-precision milling. Therefore the position of the surfaces is optimized in a way that two neighbored surfaces can be manufactured simultaneously. The design thus supports the calculation of a continuous tool path over the two neighbored surfaces on each side of the monolith. Furthermore the rotational axes of these two surface compounds are aligned and the monolith can therefore be produced as one turning work piece. This novel method significantly reduces the manufacturing expense and efforts of the tooling adjustment.



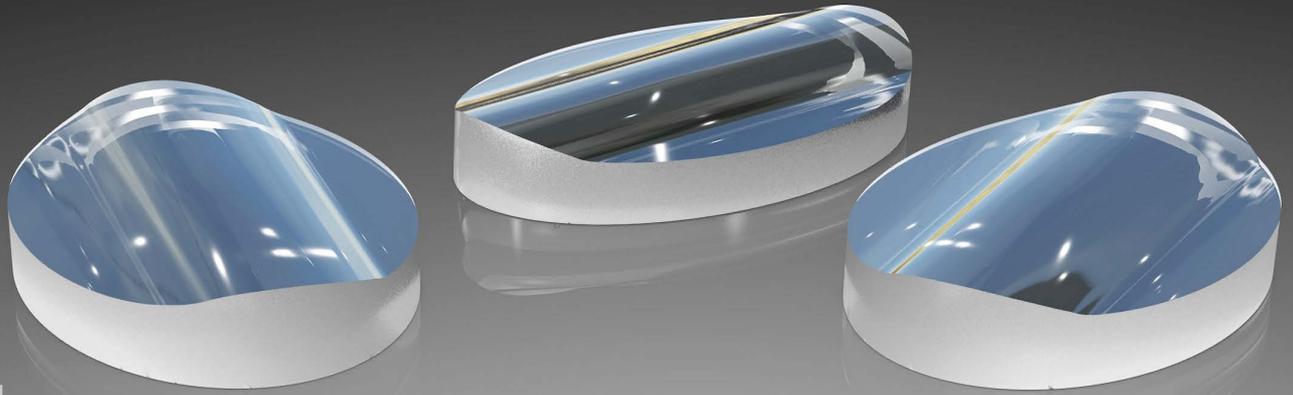
2 *Optisches Design des Monolithen. | Optical Design.*

AUTHORS

Britta Satzer
Matthias Beier
Herbert Gross

CONTACT

Britta Satzer
Phone +49 3641 807-243
britta.satzer@iof.fraunhofer.de



ERZEUGUNG BELIEBIGER BELEUCHTUNGSVERTEILUNGEN GENERATION OF ARBITRARY ILLUMINATION DISTRIBUTIONS

In den vergangenen Jahren hat die Entwicklung von Designalgorithmen zur Berechnung von Freiformflächen großes Interesse geweckt, sowohl für wissenschaftliche als auch industrielle Zwecke. Das Ziel dieser Methoden ist die Berechnung reflektiver sowie refraktiver Flächen, die eine beliebige Intensität in eine gewünschte andere Verteilung überführt.

Trotz der Tatsache, dass zahlreiche Publikationen Algorithmen zur Berechnung von Freiformen behandeln, ist es noch immer schwer, detaillierte bzw. reproduzierbare Algorithmen zu finden, welche die Berechnung von Freiformlinsen und –spiegeln zur Erzeugung komplexer Zielintensitäten erlauben.

Wir haben eine Methode zur Berechnung stetig differenzierbarer Freiformflächen zur Umformung kollimierter Strahlenbündel entwickelt. Sie basiert auf der Zerlegung des Designprozesses in zwei separate Schritte. Zunächst wird ein geeignetes Strahlenmapping mittels der Theorie des optimalen Transports berechnet und anschließend die zugehörige Freiformfläche durch Lösung einer linearen Advektionsgleichung konstruiert. Die Methodik erlaubt es, eine ausgewählte Klasse von Freiformflächen effizient zu berechnen, was eine Anwendung in zahlreichen wissenschaftlichen Bereichen erlaubt.

In recent years the development of fast algorithms for the design of freeform surfaces has attracted a great deal of interest. The goal of these design methods is the calculation of reflective and refractive surfaces, which can transform arbitrary input and output intensities into each other.

Despite there being a vast number of publications on freeform surface design methods for nonimaging applications, it is still hard to find fully detailed algorithms in literature for the calculation of continuous lenses and mirrors, which can generate complex illumination patterns.

We have developed a numerical method for the calculation of continuous freeform surfaces for collimated beam shaping. It is based on splitting the design problem into two separate steps. First, a proper ray mapping is calculated via optimal transport, and in the second step, the freeform surface is constructed by solving a linear advection equation. This provides us with an efficient and easy way to implement the calculation of freeform surfaces, which has a variety of applications such as laser beam shaping for the acceleration of particles, creation of special structured beam profiles for metrology, trapping

1 *Visualisierung mehrerer Freiformlinsen. |*

Visualization of several freeform lenses.

Dazu gehören unter anderem die Laserstrahlformung zur Partikelbeschleunigung, zur Materialbearbeitung, zur Anwendung in der Messtechnik, als auch Anwendungsgebiete wie die effektive Strahlformung im Bereich der Straßenbeleuchtung und der Automobilindustrie.

purposes or laser beam shaping for material machining with high quality cutting edges. Freeform surfaces are also useful in practical areas of incoherent illumination, where an efficient illumination control is desired such as street lighting or the automotive industry; however they are not easy to calculate.



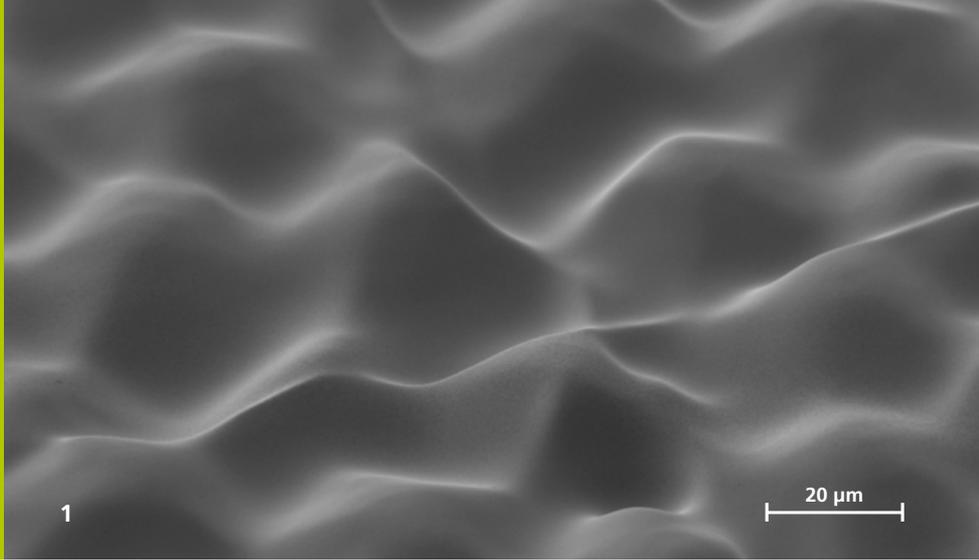
2 *Freiformlinse, welche ein kollimiertes Eingangsstrahlen-bündel auf das Fraunhofer IOF-Logo abbildet. | Surface sag of a lens transforming a collimated input beam into the Fraunhofer IOF Logo.*

AUTHORS

Christoph Bösel
Herbert Gross

CONTACT

Prof. Dr. Herbert Gross
Phone +49 3641 9-47992
herbert.gross@uni-jena.de



DETERMINISTISCHE DIFFRAKTIV-REFRAKTIV-HYBRID DIFFUSOREN DETERMINISTIC REFRACTIVE-DIFFRACTIVE HYBRID DIFFUSORS

Mikrostrukturen spielen beim Lichtmanagement eine große Rolle zum Erreichen von gewünschten Lichtverteilungen. Mikrostrukturierte Diffusoren dienen zur energieeffizienten Homogenisierung einer Lichtquelle und werden für Beleuchtungsanwendungen, beispielsweise Architektur, Lichtdesign, Bildverarbeitung und Messtechnik, Entblendung, LED-Homogenisierung und Strahlformung benötigt.

Deterministische Diffusoren sind optische Elemente, die sowohl refraktive als auch diffraktive Funktionalitäten vereinen. Sie sind in der Lage, die Abstrahlungscharakteristik einer Lichtquelle oder eines Quellarrays hocheffizient zu homogenisieren und gleichzeitig den Ablenkwinkel einzustellen. Somit ermöglichen sie aus einer definierten Quellverteilung die Formung einer bezüglich Winkel und Homogenität maßgeschneiderten Beleuchtung für das nachfolgende optische System oder direkt für die Projektion.

Das Design des Oberflächenprofils erfolgt durch rigorose und wellenoptische Methoden. Dabei berücksichtigt das am Fraunhofer IOF entwickelte Designverfahren sowohl Brechung als auch Beugung an der Mikrostruktur und forciert ein achromatisches Verhalten. Dies ermöglicht den Entwurf und die Modellierung anwendungsspezifisch optimierter Diffusoren, die bei weißen Lichtquellen keine Farbsäume aufweisen.

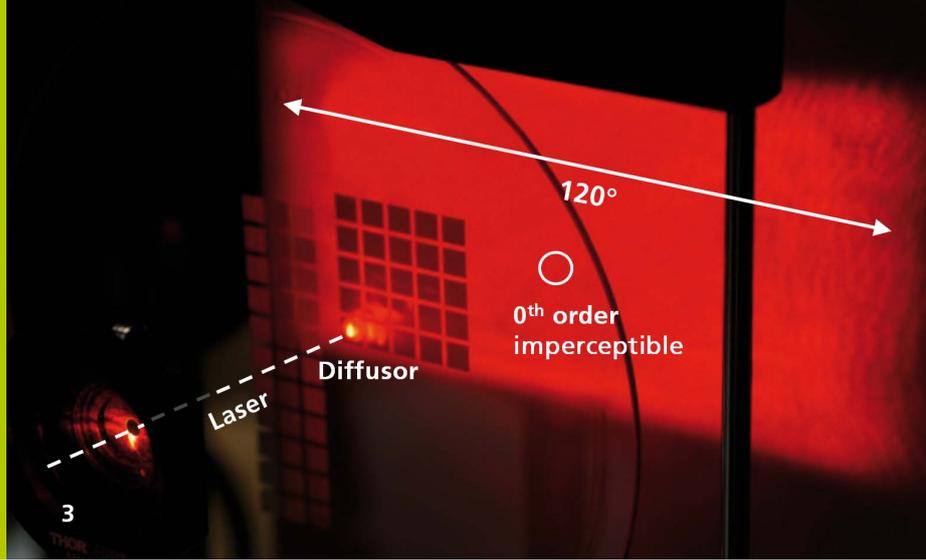
Microstructures play an important role in the light management business aiming for tailored light distributions. Micro-structured diffusers act as energy-efficient homogenization element for diverse light sources and find their application in illumination tasks, such as instrumentation, architectural lighting (interior and exterior), anti-glaring, and beam shaping.

Deterministic diffusers combine refractive and diffractive functionalities and allow for a highly efficient homogenization of the spatial radiation pattern of LED- and LD-sources as well as clusters of them. The transformation of incoming light into a tailored angular distribution enables the realization of predefined, farfield distributions for projection or subsequent optical systems.

The outstanding characteristics of these elements originate from a unique optical design approach considering rigorous and wave-optical methods, which enable custom-designed and optimized diffuser elements. As a benefit, the diffusers exhibit achromatic characteristics thanks to a compensation of diffractive and refractive effects.

Maskless grayscale photolithography is used for the realization of microstructures. The sophisticated patterns with a height

- 1 *Deterministische Mikrostruktur (REM-Aufnahme).* | *Deterministic surface relief structure (SEM image).*
- 2 *Diffusor-Element in Sternform.* | *Star-shape diffuser element.*
- 3 *Rechteck-Diffusor im Laboraufbau.* | *Characterization of a rectangle-shape diffuser in a lab setup.*



Die Herstellung der Elemente erfolgt mittels maskenloser Grautonlithographie. Dabei können die anspruchsvollen Strukturen mit Höhen bis zu 100 µm und steilen Flanken auf Flächen bis zu 450 × 450 mm² hergestellt werden. Die so erzeugten Resiststrukturen können direkt als Master für Replikationstechnologien wie UV-Replikation, Heißprägen und Spritzguss dienen oder durch reaktives Ionenätzen (RIE) in verschiedene Materialien übertragen werden, z. B. Fused Silica, Borofloat, Silizium.

Das Ergebnis sind hochintegrierte mikrooptische Elemente, die mehrere optische Funktionen vereinen (Homogenisierung, Strahlablenkung, spez. Fernfeldverteilung). Dies ermöglicht dem Anwender eine deutliche Materialeinsparung bei gleichzeitig geringer Bautiefe und dennoch höchste optische Effizienz. Die Parameter im Überblick:

- Ausgeleuchteter Vollwinkel bis 120°
- Achromatisches Verhalten
- Hohe Effizienz
- Eliminierung der nullten Beugungsordnung
- Keine Spiegelordnungen
- Spektraler Funktionsbereich UV ... NIR

Die Elemente können auf vorgegebene Formen und Größen zugeschnitten werden, mit einer Entspiegelung bzw. Metallisierung versehen und auf verschiedene Träger montiert werden. Aktuelle Arbeiten betreffen die Umsetzung auf nicht planare Oberflächen. So können in enger Zusammenarbeit von Design und Integration individuelle Lösungen für kundenspezifisch angepasste mikrooptische Elemente auch auf nicht standardisierten oder nicht ebenen Oberflächen realisiert werden.

up to 100 microns and steep sidewalls are applicable on areas up to 450 × 450 mm². On one hand, the resist patterns serve as a master for replication by UV-molding, hot embossing, or injection molding and, on the other, are transferred into the substrate material, e.g. fused silica, borofloat glass, silicon, itself by reactive ion etching (RIE).

As a result, the highly integrated micro-optical elements combine different functionalities, which allows for compact and simplified optical systems having fewer components and increased performance. Characteristics at a glance:

- Full angle up to 120°
- Achromatic behavior
- High efficiency from UV to NIR
- Suppression of zero diffraction order and secondary image

Engineered diffuser elements are available in customized shapes and with optional antireflective coating. Moreover, they are suitable in reflective configuration if a metallic coating has been applied. The current activity includes the implementation on non-planar substrates. Consequently, the close collaboration of design, production, and assembly lead to tailored deterministic diffuser elements even on non-standard surfaces.

AUTHORS

Hans-Christoph Eckstein

CONTACT

Dr. Hans-Christoph Eckstein

Phone +49 3641 807-439

christoph.eckstein@iof.fraunhofer.de



BIOSENSOR FÜR MARKIERUNGSFREIE ANALYSE UND FLUORESCENZSENSORIK

BIOSENSOR COMBINING LABEL-FREE AND FLUORESCENCE ANALYSIS

Optische Sensoren auf der Basis von Bloch-Oberflächenwellen (BSW) an eindimensionalen photonischen Kristallen (1DPC) sind als markierungsfreie Biosensoren eine Alternative zur Oberflächen-Plasmonen-Resonanz Analyse (SPR). BSW haben gegenüber der SPR den Vorteil, dass ihre Dispersion hinsichtlich Wellenlänge, Winkel und Polarisation durch die Schichtdicken des 1DPC eingestellt werden kann. Die Resonanzen sind aufgrund der reduzierten Verluste wesentlich schmäler als SPR Resonanzen, wodurch die Auflösung der Sensoren verbessert werden kann /1/. Zudem wird die Emission bei der Fluoreszenzdetektion nicht durch optische Verluste nahe einer Metallschicht gelöscht /2/.

Biochemische oder diagnostische Anwendungen erfordern gewöhnlich Referenzen, Negativ- und Positivkontrollen und damit mehrere Messungen. Deshalb wurde das optische System für die gleichzeitige, winkelaufgelöste Analyse von 20 Messflächen auf einem spritzgegossenen Polymerchip (Abb. 1) ausgelegt. Der photonische Kristall wurde sowohl für die markierungsfreie Analyse /3/ als auch die Effizienz der Fluoreszenzdetektion optimiert und mittels Plasma Ion Assisted Deposition (PIAD) direkt auf den Kunststoff beschichtet. Während einer Messung wird analog zur SPR die Veränderung der Resonanzposition verfolgt, um kinetische Bindungsdaten abzuleiten. Die Fluoreszenzintensität kann als zusätzliche Endpunktmessung genutzt werden, um das markierungsfrei

Optical sensors exploiting Bloch surface waves (BSW) at the edge of one dimensional photonic crystals (1DPC) have been proposed as an alternative to well-established surface plasmon resonance (SPR) for label-free optical biosensing. In comparison to SPR, a BSW sensor offers the advantage that its dispersion can be tuned almost arbitrarily in wavelength, momentum and polarization by changing the 1DPC materials and geometry. Typically, the BSW resonances are much narrower than the SPR's thanks to the reduced absorption losses, resulting in a possible increase of resolution /1/. Moreover in fluorescence applications the signal intensity does not suffer from quenching in proximity of the metal layer /2/.

Biochemical or diagnostic applications usually require more than one analysis to include references as well as positive and negative controls. Therefore, the optical system has been designed to perform 20 angularly resolved measurements in parallel on an injection molded polymer chip (Fig. 1). The photonic crystal has been optimized for both label-free performance /3/ and fluorescence detection efficiency. It is directly coated onto the polymer chip by means of plasma ion assisted deposition (PIAD). During a measurement, the label-free analysis relies on SPR-like tracking of the resonance position in order to observe kinetic binding data, while surface wave coupled fluorescence emission yields end point data to cross check the label-free result, thus enabling highly sensitive analyses /4/.

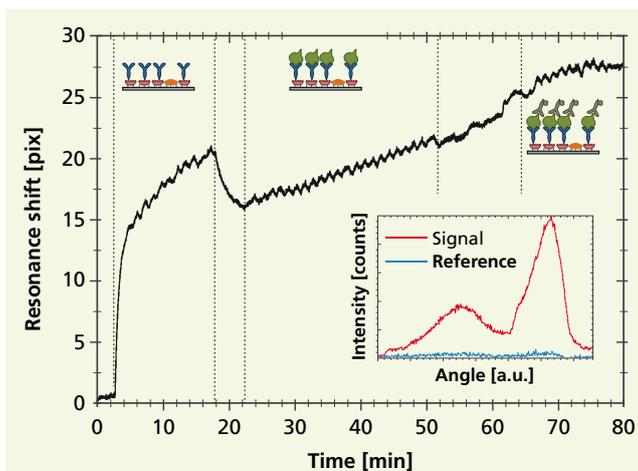
1 Spritzgegossener Chip mit 1D photonischem Kristall. |

Injection molded chip coated with 1D photonic crystal.

gewonnene Ergebnis zu überprüfen und damit sehr sensitive Nachweise zu ermöglichen /4/.

Abbildung 2 zeigt den Nachweis des Wachstumsfaktors Angiopoetin 2 (Ang2) mittels eines Sandwich-Assays aus zwei unterschiedlichen Antikörpern (a-Ang2). Darüber hinaus veranschaulicht Abbildung 2, dass die spektrale Fluoreszenzemission aufgrund der über die Bloch-Wellen gekoppelten Emission dispersiv über den Winkel erfolgt und dadurch zusätzliche spektrale Informationen gewonnen werden können.

Diese Arbeiten wurden von der Europäischen Kommission im Projekt BILOBA gefördert (Grant Agreement 318035).



2 Markierungsfreies Signal eines Ang2 Sandwich-Assays mit anschließender Fluoreszenzmessung (Inset). | Label-free signal of an Ang2 sandwich assay with subsequent fluorescence detection (inset).

Figure 2 illustrates the detection of the growth factor Angiopoetin 2 (Ang2) by means of a sandwich assay using two different antibodies (a-Ang2). The diagram shows that the fluorescence is emitted angularly dispersed due to its surface wave coupled emission, thus enabling additional spectral information to be extracted in future.

This work has been funded by the European Commission through the project BILOBA (Grant Agreement 318035).

References / Literatur

- /1/ Sinibaldi, A. et al.: Direct comparison of the performance of Bloch surface wave and surface plasmon polariton sensors, Sens. Act. B 174 (2012), 292-298.
- /2/ Michelotti, F. et al.: Probing losses of dielectric multilayers by means of Bloch surface waves, Opt. Lett. 38 (2013), 616-618.
- /3/ Rizzo, R. et al.: Optimization of angularly resolved Bloch surface wave biosensors, Opt. Express 22 (2014), 23202-23214.
- /4/ Danz, N. et al.: Biosensing platform combining label-free and labelled analysis using Bloch surface waves, Proc. SPIE 9506 (2015), 95060V.

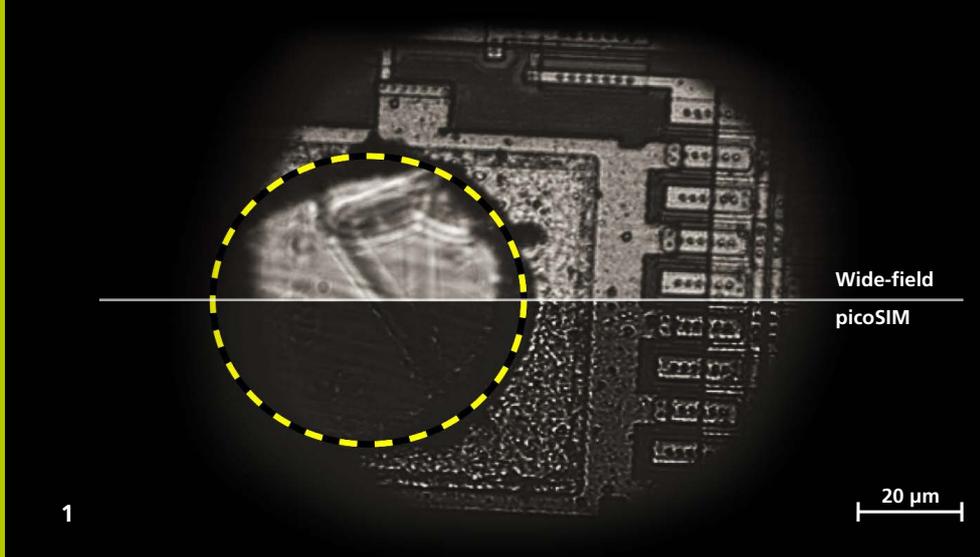
AUTHORS

Norbert Danz
Peter Munzert
Alberto Sinibaldi¹
Francesco Michelotti¹
Rene Heller²

¹Sapienza Università di Roma, Italy
²KDS Radeberger Präzisions-
Formen- und Werkzeugbau

CONTACT

Dr. Norbert Danz
Phone +49 3641 807-750
norbert.danz@iof.fraunhofer.de



NANOGITTER – KÜNSTLICH LOKALE DOPPELBRECHUNG IN GLÄSERN NANOGRATINGS – ARTIFICIAL LOCAL BIREFRINGENCE IN GLASSES

Mittels ultrakurzer Laserpulse können optisch transparente Materialien auf Strukturgrößen kleiner als die Wellenlänge des Lichts bearbeitet und photonische Bauelemente hergestellt werden. Durch Fokussieren ultrakurzer Laserpulse in das Volumen von Glas können selbst-organisierende Strukturen, sogenannte Nanogitter, eingeschrieben werden - diese sind doppelbrechend. Während die Stärke und Orientierung der induzierten Doppelbrechung mit den Laserparametern wie z. B. der Laserpolarisation lokal eingestellt werden kann, können durch Variation dieser Parameter im Scanprozess nahezu beliebige Strukturen im Materialvolumen erzeugt werden. Dies bildet die Grundlage für die Herstellung diverser photonischer Bauelemente z. B. für mikrofluidische Anwendungen, optische Datenspeicherung oder die Erzeugung optischer Vortexstrahlen für die hochauflösende Mikroskopie. Beispielsweise werden nanogitter-basierende Wellenplatten genutzt, um die strukturierte Beleuchtungsmikroskopie zu erweitern (Abb. 1) /1/. Hierbei gelang es durch eine maßgeschneiderte Anordnung der Nanogitter (Abb. 2), die strukturierte Beleuchtungsstrahlung in einer einzigen Aufnahme (polarisationskodiert) zu generieren. Dadurch können nun auch schnell veränderliche Prozesse, wie z. B. bei biologischen Proben, in situ mikroskopiert werden. Neben den vielfältigen Einsatzgebieten ist die Entstehung der Nanogitter bisher

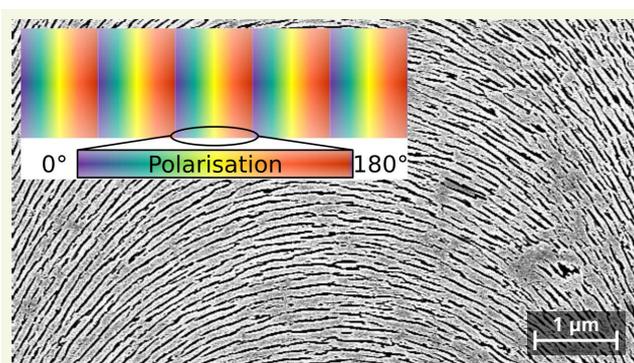
The micromachining of transparent materials with ultrashort laser pulses allows the fabrication of photonic devices with feature sizes smaller than the wavelength of light. By focusing ultrashort laser pulses in the bulk of glasses, self-assembled structures, so-called nanogratings, can be induced. While the amount and direction of the induced birefringence can be set by the laser parameters and polarization orientation, respectively, laser scanning allows the arbitrary arrangement of the structures within the bulk. This facilitates the fabrication of photonic functionalities, ranging from microfluidics, optical data storage to the generation of optical vortex beams for high-resolution microscopy.

In particular, nanograting-based waveplates are used to extend the well-known structured illumination microscopy (SIM; Fig. 1) /1/. Based on the tailored arrangement of nanogratings (Fig. 2), optical sectioning can be performed in a single exposure. Consequently, rapidly changing samples such as biological tissue can be imaged in situ.

Despite the various applications of nanogratings, the fundamental formation process is still not fully understood. One challenging aspect is the non-invasive structural investi-

1 *Vergleich eines Keramik-Chips abgebildet mit herkömmlicher Mikroskopie (oben) und polarisationskodierter strukturierter Beleuchtungsmikroskopie (unten). Letztere reduziert den Anteil unscharfer Beleuchtung (Markierung).* | *Comparison of a ceramic chip imaged with conventional wide-field (upper) and polarisation-coded structured illumination microscopy (lower). The latter significantly reduces the out-of-focus light (marking).*

nicht vollständig verstanden. Insbesondere die nicht-invasive Strukturuntersuchung der im Volumen eingebetteten Nanogitter stellt eine Herausforderung dar. Übliche Methoden basieren auf zeitaufwendigem Polieren und Ätzen eingeschriebener Nanogitter, wobei feine Strukturdetails wie nanometergroße Poren zerstört werden. Diese Herausforderungen konnten mittels Kleinwinkelröntgenstreuung sowie gezieltem Strukturabtrag per fokussiertem Ionenstrahl und gleichzeitiger REM-Abbildung überwunden werden /1/. Letzteres dient der Abbildung der dreidimensionalen Verteilung der nanoporösen Struktur, ohne dabei deren morphologischen Eigenschaften zu verändern. Mittels Kleinwinkelröntgenstreuung können darüber hinaus ohne jegliche Probenpräparation die Strukturgrößen, -formen sowie die gesamte Porenzahl als Funktion der Laserparameter ermittelt werden. Dadurch war es möglich, das Wachstum der Poren sowie deren Anordnung in periodischen Gitterstegen quantitativ zu untersuchen. Auf dieser Grundlage kann der komplexe Entstehungsmechanismus besser verstanden und die induzierte Doppelbrechung insbesondere für nanogitter-basierende photonische Anwendungen optimiert werden /2/.



2 (oben links) Gewünschte Polarisationsverteilung zur strukturierten Beleuchtungsmikroskopie und (unten) REM - Bildausschnitt der implementierten Nanogitterstruktur. | (inset) Desired polarization distribution for polarization encoded optical sectioning microscopy and (lower) SEM micrograph of the inscribed nanograting structure.

gation of the buried material modification. Typical methods are based on time-consuming sample preparation techniques such as polishing and etching which also destroy fine structural details such as nanometric pores.

To overcome these challenges, a combination of small-angle X-ray scattering (SAXS) as well as focused ion beam milling and SEM imaging was used /1/. The latter allows the imaging of the three-dimensional distribution of the nanoporous structure without harming the structural morphology. Moreover, SAXS reveals average feature sizes, shape, and total pore number as a function of the laser parameters without any sample preparation. Thus, the growth of pores and their arrangement in periodic grating planes was comprehensively analyzed. This facilitates a better understanding of the complex physical mechanism of the nanograting formation and allows the further optimization of the induced birefringence for tailored photonic functionalities /2/.

References / Literatur

- /1/ Zimmermann, F. et al.: Ultrashort pulse-induced periodic nanostructures in bulk glass - from fundamentals to applications in high-resolution microscopy, in K. König and A. Ostendorf (Eds.): *Optically Induced Nanostructures: Biomedical and Technical Applications*, De Gruyter (2015), 93-116.
/2/ Zimmermann, F.; Plech, A.; Richter, S.; Tünnermann, A.; Nolte, S.: On the rewriting of ultrashort pulse induced nanogratings, *Optics Letters* 40 (2015), 2049-2052.

AUTHORS

Felix Zimmermann

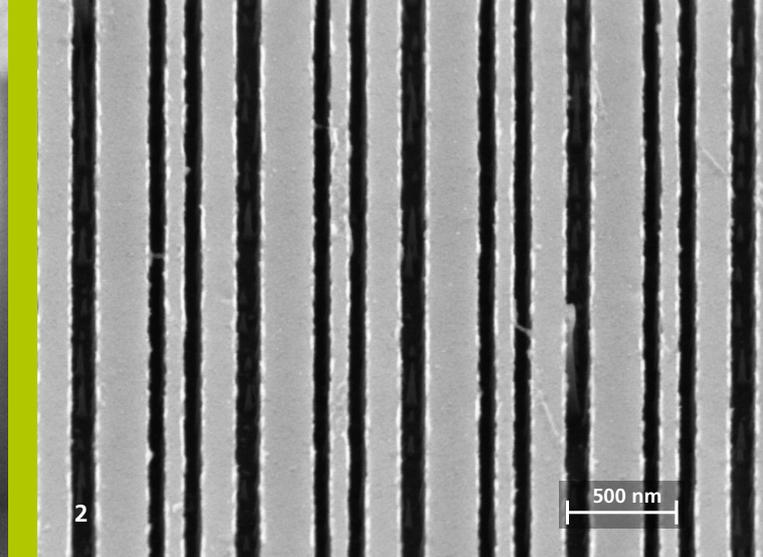
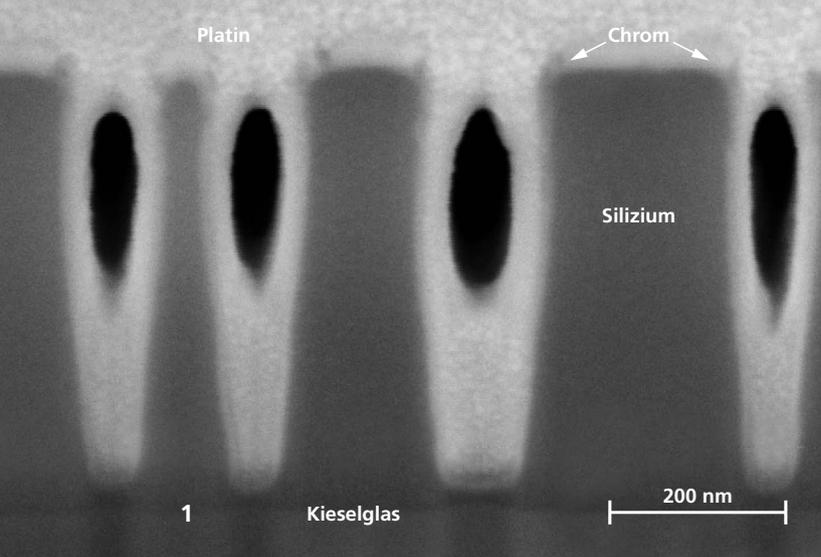
Stefan Nolte

CONTACT

Felix Zimmermann

Phone +49 3641 9-47825

felix.zimmermann@uni-jena.de



ASYMMETRISCHER RICHTUNGSSELEKTIVER FILTER AUF BASIS VON GITTERSTRUKTUREN

ASYMMETRIC DIRECTION SELECTIVE FILTER BASED ON GRATING STRUCTURES

Zur Steigerung der Messgenauigkeit integrierter Messsysteme auf Basis von Halbleiterdetektoren, beispielsweise zur Detektion von Partikeln in Flüssigkeiten oder Gasen, werden neuartige optische Filterelemente benötigt, welche eine asymmetrische vom Einfallswinkel des Lichts abhängige Transmission bereitstellen. Aus der Kombination von Filterelement und Detektor resultieren weitere Anforderungen an die Struktur der funktionalen Schicht. So muss die Herstellung auf wafer-scale integrierbar sein, z. B. mittels lithographischer Prozesse und Materialien, welche mit den Technologien der Halbleiterindustrie kompatibel sind.

Einen neuartigen Ansatz zur Realisierung solcher optischer Filter stellen resonante Gitterstrukturen aus amorphem Silizium dar, welche Gegenstand aktueller Untersuchungen sind. Der resonante Charakter dieser Gitter, mit Perioden in der Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Lichts, in Kombination mit einem sehr großen Kontrast der Brechungsindizes der eingesetzten Materialien ermöglicht solche selektiven Transmissionsfunktionen. Um ein asymmetrisches Verhalten zu erreichen, wird innerhalb jeder Gitterperiode ein effektiver Brechzahlverlauf verwendet, welcher durch beispielsweise drei periodeninterne Gitterstege ansteigender Breite realisiert wird. Durch diesen asymmetrischen Brechzahlverlauf in Verbindung

In order to improve the accuracy of highly integrated sensor assemblies using detectors made of semiconductors, e.g. to detect particles in gases or fluids, novel optical filters that provide an asymmetric transmission behavior concerning the incidence angle are required. Because of the combination of filter element and detector, further requirements regarding structure and material have arisen. These are the possibility for integration on wafer scale, e.g. using lithographic methods, and materials that are compatible with common semiconductor technology.

A novel approach to realizing the desired filter function uses the very special characteristics of resonant waveguide gratings. Their resonance is based on gratings with periods in order of the wave-length of the used light, in combination with high index materials. In order to achieve asymmetric behavior, an effective refraction index gradient inside each grating period is introduced. A possibility for attaining this effective index gradient is the application of three grating ridges with increasing width. Due to this asymmetric layout and a light propagation length of only one period, the required transmission behavior can be reached [1].

For the fabrication, a 500 nm thick layer of amorphous silicon was structured using electron beam lithography and a

1 REM-Aufnahme eines hergestellten Filters (Querschnitt). |

SEM image of a realized filter (cross sectional view).

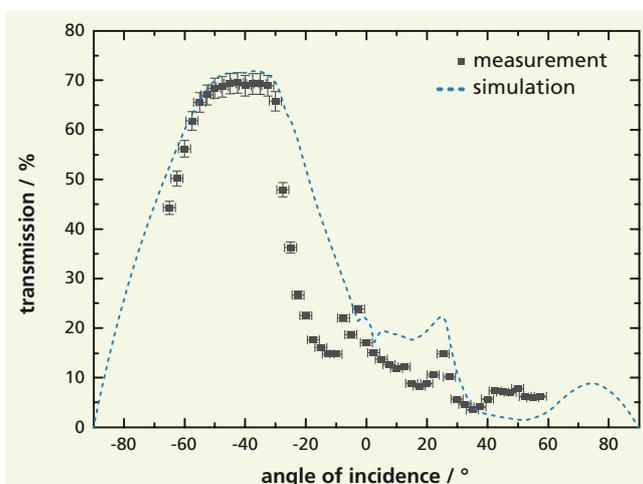
2 REM-Aufnahme eines hergestellten Filters (Draufsicht). |

SEM image of a realized filter (top view).

mit einer Probagationslänge des Lichtes von nur einer Gitterperiode wird dann diese gewünschte asymmetrische Funktion erzielt /1/.

Zur Herstellung einer Beispielprobe wurde eine amorphe Siliziumschicht (500 nm dick) mithilfe der Elektronenstrahlithographie und einer Hartätzmaske aus Chrom strukturiert. Die Gitterperiode (Abb. 1 und 2) beträgt 750 nm, wobei die Stegbreiten 72 nm, 140 nm und 250 nm entsprechen. Reste der Hartätzmaske aus Chrom dienen als absorbierende Metallstrukturen zur Optimierung der richtungsabhängigen Funktion.

Die Charakterisierung einer hergestellten Probe für eine Wellenlänge von 850 nm (Abb. 3) zeigt ein ausgeprägtes asymmetrisches Verhalten mit einer maximalen Transmission von nahezu 70 % für negative Einfallswinkel zwischen -52° und -31° . Im Gegensatz dazu ist die Transmission für positive Einfallswinkel kleiner als 10 %.



3 Vergleich des simulierten und gemessenen Transmissionsverhaltens des Beispielfilters. | Comparison between the simulated and measured transmission characteristic.

chromium etch mask. The grating period of this sample (Fig. 1 and 2) is 750 nm, where the widths of the grating ridges are 72 nm, 140 nm and 250 nm. Optimizing the asymmetric transmission function residues of the chromium etch mask were exploited as absorbing structures.

The measurement of a sample at a wavelength of 850 nm (Fig. 3) exhibits a distinct asymmetric transmission and a maximum of up to 70 % at incidence angles in an interval between -52° and -31° . On the contrary, the transmission for positive angles is below 10 %.

References / Literatur

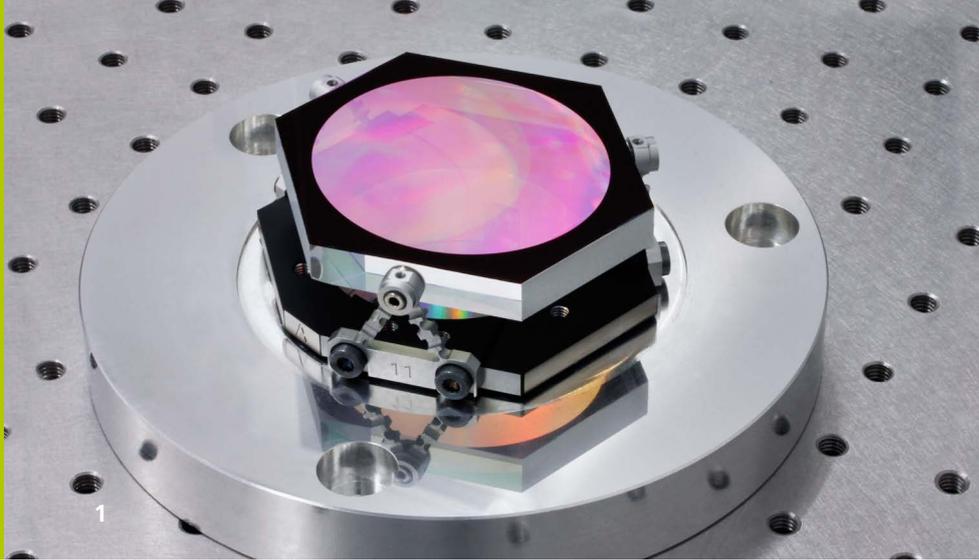
/1/ Fraunhofer IOF, patent 102011084055.9

AUTHOR

Stefan Steiner
Bernhardt Kley

CONTACT

Dr. Ernst-Bernhard Kley
Phone +49 3641 9-47830
ernst-bernhard.kley@uni-jena.de



SENTINEL-4 NIR-GITTERENTWICKLUNG SENTINEL-4 NIR-GRATING DEVELOPMENT

Für die wissenschaftliche Erdbeobachtungsmission Sentinel-4 der europäischen Weltraumorganisation ESA entwickelt das Fraunhofer IOF die Flugmuster des Spektrometergitters inklusive isostatischer Montierung für den NIR-Kanal.

Das dielektrische Reflexionsgitter arbeitet im Spektralbereich zwischen 750 nm und 775 nm. Solche Gitter wurden ursprünglich für die Manipulation ultrakurzer Laserpulse hoher Leistung entwickelt und auf Grund einer Reihe sehr vorteilhafter Eigenschaften im Rahmen des Sentinel-4 Projektes erstmals auf ein reflektives Spektrometergitter für den Einsatz im Weltraum adaptiert. Insbesondere die erforderliche hohe Winkeldispersion in Kombination mit einer notwendigen sehr geringen Polarisationsabhängigkeit der Beugungseffizienz lässt sich mit alternativen Ansätzen auf der Basis metallisch reflektierender Gitter nicht erreichen.

Das Gitter hat eine Periode von 797 nm und wird unter einem Einfallswinkel von 24.5° beleuchtet. Die Gitterstruktur wird mittels Elektronenstrahlolithographie und reaktivem Ionenätzen in die oberste SiO_2 -Schicht eines speziell berechneten $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ -Schichtsystems strukturiert (Abb. 2).

Eine weitere Neuheit ist die direkt auf die Gitterfläche aufgebraute Aperturblende. Diese besteht aus einer sogenannten Schwarzchrom-Schicht, die im gesamten relevanten Spektralbereich eine Reflektivität von deutlich unter 5 % aufweist. Diese Schicht wird ebenfalls lithographisch strukturiert, was eine sehr hohe Positions- und Abmessungsgenauigkeit sicherstellt. Die direkte Integration der Apertur in die

For ESA's scientific earth-observation mission, Sentinel-4, the Fraunhofer IOF is developing the flight hardware of the spectrometer gratings for the NIR-spectral channel including its isostatic mount.

The dielectric reflection grating operates in the spectral band between 750 nm and 775 nm. Such gratings have initially been developed for the manipulation of high-power ultra-short laser pulses. Thanks to a number of advantageous properties, they have now been adapted to space-borne spectrometer gratings for the first time. In particular the required high angular dispersion in combination with an extremely low polarization sensitivity of the diffraction efficiency is not achievable with alternative concepts based on metallic reflection gratings.

The NIR-grating has a period of 797 nm and is illuminated under 24.5° incidence angle. The grating structure is realized by electron-beam lithography in combination with a reactive ion-etching process in the uppermost SiO_2 -layer of a custom designed dielectric $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ -layer stack (Fig. 2).

An additional novelty is the direct integration of the aperture into the grating surface. The aperture is formed by a so-called black-chromium layer which exhibits a reflectivity well below 5 % over the relevant spectral band. This layer is also structured in a lithographic process ensuring very high position- and size-accuracy. The direct integration of the aperture into the grating surface allows for significant

1 **Qualifikationsmodell der Sentinel-4 NIR-Gittereinheit.** |

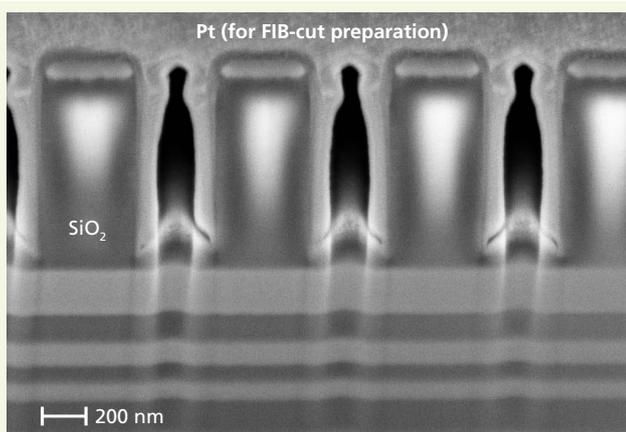
Qualification Model of the Sentinel-4 NIR-grating unit.

Gitteroberfläche ermöglicht eine deutliche Vereinfachung der mechanischen Gittermontierung, da eine separate mechanische Blende entfallen kann.

Das Gittersubstrat wird nach der lithographischen Strukturierung auf eine 8-eckige Kontur gebracht und über Invar-Pins und speziell entwickelte Bipods isostatisch auf einer Grundplatte montiert. Die Montage selbst erfolgt in einer Drei-Koordinaten-Messeinrichtung, um die erforderliche hohe Positionsgenauigkeit von wenigen Mikrometern sicherzustellen. Abbildung 1 zeigt das fertig aufgebaute Qualifikationsmodell der Gittereinheit. Diese wurde im September 2015 an den Projektpartner Airbus DS ausgeliefert.

simplification of the mechanical grating mount, as it avoids the need for a separate mechanical diaphragm.

After the lithographic structuring process, the grating substrate is cut to an octagonal contour and isostatically mounted onto a base-plate via Invar-pins and specially developed bipods. The assembly is performed using a three-coordinate measurement tool to ensure the required positioning accuracy of just a few micrometers. Figure 1 shows the assembled qualification model of the grating unit. It was delivered to the project partner Astrium DS in September 2015.



2 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Schnittes durch die Sentinel-4 NIR-Gitterstruktur. Der mikroskopische Schnitt wurde mittels eines fokussierten Ionenstrahls realisiert. | Scanning-Electron-Microscope image of a cut through the Sentinel-4 NIR-grating structure. The microscopic cut was prepared by a focused ion-beam.

AUTHORS

Uwe D. Zeitner
Andreas Kamm
Tino Benkenstein
Thomas Flügel-Paul
Gilbert Leibelng

CONTACT

Dr. Uwe Detlef Zeitner
Phone +49 3641 807-403
uwe.zeitner@iof.fraunhofer.de



ADAPTIV OPTISCHES SYSTEM FÜR WELT- RAUM-ERDE LASERKOMMUNIKATION ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM FOR EARTH- SPACE LASER COMMUNICATION

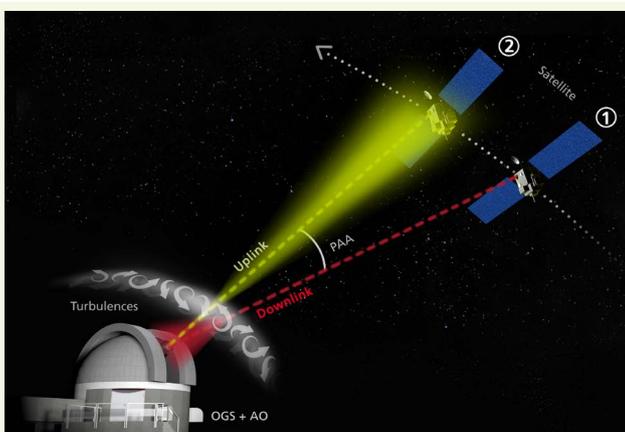
Im Rahmen eines ESA StarTiger-Projektes wurde ein Breadboard entwickelt, um Laserkommunikation mit Unterstützung durch adaptive Optik (AO) zu untersuchen. Abbildung 2 zeigt das untersuchte Szenario zwischen ESAs optischer Bodenstation auf Teneriffa und einem geostationären Laserkommunikationssatelliten. Dieser Satellit emittiert einen Laserstrahl (Downlink), der bis zum Auftreffen auf die Atmosphäre beugungsbegrenzt ist. Erst die atmosphärischen Turbulenzen zwingen dem Downlink Wellenfrontaberrationen auf, die zu Strahlwandern, Strahlverbreiterung und Aberrationen höherer Ordnung führen. In dem vorliegenden Szenario läuft ein weiterer Laserstrahl (Uplink) von der Bodenstation zum Satelliten. Dabei passiert dieser die Atmosphäre vergleichbar zum Downlink, so dass am Satelliten ein verzerrter Strahl eintrifft, der zu einer verschlechterten Effizienz der Kommunikationsverbindung führt. Zusätzlich muss ein Vorhaltewinkel des Uplinks mit berücksichtigt werden. Dessen Ursprung liegt in der endlichen Lichtgeschwindigkeit und der Relativgeschwindigkeit von Bodenstation und Satellit. Die Bodenstation muss auf einen zukünftigen Punkt auf der Satellitentrajektorie zielen, um zu sichern, dass der Uplink das Teleskop des Satelliten trifft. Abbildung 1 zeigt das entwickelte Breadboard welches aus einem deformierbaren Spiegel, einem schnellen Kippspiegel und einem Shack-Hartman Sensor besteht, die geregelt betrieben werden, um Aberrationen zu kompensieren, die von einem geätzten Aberrationsemulator induziert werden.

Within an ESA StarTiger project, a breadboard has been developed which emulates adaptive optics (AO) assisted laser communication between an optical ground station (OGS) and a geostationary satellite. Figure 2 depicts the baseline scenario between ESA's OGS on Tenerife and a laser communication satellite. The satellite emits a laser beam downlink that is diffraction limited until it passes through the atmosphere. Atmospheric turbulences impose wavefront aberrations on the downlink signal leading to beam wander, broadening, and higher-order aberrations. In our scenario the uplink beam travels from the OGS to the satellite, passing through the atmosphere in such an equivalent manner that a distorted beam arrives at the satellite with deteriorated efficiency of the communication link. In addition, a point-ahead angle (PAA) must be considered for the uplink beam due to the finite speed of light and the relative velocity of OGS and satellite. The OGS must point ahead of the satellite trajectory to ensure that the uplink beam hits satellites telescope. Figure 1 depicts the developed AO system assembled from a deformable mirror, tip/tilt mirror and Shack-Hartmann sensor working in a closed loop to compensate for the aberrations caused by an etched aberration emulator. In contrast to the realized systems, this 1 kHz fast AO system uses the downlink to measure atmospheric-like wavefront aberrations and then pre-compensates the uplink beam sent back to the satellite.

1 *Versuchsaufbau zur Vorkompensation von atmosphärischer Turbulenz im Uplink Strahl und zur Untersuchung der Vorhalte-Winkel. | Developed breadboard for proof-of-principle implementation of a pre-compensation for atmospheric turbulence in the uplink beam, and investigation of the point-ahead-angle.*

Im Gegensatz zum Stand der Technik nutzt dieses 1kHz schnelle AO-System den Downlink, um die atmosphärischen Aberrationen zu messen. Auf Basis dieser Daten wird der Uplink, der zum Satelliten läuft, vorkompensiert und das Strehlverhältnis S des Uplinks (als Maß für die Qualität des Strahls) am Satelliten von $S = (4 \pm 4) \%$ ohne Kompensation auf $S = (28 \pm 15) \%$ mit Kompensation und Vorhaltewinkel verbessert.

Innerhalb von nur 9 Monaten entwickelte das Fraunhofer IOF, zusammen mit der TU Ilmenau und der FSU Jena das in Abbildung 2 gezeigte Breadboard mit einem in Echtzeit geregelten AO-System. Damit erfolgt für das beschriebene Szenario ein Machbarkeitsnachweis für effiziente Vorkompensation. Tatsächlich werden in diesem Aufbau Uplink und Downlink kompensiert. Weiterhin ist der Aufbau für 1064 nm und 1550 nm beugungsbegrenzt, um eine Untersuchung dieser beiden typischen Laserkommunikationswellenlängen zu ermöglichen. Daneben kann auch der Einfluss des Vorhaltewinkels auf die Kompensationseffizienz flexibel untersucht werden. Der entwickelte InGaAs-basierte Wellenfrontsensor arbeitet mit beiden Wellenlängen und niedrigsten Lichtintensitäten, um später in der eigentlichen Applikation eingesetzt zu werden.



2 Schema des untersuchten Szenarios. |
Schematics of the baseline scenario.

Accordingly, the uplink beam quality at the receiver, which can be quantified by the Strehl ratio S , is improved from $S = (4 \pm 4) \%$ without compensation to $S = (28 \pm 15) \%$ with compensation and applied PAA.

In the limited time frame of only 9 months, Fraunhofer IOF, together with TU Ilmenau and FSU Jena, developed a breadboard with a real-time closed loop system that emulates the described scenario providing the proof-of-concept for efficient pre-compensation. In fact, uplink and downlink are compensated for in this setup. Further, the setup is diffraction limited at 1064 nm and 1550 nm in order to investigate this two typical laser communication wavelength. Despite the impact of the PAA on the compensation, efficiency may be flexibly studied. The developed InGaAs-based wavefront sensor works for both wavelengths and with the lowest light intensities in order to be integrated in the real application later.

Förderkennzeichen: 4000112766/14/NL/MH



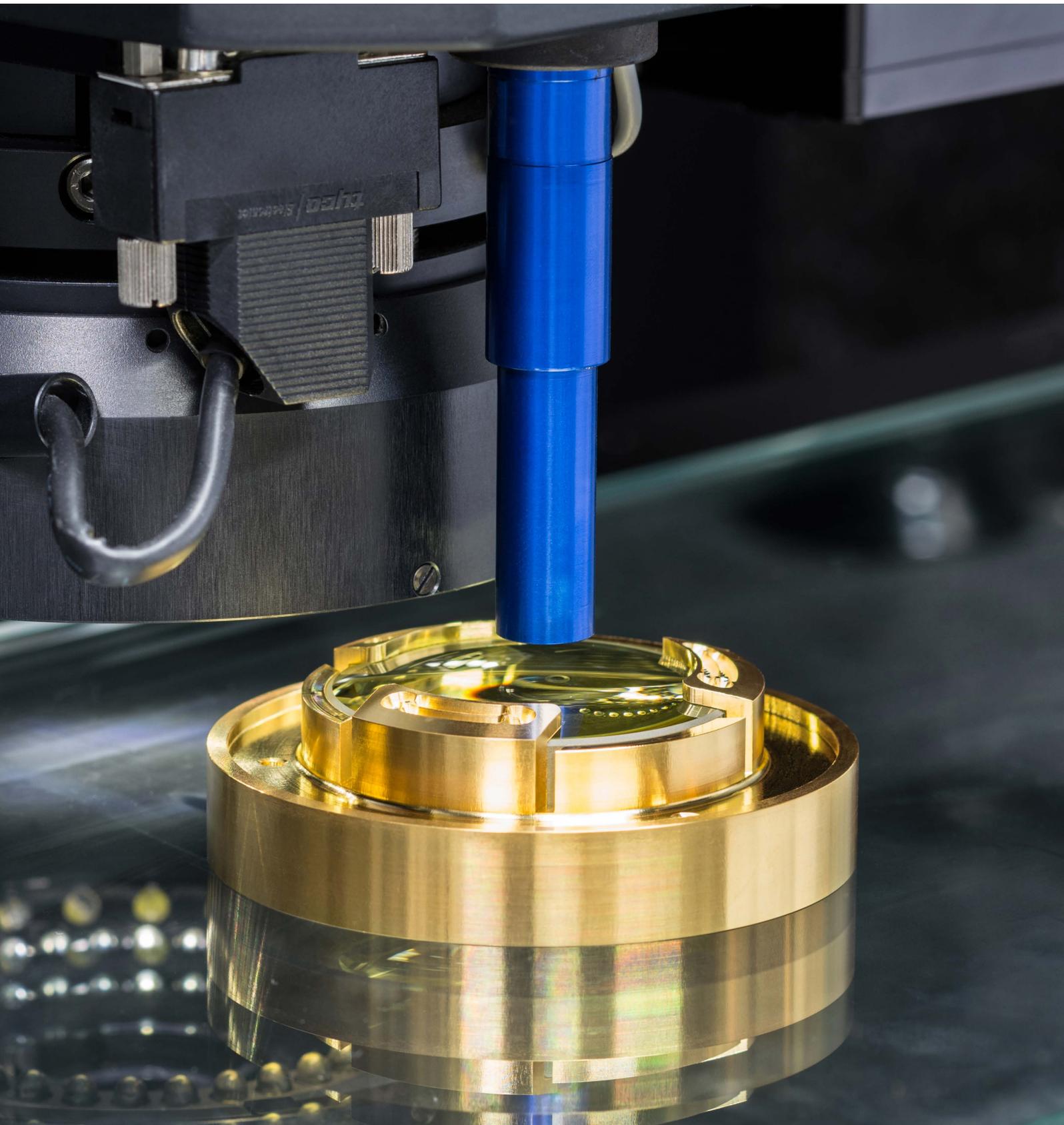
AUTHORS

Claudia Reinlein
Nina Leonhard
René Berlich
Stefano Minardi¹
Alexander Barth²
¹FSU Jena
²TU Ilmenau

CONTACT

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

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



FEINMECHANISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME / PRECISION ENGINEERING COMPONENTS AND SYSTEMS

Die Kombination von Feinmechanik und Optik ist ein strategisches Alleinstellungsmerkmal des Fraunhofer IOF in der deutschen und europäischen Forschungslandschaft und setzt die Tradition Jenas als einen der führenden Optikstandorte fort. Sie erlaubt es dem Fraunhofer IOF, in einem ganzheitlichen Ansatz maßgeschneiderte optische Systemlösungen allerhöchster Präzision für herausfordernde Umgebungen zu entwickeln.

Die Schwerpunkte in diesem Geschäftsfeld sind die Auslegung und Herstellung mechanischer Baugruppen für extreme Anforderungen (z. B. Vakuum, Temperatur, Spannung, Leichtbau), die Entwicklung spezieller Komponenten (z. B. Chucks), die Umsetzung von Fügeverfahren für optische Systeme (z. B. Laserlöten, CO₂-Laserspleißen, SPDT, Drucken), der Aufbau und die Erprobung von Demonstratoren und Prototypen, sowie die Entwicklung von Sondermaschinen und Vorrichtungen (z. B. Justierdrehmaschinen).

Ein herausragendes Beispiel für die Integration dieser Schwerpunkte ist die Entwicklung und Herstellung optomechanischer Komponenten für die Raumfahrt. Dort werden immer höhere Anforderungen an die Integrations- und Fertigungstechnologien gestellt, die nur in einem ganzheitlichen Systemansatz adressierbar sind.

The combination of precision engineering and optics is a unique feature of the Fraunhofer IOF in the German and European research environment and continues the tradition of Jena as a core hub of R&D in photonics. It enables the Fraunhofer IOF to implement a holistic approach for the development of tailored optical systems that have to meet extremely challenging criteria and operate in rough environments.

This business segment focuses on the design and manufacturing of mechanical assemblies that meet extreme requirements (e.g. vacuum, temperature, voltage, lightweight construction), technology development for specific components (e.g. chucks), the implementation of sophisticated connection technologies for optical systems (e.g. laser soldering, CO₂ laser splicing, SPDT, printing), the construction and testing of demonstrators and prototypes, and the development of specialized machines and devices (e.g. adjustment milling machine).

The development of components and systems for air and space applications is among the major challenges for this business segment. It places stringent demands on integration and manufacturing technologies, which can only be met by bundling the Fraunhofer IOF's expertise in simulation, test, and assembly techniques into a single holistic approach.

LEFT Berührungslose Messung einer spannungsarm gefassten Linse. |
Optical metrology of a low-stress mounted optical lens.



SPANNUNGSARM GELÖTETE LINSEN FÜR HOCHLEISTUNGS-OBJEKTIVE LOW-STRESS SOLDERED LENSES FOR HIGH-PERFORMANCE OBJECTIVES

Hochpräzise und langzeitstabil gefügte Linsebaugruppen in metallischen Fassungen stellen Schlüsselkomponenten in Hochleistungs-Objektiven, z. B. für die Erdbeobachtung, dar. Eine spannungsarme Montage ist dabei für minimale Flächendeformationen, geringe spannungsinduzierte Doppelbrechung und somit optimale Abbildungseigenschaften von entscheidender Bedeutung. Die exakte Zentrierung der Linse in der Fassung ist für Tubusoptiken im Füllfassungsprinzip ein Ansatz, um die Komplexität der Systemintegration zu verringern. Um eine hohe Abbildungsgüte zu erzielen, wird durch Justierdrehen die Koaxialität von optischer Achse der Linse und Symmetrieachse der Fassung im Bereich besser 1 μm unabhängig von Montage und Fügeprozess eingestellt ^{1/}.

Durch das laserbasierte Löten wird ein anorganisches, stoffschlüssiges Fügen ermöglicht, bei dem sich das Fügemedium durch vorteilhafte Eigenschaften gegenüber Klebstoffen auszeichnet. Unter speziellen Anwendungsbedingungen, etwa in der Luft- und Raumfahrt, sind die Stabilität bei kurzen Wellenlängen, der Einsatz unter Vakuumbedingungen und bei erhöhten Temperaturen, mit den daraus resultierenden hohen thermomechanischen Beanspruchungen, von Interesse. Der spezielle Laserlötprozess, das Solderjet Bumping, erlaubt es zudem flussmittelfreie, lokalisierte Verbindungen bei minimaler thermischer Beeinflussung zu erzeugen.

Lens assemblies in metal mounts that are highly precise and stable in the long-term are key components for high-performance objectives, e.g. in earth observation instrumentation. Low-stress mounting is important for minimized deformation of optical surfaces, low stress-induced birefringence and, thus, outstanding imaging properties. The accurate centering of the lens within the mount reduces the effort required during system integration using the stack-mounting approach. Adjustment turning allows the optical axis of the lens to be aligned with the mount's axis of symmetry with accuracy better than one micron. This process is completely independent from the joining, allowing both tasks to be optimized separately ^{1/}.

Laser-based soldering enables an inorganic, material bonded joining. The bonding agent exhibits beneficial properties in comparison to organic adhesives. Stability at short wavelengths, and use under vacuum conditions and at elevated temperatures with resulting high thermo-mechanical loads are of interest for particular application cases, e.g. aero-space. Our laser-based Solderjet Bumping allows flux-free processing and localized joining with minimized thermal influence.

We have established an FEA-based optimization of solder and mount geometries, as well as the design of adapted flexure hinges for two types of lens assembly: transmissive

¹ *Spannungsarm gefasste optische Linsen. | Low-stress mounted lenses.*

Ausgehend von einer FEM-basierten Optimierung von Löt- und Fassungsgeometrie und geeignet ausgelegter Festkörpergelenke wurde an zwei Baugruppentypen die Prozesskette der Linsenmontage untersucht. Für Transmissionsoptiken mit einem Durchmesser bis zu 74 mm aus Kieselglas und LAK9G15 (strahlenresistentes Glas) wurden ausdehnungsangepasste Invar- und TiAl6V4-Fassungen realisiert. Nach erfolgreicher thermischer Zyklisierung und Vibrationstests wurden Veränderungen der Flächendeformationen innerhalb der freien Apertur von deutlich unter 100 nm demonstriert. Eine mittlere Zunahme des durch Spannungsdoppelbrechung verursachten optischen Gangunterschiedes von weniger als 3,5 nm konnte erreicht werden /2/, /3/.

Die vorgestellte Technologiekombination von anorganischem, laserbasiertem Fügen mit dem Justierdrehen von Linsenfassungen adressiert neben Anwendungsfeldern mit anspruchsvollen Umweltbedingungen (Luft- und Raumfahrt) auch hochstabile optische Systeme für hohe Laserleistungen (Materialbearbeitung) und kurze Wellenlängen (UV Lithographie).

optics with a diameter of up to 74 mm made from fused silica and LAK9G15 (a radiation resistant glass), and mounts with matched thermal expansion made of Invar and TiAl6V4, respectively. Following thermal cycling and vibrational testing, a change of surface deformation within the clear aperture below 100 nm was achieved. The study showed an average increase of stress-induced optical path difference of less than 3.5 nm /2/, /3/.

Our proposed technology chain of inorganic, laser-based joining, and adjustment turning addresses new and different application fields with demanding environmental conditions (aero-space) and highly stable optical systems for high laser powers (materials processing) and short wavelengths (UV lithography).

References / Literatur

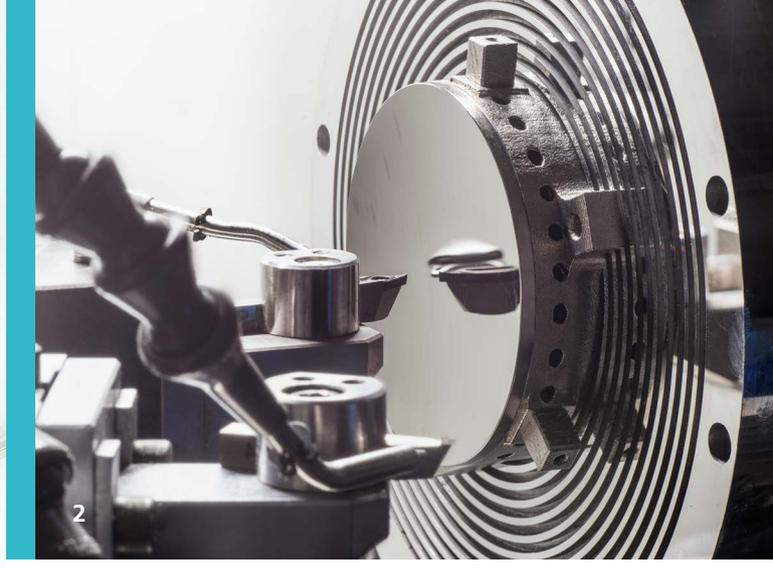
- /1/ Beier, M. et al.: Lens Centering of Aspheres for High-Quality Optics, Adv. Opt. Technol. (2012), 441-446.
- /2/ Burkhardt, T. et al.: Low-strain laser-based solder joining of mounted lenses, Proc. SPIE 9574 (2015).
- /3/ Burkhardt, T. et al.: Optical path difference evaluation of laser-soldered optical components, J. Eur. Opt. Soc.-Rapid 10, 15059 (2015).

AUTHORS

Marcel Hornaff
Thomas Burkhardt
Andreas Kamm

CONTACT

Marcel Hornaff
Phone +49 3641 807-350
marcel.hornaff@iof.fraunhofer.de



LEICHTGEWICHTSSPIEGEL LIGHTWEIGHT MIRRORS

Metallbasierte Leichtgewichtsspiegel sind seit Jahren eine wesentliche Kernkompetenz des Fraunhofer IOF. Die Endfertigung zur optischen Qualität dieser gewichtsreduzierten Aluminiumspiegel erfolgt über ultrapräzise Diamantbearbeitung, gefolgt von Form- und Oberflächenkorrekturtechniken. Diesen Prozessschritten geht eine konventionelle spanende Vorfertigung voraus, in der auch die Gewichtsreduzierung realisiert wird. Traditionell sind dabei die herstellbaren Strukturen von der Zugänglichkeit mit Werkzeugen abhängig, was die Designfreiheit einschränkt. Dies limitiert nicht zuletzt auch den Grad der maximal möglichen Gewichtsreduzierung. Dieser lässt sich nur durch veränderte Technologien oder Prozesse weiter verbessern. Die additive Fertigung bietet hier durch nahezu unbegrenzte Design-Freiheitsgrade ein großes Potenzial. Durch selektives Laserschmelzen werden komplexe Werkstücke schichtweise aus Metallpulver aufgebaut. Ziel des Fraunhofer IOF ist es, die konventionelle Vorfertigung durch diese neue Technologie zu ergänzen. Dabei setzt man bewährte Aluminiumlegierungen ein, welche jedoch noch nicht für den Prozess qualifiziert sind. Aktuelle Studien an einer hypereutektischen Aluminium-Silizium-Legierung zeigen, dass das Stoffsystem additiv verarbeitet werden kann. Durch hohe Abkühlgeschwindigkeiten im Prozess erhält man sehr feinkörnige Gefüge. Die mechanischen Eigenschaften sind vergleichbar oder besser als die konventioneller Legierungen gleicher chemischer Zusammensetzung. Die Porosität der erzeugten Werkstücke bewegt sich dabei unter 0,05 %. Aufgrund der Komplexität des Verfahrens findet eine ständige iterative Optimierung der zahlreichen Prozessparameter statt. Parallel werden neuartige Designs mit deutlich reduziertem Gewicht untersucht. Dabei kommen

Fraunhofer IOF has been manufacturing lightweight metal optics of very high quality for years. Mirrors made of aluminum are processed to optical precision using diamond cutting tools, followed by shape and roughness correction steps. Before the finishing, the mirror substrates are processed by chipping technologies to reduce weight. In general the accessibility of the substrate geometry with tools is limited, which only allows rather simple designs. This also constrains the lightweight factor and can only be improved by changing technologies and processes. Additive manufacturing techniques offer great potential to achieve this as they allow nearly unlimited freedom of design. Selective Laser Melting can generate complex parts slice by slice out of metal powder. Therefore this technology has been added to the manufacturing chain for metal mirrors at Fraunhofer IOF. However, the approved aluminum alloys for metal mirrors are not yet qualified for the additive process, which represents one of the major tasks. Recent studies on a hypereutectic aluminum silicon alloy have shown good applicability of the material to the Selective Laser Melting process. This process generates very high cooling rates while fusing the powder particles, resulting in very fine microstructures. This leads to mechanical properties which are comparable to or better than those of conventional alloys of the same chemical composition. The porosity of the parts is below 0.05 %, measured by X-Ray tomography. Because of the complexity of the technique, the various process parameters are continually tailored to improve part performance.

Further research addresses novel mirror designs with reduced weight. This involves regular cell structures, regular or irregular

1 Metallpulver. | Metal powder.

2 Leichtgewichtsdemonstrator nach UP-Bearbeitung. | Lightweight demonstrator.

unter anderem regelmäßige Zellstrukturen, regelmäßige und unregelmäßige Stabtragwerke, topologisch optimierte Designs und Simulationen von Metallschaum in Betracht (Abb. 3).

Aktuelle Ergebnisse liefern Spiegelmodelle, die bis zu 64 % gewichtsreduziert sind (konventionell sind etwa 40 % möglich). Die Modelle sind dabei konsequent monolithisch ausgelegt und besitzen eine nahezu geschlossene äußere Schale. Dieses Vorgehen gewährleistet eine hohe spezifische Steifigkeit der Designs. Um dies zu prüfen, werden Simulationen durchgeführt, die sowohl Bearbeitungsschritte als auch externe Lasten an den Modellen berücksichtigen.

Die Machbarkeit wurde bereits in einem Demonstrator gezeigt, der durch selektives Laserschmelzen vorgefertigt und durch ultrapräzise Nachbearbeitung zu optischer Qualität vergütet wurde (Abb. 2). Die Verbindung dieser Technologien stellt eine neue Qualität von Metalloptiken in Aussicht.

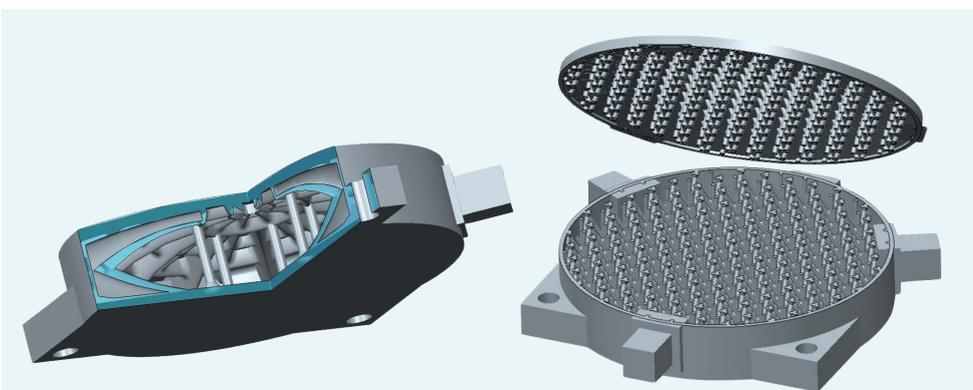
Danksagung: Teile der Ergebnisse wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Rahmen des Projektes ultraLEICHT FKZ 50EE1408 gefördert.

lattices, topology optimized designs, and simulation of metal foam as structural approaches (Fig. 3).

Recent results of mirror designs offer up to 64 % lightweight factor (conventional design is limited to approximately 40 %). The designs mentioned are entirely monolithic and the outer faces remain almost completely closed which ensures excellent specific stiffness. The latter is examined by finite element simulations which take processing constraints and external loads into account.

The feasibility has already been shown by manufacturing a demonstrator mirror, which was selective laser melted and post finished to optical precision (Fig. 2). The connection of these technologies offers a new quality for metal optics.

Acknowledgements: Parts of the presented results were funded by the German Aerospace Center (DLR) within the project ultraLEICHT under grant number 50EE1408.



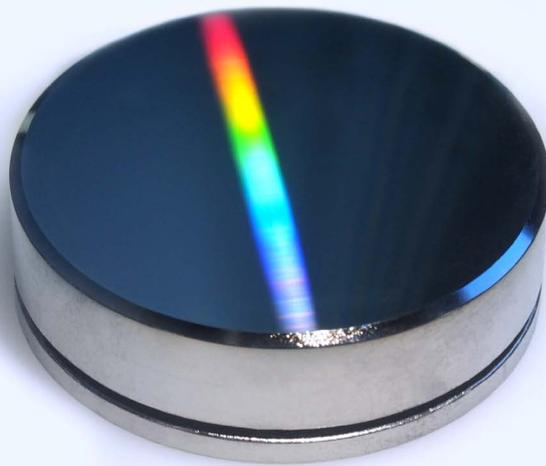
3 Design mit säulenartigen Innenstrukturen zur Stabilisierung (links). Design mit kreuzartig angeordneten Stäben als Innenstruktur (rechts). | Design with column type structure for stabilization (left). Design with cell-type inner structure (right).

AUTHORS

Enrico Hilpert
Johannes Hartung
Nils Heidler
Stefan Risse

CONTACT

Enrico Hilpert
Phone +49 3641 807-330
enrico.hilpert@iof.fraunhofer.de



OPTO-MECHANISCHES DESIGN EINES ABBILDEN- DEN SPEKTROMETERS ZUR ERDBEOBACHTUNG OPTO-MECHANICAL DESIGN OF AN IMAGING SPECTROMETER FOR EARTH OBSERVATION

Abbildende Spektrometer spielen in der Erdbeobachtung eine immer wichtigere Rolle. Im Gegensatz zu herkömmlichen multispektralen Systemen mit i.d.R. weniger als zehn spektralen Kanälen können sie wesentlich detailliertere spektrale Informationen liefern. Diese dienen z. B. zur Charakterisierung des Wachstumszustands der Vegetation oder zur Unterscheidung von Mineralien im Boden.

Im Rahmen des Projektes »DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer (DESI)« entwickelt das Fraunhofer IOF im Auftrag der DLR das optische System für ein abbildendes Spektrometer zur Erdbeobachtung. Dieses soll ab 2017 auf der MUSES-Plattform der ISS installiert werden. Bei einer räumlichen Auflösung von 30 m sollen 235 spektrale Kanäle im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1.000 nm zur Verfügung gestellt werden. Das optische System umfasst ein anastigmatisches Drei-Spiegel-Teleskop (Three-Mirror-Anastigmat: TMA), das den beobachteten Streifen der Erdoberfläche auf einen Spalt abbildet. Darauf folgt das eigentliche, abbildende Spektrometer, das den Spalt auf einen Detektor abbildet. Gleichzeitig erfolgt dabei die spektrale Zerlegung mittels eines Reflektionsgitters. Das komplette optische System wird als metallbasierte Spiegeloptik mittels Einkorn-Diamant-Bearbeitung (Single-Point-Diamond Turning: SPDT) realisiert. Da der genutzte Wellenlängenbereich im Sichtbaren liegt, erfolgen danach eine Nickelbeschichtung und ein weiterer SPDT-Bearbeitungsschritt. Mittels Magneto-rheologischem Finishing (MRF) werden schließlich Form und Rauheit

Imaging spectrometers are set to become increasingly important for earth observation. In contrast to conventional multispectral systems with typically 10 channels or below, imaging spectrometers deliver much more detailed spectral information. This can be used to characterize the status of growth or health of vegetation, or to distinguish between different mineral constituents of the soil, for example. In the framework of the DESIS project (”DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer“), Fraunhofer IOF is developing and realizing the optical system of an imaging spectrometer for earth observation. The DESIS instrument is intended for the installation on the MUSES platform of the International Space Station in 2017. It will deliver images of the earth with a spatial resolution of 30 m on ground in 235 spectral channels in the wavelength range of 400 nm to 1 μ m.

The optical system has two primary components: a Three-Mirror-Anastigmat (TMA) telescope forms an image of the strip on the ground under observation on a slit. The following spectrometer reimages the slit onto the detector and performs the spectral separation using a reflective grating. The whole optical system is realized using metal-based mirrors. The mirror surfaces are made by Single-Point-Diamond Turning (SPDT). As the spectral range is in the visible, a post-processing of the surfaces by Nickel plating is necessary. The final surface shape and roughness are realized by a second SPDT step and subsequent Magneto-Rheological Finishing.

der Spiegelflächen in den letztlich benötigten Qualitätsbereich gebracht. Für das TMA wird die im Rahmen früherer Projekte entwickelte Duolith-Technologie eingesetzt, die eine deutlich vereinfachte Justage des optischen Systems erlaubt.

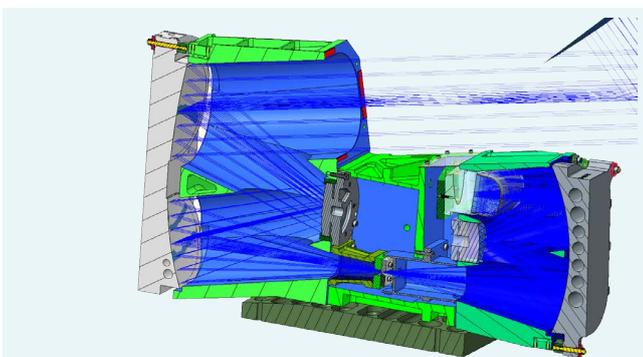
Das Spektrometer baut auf dem sogenannten Offner-Design auf. Allerdings kann die benötigte Abbildungsqualität bei der gewünschten spektralen Auflösung nur durch den Einsatz eines Freiform-Spiegels erreicht werden. Weiterhin erfordert das optische Design des Spektrometers ein Beugungsgitter auf einer gekrümmten Fläche. Hierzu werden am Fraunhofer IOF Strukturierungstechnologien entwickelt, die ein solches Gitter mittels SPDT oder – alternativ – durch Laserlithographie realisieren können. Der mechanische Aufbau verwendet Gehäuse in Leichtbauweise, die den Strahlengang umschließen und gleichzeitig zur Streulichtunterdrückung dienen. Montage- und Referenzflächen an den Gehäuseteilen werden mittels SPDT ebenfalls in hoher Präzision gefertigt. Über kinematische Halteelemente werden die Spiegelmodule an den entsprechenden Montageflächen befestigt.

Im Ergebnis wird ein sehr steifer Aufbau des optischen Systems realisiert, der den hohen Anforderungen eines Weltraumeinsatzes genügt.

The design of the TMA relies on Duolith-technology developed in previous projects. It allows for a significantly simplified adjustment of the optical system.

The spectrometer was designed on the basis of the so-called Offner scheme. Nevertheless, the introduction of a freeform mirror was necessary in order to provide good imaging quality in combination with the required spectral resolution. The optical design relies on a grating on top of a curved surface. Fraunhofer IOF develops appropriate technologies for structuring curved surfaces. The grating may be fabricated either by SPDT or, alternatively, by laser lithography. The mechanical design uses light-weight housing elements that wrap the optical path in order to suppress stray light. To provide a high precision, the housing elements carry reference and mounting features made by SPDT as well. Isostatic mounts are used to fix the mirror modules on the respective mounting points.

This approach provides a stiff mechanical setup of the system, which is compatible with the harsh requirements of a space flight.



2 *Schnittbild des DESIS-Systems. |*
Sectional image of the DESIS system.

AUTHORS

Thomas Peschel
Christoph Damm
Andreas Gebhardt
Stefan Risse

CONTACT

Dr. Thomas Peschel
Phone +49 3641 807-335
thomas.peschel@iof.fraunhofer.de

**GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD**



FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN UND SCHICHTEN

FUNCTIONAL SURFACES AND LAYERS

Das Fraunhofer IOF entwickelt funktionalisierte optische Oberflächen und multifunktionale optische Schichtsysteme auf allen wesentlichen optischen Materialien, wie Kunststoff, Glas, Keramik, Halbleitern und Metall, und für alle Bereiche des optischen Spektrums vom Röntgen/EUV bis zum IR. Dabei werden vielfältige Anwendungen mit hohem Innovationspotenzial abgedeckt: von der optischen Übertragungsfunktion in Strahlquellen und Kommunikationssystemen bis zu Anwendungen in der Medizin, in der industriellen Fertigung oder Umwelttechnik bis hin zur photovoltaischen oder thermischen Energieerzeugung. Dabei wird der gesamte Prozess von Design, Herstellung bis hin zur Analyse und Charakterisierung auf Weltspitzenniveau abgedeckt.

Das Fraunhofer IOF ist weltweit führend in der Entwicklung innovativer Entspiegelungen und reflektiver Hochleistungsoptiken für die industrielle Lithografie bei extrem kurzen Wellenlängen. Es ist dank seiner einzigartigen Ausstattung in der Lage, extreme Anforderungen in Bezug auf Substrate, Gradienten, spektrale Eigenschaften und Umweltbedingungen zu erfüllen.

The Fraunhofer IOF develops highly functionalized optical surfaces and multifunctional optical layer systems on all major classes of optical materials, such as glass, ceramics, polymers, semiconductors, and metals for the full range of the optical spectrum from X-Ray/EUV to IR. It covers a large range of highly innovative applications ranging from the design of optical transfer functions in beam sources and communication systems, to applications in medicine, manufacturing, conservation, photovoltaics, and thermal energy production. It covers the entire technological cycle of design, manufacturing and analysis on a global level of excellence.

The Fraunhofer IOF is a world leader in the development of innovative anti-reflective structures and reflective high-end optics for industrial lithography application at extremely short wavelengths. Owing to its unique set of equipment, it is able to fulfill extreme requirements with respect to substrates, gradients, spectral properties and environmental stability.

LEFT Vorbereitung einer Beschichtung zur Oberflächen-Hydrophobierung. | *Coating process for hydrophobic surfaces.*



VIBRATIONSBASIERTE KONTAKTWINKELANALYSE VIBRATION BASED CONTACT ANGLE ANALYSIS

Die Benetzungseigenschaften funktionaler Oberflächen sind für eine Vielzahl von Anwendungen, wie etwa hydro- oder oleophobe Oberflächen, Anti-Beschlag-Beschichtungen sowie Druckverfahren von entscheidender Bedeutung. Hierfür sind anspruchsvolle Methoden der Kontaktwinkel-(KW)-Analyse erforderlich. Insbesondere haben Rauheit und chemische Heterogenität realer Oberflächen ein großes Spektrum an metastabilen KW zur Folge, welche über diskrete Energiebarrieren voneinander getrennt sind (Abb. 3). Eine zweckmäßige und bewährte Methode zur Erfassung dieses Spektrums besteht in der Bestimmung der Fortschreite-(ACA)- und Rückzugs-(RCA)-KW. In der Praxis entsprechen diese dem höchsten und niedrigsten KW, für den ein lokales Energieminimum in der Gibbs-Energie-Kurve existiert.

Aus thermodynamischer Sicht ist hingegen der KW des globalen Minimums am bedeutendsten. Dieser stabilste KW (MSCA) ist im Gegensatz zu ACA und RCA eng mit der spezifischen Oberflächenenergie des Festkörpers verbunden. Die entsprechende experimentelle Erfassung des MSCA ist jedoch nach wie vor problematisch.

Am Fraunhofer IOF wurde nun eine Methodik entwickelt, die den stabilsten KW über die Vibration von liegenden Tropfen, beginnend beim ACA und RCA, bestimmt. Unter Verwen-

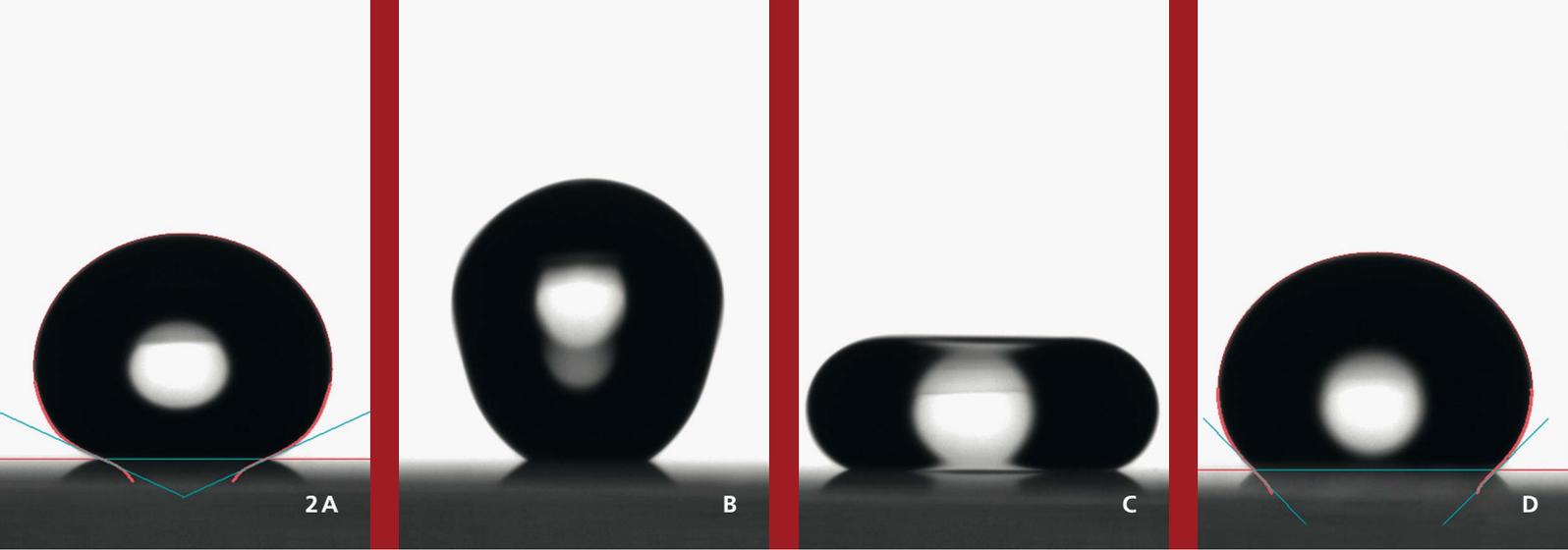
The wetting properties of functional surfaces are crucial for many applications such as hydro- or oleophobic surfaces, anti-fog coatings, and printing processes. This requires sophisticated contact angle (CA) analysis methods. For real surfaces, however, roughness and chemical heterogeneity lead to a wide range of metastable apparent CAs, which are separated from each other by discrete energy barriers (Fig. 3). A useful and well established method to cover this spectrum of observable CAs involves determining the advancing CA (ACA) and the receding CA (RCA). In practice, these CAs are the highest and the lowest CAs with a local energy minimum in the Gibbs energy curve.

However, the thermodynamically most meaningful CA is that which occurs when the system reaches its global minimum. In contrast to ACA and RCA, this most stable CA (MSCA) is closely related to the surface free energy of the solid. Yet appropriate experimental investigation of the MSCA still constitutes a challenge as the energy barriers around the global minimum in the free energy curve are commonly high.

Fraunhofer IOF has thus developed a methodology to determine the MSCA using mechanical vibration of sessile drops starting from the metastable ACA and RCA states. Using a commercial CA measurement system, we have built a specific

1 *Aufbau zur vibrationsbasierten KW-Messung. | Vibration based CA measurement setup.*

2 *KW vor der Vibration (a), während der Vibration (b, c) und nach Erreichen des stabilsten KW (d). | CA before vibration (a), during vibration (b, c) and after reaching MSCA (d).*

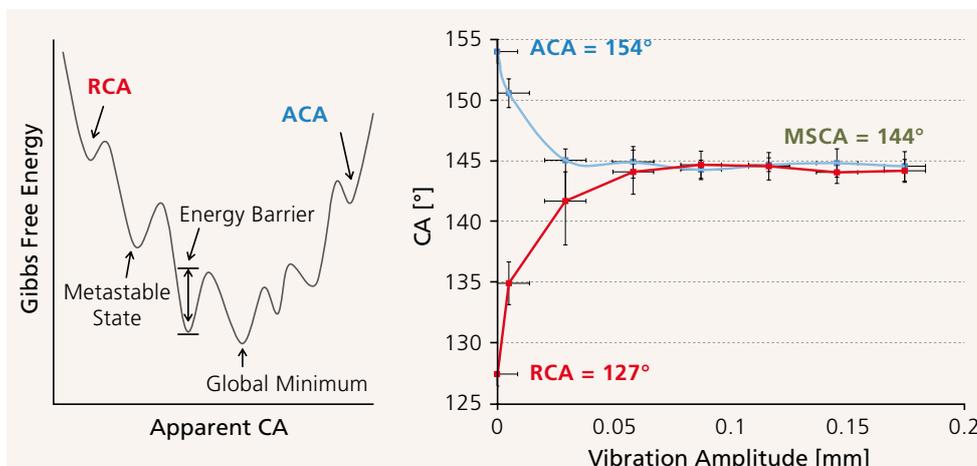


derung eines kommerziell erwerblichen KW-Messsystems wurde ein spezieller Aufbau errichtet, bei dem der Flüssigkeitstropfen mit einem frequenzmodulierten sinusförmigen Signal in Vibration versetzt wird. Ausgehend vom ACA (z. B. 154°) bzw. RCA (z. B. 127°) werden die Energiebarrieren zwischen den metastabilen Zuständen über eine schrittweise Erhöhung der Vibrationsamplitude überwunden (Abb. 3 rechts). Der KW, der nach weiterer Erhöhung der Amplitude unverändert bleibt (z. B. 144°), wird schließlich als MSCA definiert.

Dieser neuartige Ansatz wurde an hydrophoben Schichten mit abgestuften Nanorauheiten verifiziert. Unter Anwendung von adäquaten Zusammenhängen für Grenzflächenspannungen kann der experimentell ermittelte MSCA für die Berechnung der Festkörperoberflächenenergie genutzt werden. Diese stellt einen wichtigen Parameter für die Analyse, das Verständnis und die Anpassung des Benetzungsverhaltens von unterschiedlichsten fest-flüssig Systemen in Forschung und Industrie dar.

setup where the liquid drop is vibrated with a frequency modulated sine wave signal. As shown in Figure 3 right, starting at the ACA (e.g. 154°) or RCA (e.g. 127°) the vertical vibration amplitude is gradually increased to overcome the individual energy barriers between the metastable states. The MSCA is finally the CA that remains unchanged after further increase of the vibration amplitude (e.g. 144°).

This novel strategy was validated by investigations of hydrophobic coatings with graded nanoroughness. Using appropriate relationships for interfacial tensions, the experimentally determined MSCA can be used to calculate the surface free energy of the solid surface, which is a main parameter for analyzing, understanding, and finally tailoring the wetting behavior of various solid-liquid systems in research and industry.



3 Gibbs-Energie-Funktion einer realen Festkörperoberfläche (links). KW als Funktion der Vibrationsamplitude (rechts). | Gibbs free energy function of a real solid surface (left). CA as a function of the vibration amplitude (right).

AUTHORS

Nadja Felde
 Daniel Nebule Gurevich¹
 Angela Duparré
¹Technion – Israel
 Institute of Technology

CONTACT

Dr. Angela Duparré
 Phone +49 3641 807-216
 angela.duparre@iof.fraunhofer.de



SCHICHTEN FÜR DIE BREITBAND- ENTSPIEGELUNG OPTISCHER LINSEN BROADBAND ANTIREFLECTION COATINGS FOR OPTICAL LENSES

Die Verminderung von Reflexionen in optischen Systemen ist einer der wichtigsten Aufgaben optischer Schichten. Die Reflexion an Oberflächen ist die Ursache für eine Intensitätsabnahme des transmittierten Lichtes und verursacht Geisterbilder und Streulicht in optischen Systemen. Um diese Verluste zu reduzieren, werden typischerweise mehrlagige Interferenzschichtsysteme für die Entspiegelung aufgebracht. Ein alternativer Ansatz ist die Verwendung von Sub-Wellenlängenstrukturen. Geeignete Nanostrukturen können auf organischen Materialien durch das Plasmaätzen der Oberfläche erzeugt werden. Neue Kombinationen solcher Strukturen mit Interferenzschichtsystemen wurden im BMBF-Verbundprojekt FIONA /1/ für die breitbandige Entspiegelung optischer Linsen weiterentwickelt.

Die Entspiegelung von stark gekrümmten Linsen stellt noch immer eine Herausforderung dar. Im Vakuum aufgedampfte Schichten sind in den stark geneigten Randbereichen der Linse generell dünner. Dadurch werden die Reflexionsspektren der Schichtsysteme in diesen Bereichen verstimmt und zu kürzeren Wellenlängen verschoben. In Folge dessen kann die Restreflexion im visuellen Spektralbereich deutlich erhöht sein. Um ein hinreichend gutes Entspiegelungsergebnis im visuellen Spektralbereich über die gesamte Linse zu gewährleisten, müsste der Spektralbereich der Entspiegelungsschicht bis in den nahen Infrarotbereich verbreitert werden.

Reducing the reflected light in optical systems is a basic aim of photonics. Reflected light causes losses in the intensity of transmitted light and can generate ghost images and stray light. To reduce these aberrations, antireflection (AR) interference multilayers are typically used. The application of sub-wavelength structures represents an alternative approach. Suitable nanostructures can be produced via plasma etching on surfaces consisting of organic materials. The combination of interference coatings with nanostructured layers has been further developed within the scope of the BMBF joint project FIONA /1/.

The application of AR coatings on the surface of strongly curved lenses is a challenge. Vapor deposited layers are generally thinner on inclined areas. As a consequence, the reflectance spectrum in the inclined regions is shifted to shorter wavelengths which can increase the reflectance in the visible spectral range. To ensure sufficient performance in this range on inclined surfaces, the spectral range of an AR coating can be extended to include the near infrared region, thus enabling coverage of the visible range over the entire lens.

To achieve broadband AR performance, several coatings comprising inorganic layers and organic nanostructures have been developed /2/. One of the newly developed broadband

1 *Stark gekrümmte Linse mit halbseitiger Entspiegelung.* |

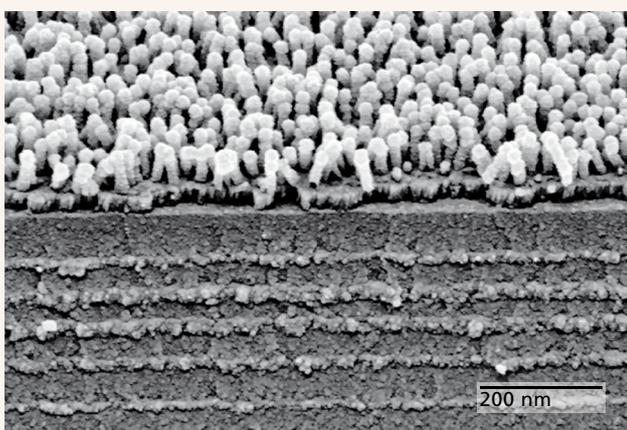
A strongly curved glass lens, half-side AR-coated.

Für eine breitbandige Entspiegelung sind verschiedene Schichtsysteme geeignet, die neben anorganischen Schichten auch organische Nanostrukturen enthalten /2/. Eines der neuentwickelten Schichtdesigns besteht aus alternierenden hoch- und niedrigbrechenden Schichten und einer plasmageätzten nanostrukturierten Organikschicht (s. REM-Aufnahme in Abb.2). Eine solche Entspiegelungsschicht erscheint auf Linsen auch bei größerer Krümmung farbneutral, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die in dem Spektralbereich von 400 bis 1500 nm erreichte mittlere Restreflexion kleiner als 0.3% ist mit klassischen anorganischen Interferenzschichten kaum erreichbar /3/.

designs consists of alternating high-index and low-index layers accomplished by a plasma-etched nanostructured organic layer (see scanning electron micrograph Fig. 2). A coated lens is shown in Figure 1. A residual average reflectance below 0.3 % was achieved in the spectral range from 400 nm to 1500 nm, which is significantly lower than that achievable with classical interference systems.

References / Literatur

- /1/ BMBF, FKZ 13N12160.
/2/ U. Schulz, F. Rickelt, H. Ludwig, P. Munzert, and N. Kaiser, Gradient index antireflection coatings on glass containing plasma-etched organic layers, *Opt. Mater. Express* 5 1259–1265 (2015).
/3/ U. Schulz, <http://spie.org/newsroom/technical-articles/6093-broadband-antireflection-coatings-for-optical-lenses>, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201509.006093 (2015).



2 REM-Aufnahme eines Interferenzschichtsystems mit einer nanostrukturierten organischen Schicht als Deckschicht. | Scanning electron micrograph of interference stack with nanostructured organic layer as the top layer.

AUTHORS

Ulrike Schulz
Friedrich Rickelt
Peter Munzert
Christiane Weber

CONTACT

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



ATOMLAGENABSCHIEDUNG VON ANTIREFLEXBESCHICHTUNGEN ATOMIC LAYER DEPOSITION OF ANTIREFLECTION COATINGS

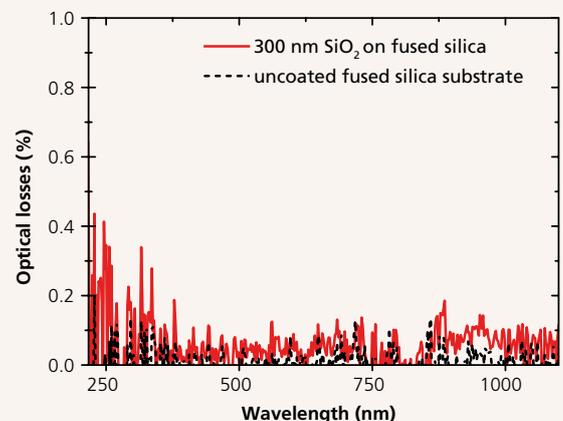
Die Abscheidung strukturtreuer Schichten mit präziser Schichtdicke spielt eine entscheidende Rolle bei der Herstellung hochwertiger optischer Systeme. Konventionelle Technologien, wie Verdampfung und Sputtertechniken, eignen sich zur Abscheidung von Schichten auf ebenen Oberflächen. Auf gekrümmten Oberflächen erzeugen diese Verfahren jedoch eine ungleichmäßige Schichtdickenverteilung, folglich wird die Funktion optischer Schichtsysteme verfälscht.

Unser Ziel ist, das Verfahren der Atomlagenabscheidung (ALD) als eine alternative Methode einzusetzen, um den hochgradigen Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der einzelnen Schichten auch auf gekrümmten Linsen gerecht zu werden und Schichtdicken optischer Schichtsysteme ohne aufwendiges in situ Monitoring kontrollieren zu können. ALD ist ein chemisches Beschichtungsverfahren, welches auf zyklisch ablaufenden selbst-begrenzenden Oberflächenreaktionen basiert. Der Hauptvorteil liegt in der Fähigkeit, konforme Schichten auf strukturierten Oberflächen mit hohen Aspektverhältnissen aufbringen zu können. Die Dicke der abzuschheidenden Schicht wird exakt durch die Anzahl der ALD-Zyklen definiert. Die Schichten weisen eine hohe laterale Uniformität und geringe Rauigkeit auf.

1 Gleichmäßige Al_2O_3 -Beschichtung (ca. 100 nm) auf einem 6 Zoll Siliziumwafer, hergestellt mittels Atomlagenabscheidung (ALD). | Uniform Al_2O_3 thin film (ca. 100 nm) on an 6 inch silicon wafer, processed using atomic layer deposition (ALD).

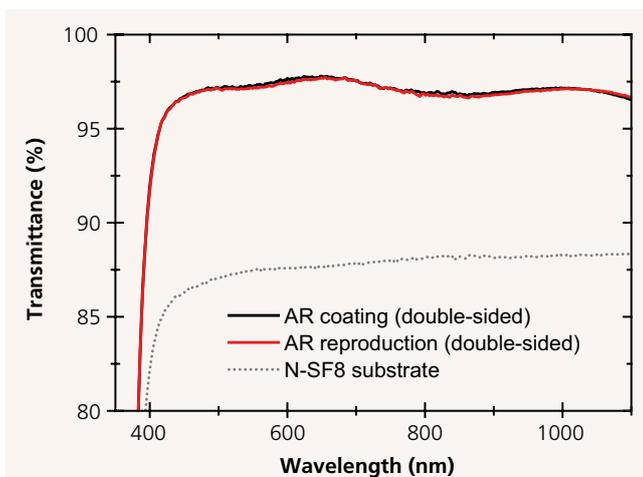
The deposition of conformal coatings with a precise thickness is crucial for the production of high quality optical thin film stacks. Conventional techniques such as physical vapor deposition (PVD) are suitable for the deposition of thin films on plane surfaces. However, with PVD a non-uniform thickness is generated on curved surfaces, leading to distortions of the optical function of thin film stacks.

We are establishing atomic layer deposition (ALD) as an alternate method of meeting the high requirements on the thickness uniformity of the single layers and also on highly curved lenses and to control the thickness of optical film stacks without in situ monitoring.



2 Absorptionsarme SiO_2 -Beschichtung auf einem Quarzglas-Substrat. | Low-loss SiO_2 coating on fused silica substrate.

Mit den entwickelten ALD-Prozessen für die Materialien Al_2O_3 , TiO_2 , HfO_2 und SiO_2 werden hohe Reproduzierbarkeiten und ein zur Schichtdickenkontrolle nötiges lineares Schichtwachstum erzielt. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Schichten nur sehr geringe Absorptionsverluste (Abb. 2) bis in den unteren Wellenlängenbereich von etwa 200 nm (SiO_2 , Al_2O_3), 260 nm (HfO_2) und 400 nm (TiO_2) aufweisen. Durch laserkalorimetrische Messungen ($\lambda=1064$ nm) von jeweils 300 nm dicken Schichten auf Quarzsubstraten wurden Absorptionswerte von lediglich 5,4 ppm (TiO_2), 3,3 ppm (Al_2O_3) und 3,9 ppm (SiO_2) ermittelt, wobei das Substrat bereits eine Absorption von 2,3 ppm aufweist. Unter Verwendung der Materialien SiO_2 und HfO_2 wurde eine Antireflexbeschichtung im Wellenlängenbereich von 390 nm bis 1100 nm hergestellt (Abb. 3). Die gewünschte Schichtdicke der Einzelschichten wurde allein durch Anzahl der ALD-Zyklen bestimmt. In weiteren Experimenten sollen optische Elemente wie z. B. dichroitische Spiegel und Schmalbandfilter mittels Atomlagenabscheidung realisiert werden.



3 Gemessene Transmissionen zweier Proben einer doppel-seitigen Antireflexbeschichtung auf einem NSF8 Substrat. | Measured transmittance of a double-sided broadband antireflection coating on two NSF8 substrates.

ALD is a deposition method that is based on cyclic self-limiting surface reactions. The main advantage is its capability to deposit conformal coatings on structured surfaces with high aspect ratios. The film thickness is defined exactly by the number of ALD cycles. The deposited layers have a high lateral uniformity and low roughness.

With the developed ALD processes for Al_2O_3 , TiO_2 , HfO_2 , and SiO_2 , we achieve a high reproducibility and a linear growth rate that is necessary for precise thickness control. Our results show that atomic layer deposited films exhibit only little absorption losses (Fig. 2) down to a spectral range of 200 nm (SiO_2 , Al_2O_3), 260 nm (HfO_2), and 400 nm (TiO_2). Laser calorimetric measurements ($\lambda=1064$ nm) of 300 nm films on quartz substrates revealed low absorption values of only 5.4 ppm (TiO_2), 3.3 ppm (Al_2O_3), and 3.9 ppm (SiO_2), whereas the substrate itself has losses of about 2.3 ppm. Using the materials SiO_2 and HfO_2 , we demonstrated a broadband antireflection coating for the spectral range of 390 nm to 1100 nm (Fig. 3). The thicknesses of the single layers are just controlled by the number of ALD cycles. In further experiments other optical elements such as dichroic mirrors and narrow bandpass filters will be realized.

Literatur / References

/1/ Pfeiffer, K.; Shestaeva, S.; Bingel, et al.: Comparative study of SiO_2 thin films for optical applications. Opt. Mater. Express, 6, 660-670 (2016).

AUTHORS

Kristin Pfeiffer
Svetlana Shestaeva
Astrid Bingel
Peter Munzert
Adriana Szeghalmi

CONTACT

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

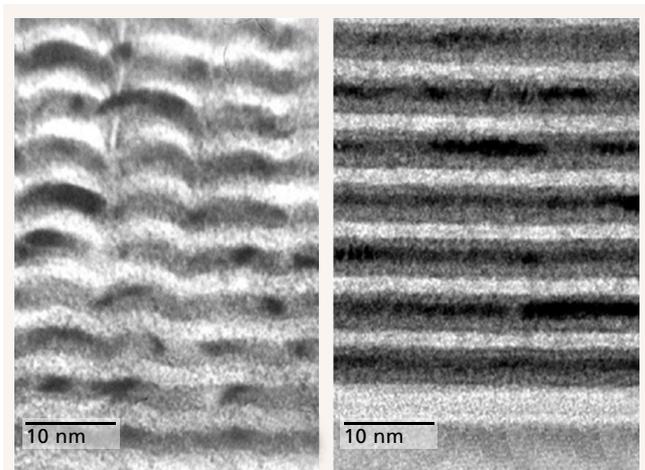


HOCHREFLEKTIERENDE XUV-MULTILAYER-SPIEGEL HIGH-REFLECTIVE XUV MULTILAYER MIRRORS

Das Bestreben die Anforderung und die Auflösung optischer Systeme immer weiter zu verbessern, hat die Suche nach technologischen Innovationen und Verbesserungen immer weiter vorangetrieben. Von diesem Ziel angeregt, hat sich die Optikentwicklung in den letzten Jahren hauptsächlich auf die Nutzung von immer kürzeren Wellenlängen λ konzentriert. Die guten Erfolgsaussichten der extrem-ultravioletten Strahlung (XUV), die in einer neuen Lithographiegeneration ($\lambda = 13,5$ nm und $\lambda = 6,7$ nm), zur Mikroskopie im »Wasserfenster« ($\lambda = 2,4 - 4,4$ nm), in der Astronomie ($\lambda = 15 - 100$ nm), zur Spektroskopie, Plasmadiagnostik und Laserforschung eingesetzt werden kann, hat zur Entwicklung und zur deutlichen Verbesserung von verschiedenen Quellen und reflektierenden Optiken geführt /1/.

Vor allem in den letzten Jahren sind in der Entwicklung hochreflektierender Multilayer-Spiegel für den XUV-Spektralbereich am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF große Fortschritte gemacht worden. Dies hängt mit dem tiefgründigen Verständnis der Schichtwachstumsmechanismen im Multilayer, der Anwendung neuer Ansätze zur Unterdrückung der Grenzflächendefekte und der intensiven Entwicklung moderner Beschichtungstechnologien zusammen (Abb. 1). Die Reflexionseigenschaften von XUV-Multilayer-Spiegeln hängen direkt von der Struktur der Grenzflächen ab. Durch Interdiffusion verbreiterte und raue Grenzflächen (Abb. 2) verringern die Reflektivität drastisch /2/. Daher erfordert die Verbesserung der optischen Eigenschaften ein vollständiges Unterdrücken bzw. eine weitestgehende Verringerung der Diffusionsprozesse an den Grenzflächen,

Demand to enhance optical resolution in photolithography, microscopy, and spectroscopy has pushed forward the search for technological innovations and improvements. Thanks mainly to this aim, optics development in recent years has focused on components for electromagnetic radiation with increasingly shorter wavelengths λ . The good prospects of success of extreme ultraviolet radiation (XUV) and soft X-rays to be applied in next generation lithography systems ($\lambda = 13.5$ nm and $\lambda = 6.7$ nm), microscopy in the "water window" ($\lambda = 2.4 - 4.4$ nm), astronomy ($\lambda = 15 - 100$ nm), spectroscopy, plasma diagnostics, and laser research have led to considerable progress in the development of different sources and reflective optics for this spectral range /1/. Over the last few years, remarkable progress has been made in the development and improvement of high-reflectance



2 Grenzflächenrauigkeit (links) und Interdiffusion (rechts) in Mo/Si Multilayern. | Interface roughness (left) and interface diffusion intermixing (right) in Mo/Si multilayers.

1 Magnetron-Sputteranlage NESSY-3. |

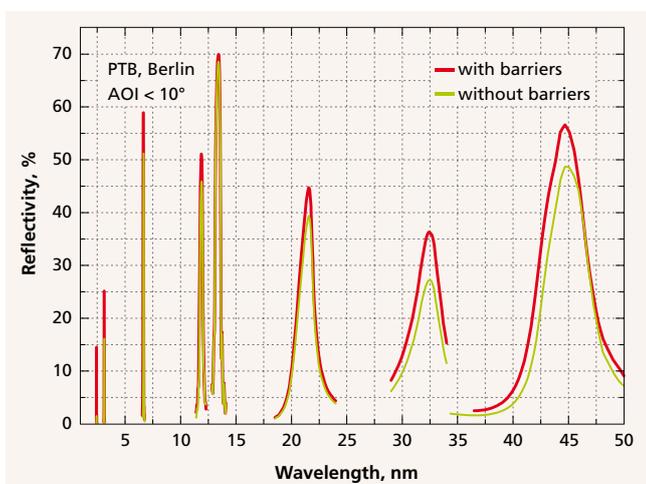
Magnetron sputtering system NESSY-3.

was durch die Einführung extrem dünner Diffusionsbarrieren zwischen den Schichten erreicht werden kann. Dies führt zu einem Übergang des simplen binären Multilayers zu einem »Interface-engineered« Multilayer-Design. Diese optisch verbesserten XUV-Multilayer-Spiegel (Abb. 3), die mit der modernen Beschichtungsanlage Nussy 3 (Abb. 1) auch auf gekrümmten Substraten mit lateralem Dickengradienten abgeschieden werden können, erfüllen die derzeitigen Anforderungen in den verschiedenen Anwendungsbereichen.

Danksagung: Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung dieser FuE-Arbeit beim BMBF (16N12256K) und der Fraunhofer-Gesellschaft (Projekt-Nr. 826480).

Literatur / References

- /1/ Yulin, S.: Multilayer Coatings for EUV/Soft X-ray Mirrors, in N. Kaiser and H. Pulker (Eds.): Optical Interference Coatings, Springer Series in Photonics (2003), 281-307.
/2/ Yulin, S.: Multilayers interface coatings for EUV, in B. Wu and A. Kumar (Eds.): Extreme ultraviolet lithography, McGraw-Hill (2009).



3 Erhöhte Reflektivität der Multilayer-Spiegel durch den Einsatz von Barrierschichten. | Enhanced reflectivity of multilayer mirrors due to application of barriers.

multilayer mirrors for the XUV spectral region at Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF. This progress is associated with the thorough understanding of the multilayer growth mechanisms, application of novel interface-engineered technologies for minimization of interface defects in multilayer stacks, and intensive development of modern deposition techniques (Fig. 1). The reflective properties of XUV multilayer mirrors are directly correlated to the structure of the interfaces; broadening of the interfaces due to interdiffusion processes and roughness development (Fig. 2) significantly reduces the reflectivity /2/. For that reason, the improvement of optical performance requires the complete suppression, or at least the reduction of interdiffusion processes on interfaces. This could be accomplished by the introduction of super-thin diffusion barriers between layers leading to a transition from traditional binary to an interface-engineered multilayer design. These leading edge optically enhanced XUV multilayer mirrors (Fig. 3) deposited on curved substrates by a modern deposition system Nussy 3 (Fig. 1) with lateral gradient are believed to satisfy today's demands in various application fields.

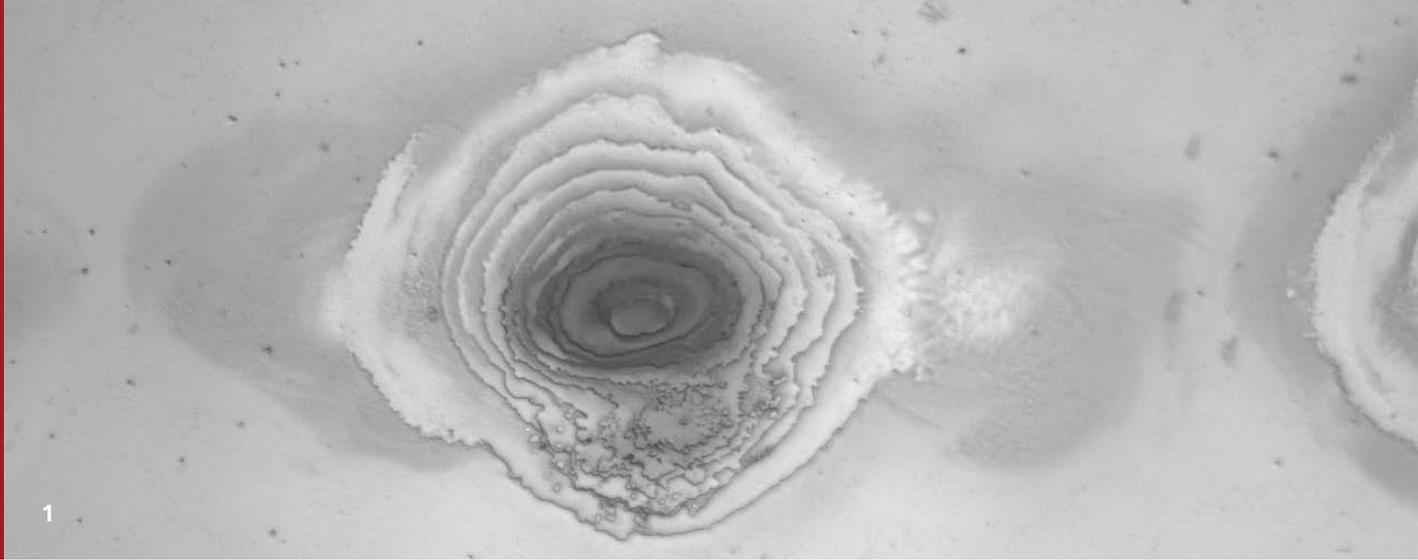
Acknowledgments: The authors acknowledge the financial support for this R&D work by BMBF (16N12256K) and the Fraunhofer-Gesellschaft (Projekt-Nr. 826480).

AUTHORS

Sergiy Yulin
Philipp Naujok
Norbert Kaiser

CONTACT

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



SPEKTRALE LASERZERSTÖR- SCHWELLENMESSUNG

SPECTRAL LASER INDUCED DAMAGE MEASUREMENT

Laserinduzierte Beschädigungen sind der begrenzende Faktor für die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer optischer High-Power-Systeme. Die Laserfestigkeit der optischen Komponenten ist dabei nicht nur durch die intrinsische Absorption der eingesetzten Materialien begrenzt. Vielmehr spielen auch die Feldstärkeverteilung in Schichtsystemen sowie extrinsische Faktoren wie Defekte und Kontaminationen eine bedeutende Rolle /1/. All diese Effekte ziehen eine starke Wellenlängenabhängigkeit der laserinduzierten Zerstörschwelle (LIDT) nach sich.

Eine neue Methode zur spektral aufgelösten LIDT-Messung wurde daher in ein System zur hochsensitiven winkelaufgelösten Streulichtmessung (ARS) integriert /2/. Das System basiert auf einem Nanosekunden-Laser mit einem Durchstimmbereich von 225 nm bis 1750 nm. Durch Fokussierung auf die Probe können Fluenzen von bis zu 10^3 J/cm^2 erreicht werden. Die Kombination von LIDT-Messung mit in situ ARS-Analyse liefert wertvolle Informationen über Veränderungen der strukturellen und optischen Eigenschaften schon während der Bestrahlung selbst vor der endgültigen Beschädigung.

Erste experimentelle Untersuchungen an Aluminiumschichten zeigten einen generellen Anstieg der LIDT mit der Wellenlänge

Laser induced damage is the limiting factor for the performance and lifetime of high-power optical systems. The laser stability of optical components is not only limited by the intrinsic absorption of the materials involved, but also strongly influenced by the field distribution, particularly for coatings, as well as extrinsic factors such as defects and contaminations /1/. These factors result in a strong wavelength dependence of the laser induced damage threshold (LIDT).

A new method for spectral LIDT testing has been implemented and combined with an instrument for highly sensitive angle resolved light scattering (ARS) measurements /2/. The instrument is based on a nanosecond laser source with a tuning range from 225 nm to 1750 nm. By focusing on the sample, fluences of up to 10^3 J/cm^2 can be achieved. The combination of LIDT testing with in situ highly sensitive ARS analysis provides additional information about changes in the structural and material properties during irradiation, even before the onset of fatal damage.

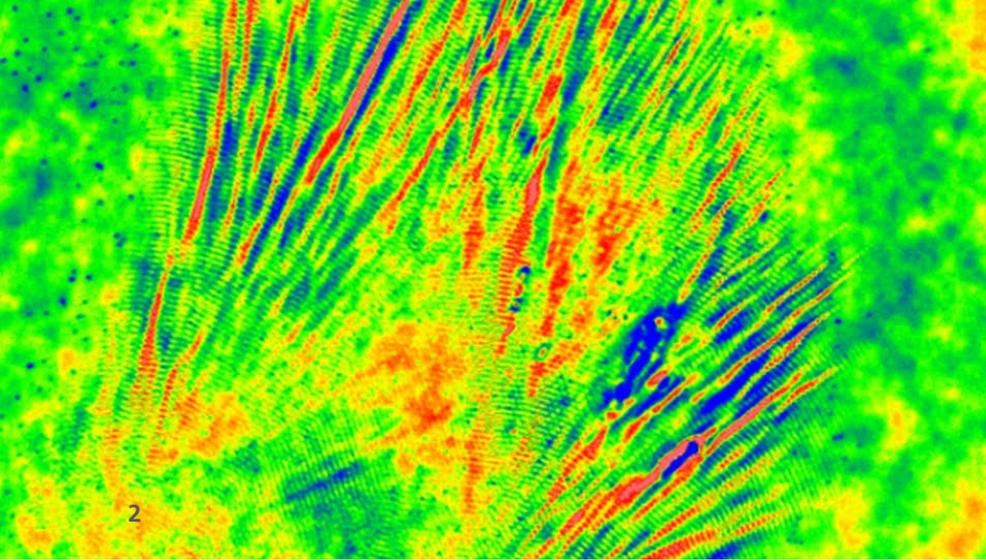
First experimental studies of aluminum coatings revealed a general linear increase in the LIDT with increasing wavelength, as well as a significant dip in the LIDT around 800 nm. These effects, which are linked to the spectral absorption properties,

1 *Laserinduzierter Schaden (Nomarski-Kontrast) einer dielektrischen Schicht (NIR-Kantenfilter, 650 nm, 15 J/cm²). |*

Laser induced damage (Nomarski microscopy) of dielectric coating (NIR edge filter, 650 nm, 15 J/cm²).

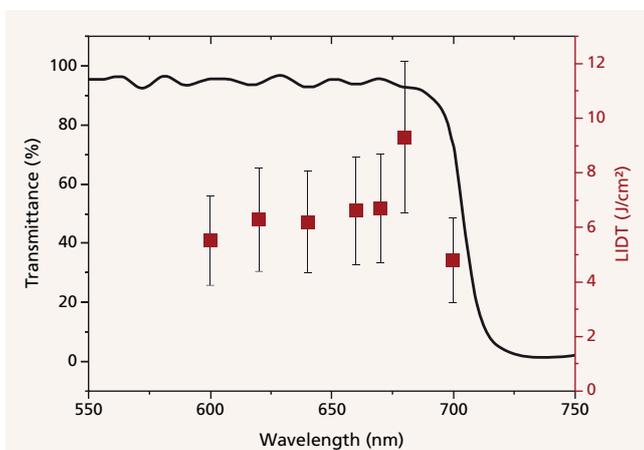
2 *Laserinduzierter Schaden (Weißlichtinterferometrie) einer Aluminiumschicht (1000 nm, 0.1 J/cm²). |*

Laser induced damage (White Light Interferometry) of aluminum coating (1000 nm, 0.1 J/cm²).



sowie zusätzlich einen signifikanten Einbruch um 800 nm. Solche Effekte, die mit den spektralen Absorptionseigenschaften verknüpft sind, werden oft ignoriert wenn LIDT-Daten bei einzelnen Wellenlängen und vereinfachte Skalierungsregeln verwendet werden. Im Gegensatz zu Bulkmaterialien ist die Laserfestigkeit dielektrischer Schichten stark von der Feldstärkeverteilung im System abhängig. Tatsächlich zeigen die Ergebnisse spektraler LIDT-Tests an einem NIR-Kantenfilter (Abb. 3) drastische Änderungen der Zerstörschwelle vor allem um die Bandkante.

Die Implementierung der LIDT-Methode in das Streulichtmesssystem ermöglicht besondere Synergieeffekte. Streulicht ist sensitiv bezüglich sowohl Grenzflächenrauheiten als auch der Feldstärkeverteilung und ermöglicht dadurch die Monitorierung struktureller und dielektrischer Eigenschaften während der Bestrahlung. Überdies ermöglichen Streulicht-Mappings vor der Bestrahlung die Lokalisierung von Inhomogenitäten und Defekten und anschließend gezielte Zerstörungsschwellenuntersuchungen an solchen Imperfektionen.



3 Spektrale LIDT an einem NIR-Kantenfilter. |
Spectral LIDT of near-infrared edge filter.

are usually ignored when referencing LIDT data at single wavelengths and combining with over-simplistic wavelength scaling laws. In contrast to bulk materials, the damage properties of dielectric coatings are strongly dependent on the field distribution inside the layer structure. In fact, the results of spectral LIDT tests of a near-infrared edge filter shown in Fig. 3 reveal dramatic changes of the LIDT notably near the band edge.

The combination of LIDT and ARS allows for an interesting synergy. Because of the sensitivity of scattered light to both interface roughness and the field distribution, ARS can be used to monitor changes of both structural and dielectric properties during irradiation. Moreover, scatter maps before and after LIDT testing can be used to study the effects of localized inhomogeneities and defects on the LIDT by identifying such features and testing at these specific locations.

References / Literatur

- /1/ Schröder, S.; Duparré, A.: Measurement of light scattering, transmittance, and reflectance, in D. Ristau (Ed.): Laser-induced Damage in Optical Materials, Taylor & Francis (2013), 213 – 246.
- /2/ Schröder, S.; Trost, M.; Garrick, M.; Duparré, A.: Origins of light scattering from thin film coatings, Thin solid films 592, Part B (2015), 248–255.

AUTHORS

Sven Schröder
Méabh Garrick
Marcus Trost
Steffen Wilbrandt
Angela Duparré

CONTACT

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

**GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD**



PHOTONISCHE SENSOREN UND MESSSYSTEME / PHOTONIC SENSORS AND MEASURING SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF entwickelt optische und optoelektronische Mess- und Sensorsysteme. Die Forschungsarbeiten umfassen neuartige Messmethoden, Sensorprinzipien, Auswertungsverfahren sowie Systemlösungen. Dazu nutzt das Fraunhofer IOF modernste optische und miniaturisierte bzw. mikrooptische Komponenten sowie Sende- und Empfangseinheiten (flache und bidirektionale Sensoren), Projektionstechniken (Arrayprojektion, LCoS, OLED) und Lichtquellen (Femtosekunden-Laser, LEDs), in Verbindung mit integrierten Datenverarbeitungssystemen.

Einen Schwerpunkt bilden Muster- und Streifenprojektions-3D-Messsysteme, die auf Basis von fs-Lasern, THz-Detektoren und CT-Systemen zu tomografischen Messverfahren erweitert werden. Systeme zur Schicht- und Oberflächencharakterisierung, darunter Streulichtmesssysteme zur Rauheitsbestimmung, Mikro- und Nanostrukturvermessung oder Defektdetektion und Schichtcharakterisierung bilden einen zweiten Schwerpunkt. Auf Basis bioinspirierter Facettenoptiken entwickelt das Fraunhofer IOF zudem revolutionär kompakte Kameras und Mikroskope.

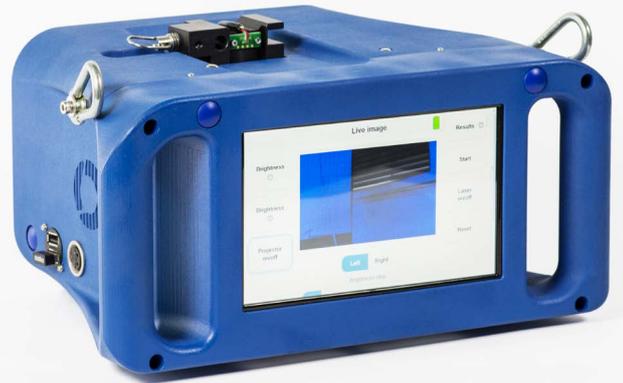
Viele der genannten Themen werden in den nachfolgenden Beiträgen behandelt, wie die mobile 3D-Scantechnik für die forensische Spurensicherung, die Hochgeschwindigkeits-3D-Vermessung der Airbag-Entfaltung, oder hochdynamische Multiaperturkameras für Automotive-Anwendungen.

The Fraunhofer IOF develops optical and optoelectronic measurement and sensor systems. Research includes novel measuring methods, sensor principles, evaluation, and system solutions. The Fraunhofer IOF utilizes advanced and miniaturized or micro-optical components, as well as transmitter and receiver units (e.g. flat and bi-directional sensors), projection techniques (array projection, LCoS, OLED), and light sources (femtosecond lasers, LEDs), in combination with integrated data processing architectures.

One focus is on pattern and fringe projection 3D measurement systems and the inclusion of tomographic measurement methods on the basis of fs-lasers, THz detector, and CT systems. An additional focal point are systems for coating and surface characterization, including stray light-based measurement systems for roughness determination, micro- and nano-structure measurement, defect detection, and surface characterization of layers. On the basis of bio-inspired faceted optics, the Fraunhofer IOF also develops revolutionary compact cameras and microscopes.

Many of these issues are addressed in the subsequent contributions, such as mobile 3D scanning technology for forensic securing of evidence, high-speed 3D measurement of air bag deployment, or highly dynamic multi aperture cameras for automotive applications.

LEFT Tragbarer 3D-Handscanner für die forensische Spurensicherung. | *Mobile 3D-scanner for evidence recovery at crime scenes.*



TRAGBARER 3D-HANDSCANNER FÜR DIE FORENSISCHE SPURENSICHERUNG MOBILE 3D-SCANNER FOR EVIDENCE RECOVERY AT CRIME SCENES

Optische 3D-Sensoren werden zumeist als stationäre Messsysteme mit festem Standort betrieben und beispielsweise in der industriellen Qualitätssicherung eingesetzt. Durch die Ausführung als mobile, tragbare 3D-Scanner können die Systeme auch an wechselnden Einsatzorten, z. B. Tatorten, verwendet werden. Im von der EU geförderten Projekt »3D-Forensics« wurde in Zusammenarbeit mit Polizeibehörden ein 3D-Scanner basierend auf Streifenprojektion für die Sicherung von Schuh- und Reifenspuren an Tatorten entwickelt /1/. Bei dieser Anwendung ist neben der Mobilität ein hohes Auflösungsvermögen gefordert, da oft Details, z. B. kleine Kratzer in der Schuhsohle, zur Überführung von Tätern beitragen.

Um eine hohe Mobilität zu erreichen, wurde der 3D-Handscanner (Abb. 1) als autarkes Messsystem mit integrierter Rechen- und Bedieneinheit sowie Akku entwickelt. Im Betrieb ist kein zusätzliches Equipment erforderlich. Der 3D-Sensor erfasst in einem Messvolumen von $325 \times 200 \times 100 \text{ mm}^3$ bis zu 2,5 Mio. 3D-Punkte mit einem lateralen Punktabstand von 0,17 mm. Die hohe Auflösung ermöglicht die Erkennung relevanter Details in Eindruckspuren (Abb. 2). Der Handscanner verfügt als ansteckbare Zusatzkomponente über eine Spiegelreflexkamera, die kalibriert zur 3D-Punktwolke ein hochaufgelöstes Farbbild erfasst, das zusätzliche Informationen in der Analyse liefern kann. Die integrierten Akkus ermöglichen einen Betrieb zwischen 30 und 60 Minuten. Die Bedienung des Systems erfolgt über einen Touchscreen. Die Steuerungssoftware wurde auf einfache

Optical 3D-sensors are typically built as stationary measurement systems with a fixed location, e.g. in industrial quality control. The design as a mobile 3D-scanner allows the usage of the system at varying locations, e.g. crime scenes. The project 3D-Forensics, funded by the European Union and supported by forensic experts, focussed on the development of such a 3D-scanner based on fringe projection for the recovery of footwear and tyre traces at crime scenes /1/. This application also requires a high resolution level, because details, such as tiny scratches in a sole of a shoe, often lead to the identification of criminals.

High mobility was achieved by designing the handheld 3D-scanner as a completely self-contained measurement system including an integrated processing unit, operating panel, and batteries (Fig. 1). During operation no additional equipment is required. The 3D-sensor captures a field of view of $325 \times 200 \times 100 \text{ mm}^3$ with up to 2.5 Mio. 3D points with a point pitch of 0.17 mm. The high resolution allows the detection of relevant details in impression traces (Fig. 2). The 3D-scanner contains a digital camera as an attachable add-on component, which captures a high resolution color image calibrated to the point cloud. This can give additional information in the investigation of the trace. Batteries allow the system to be operated for between 30 and 60 minutes. The scanner is controlled on a touchscreen. The control software was optimized on ease of use. The crime scene investigator adjusts the scan position

1 3D-Handscanner mit zusätzlicher Spiegelreflexkamera. | Mobile 3D-scanner with attached digital camera.

Bedienbarkeit optimiert. Der Kriminaltechniker stellt mit Hilfe eines Livebildes die Messposition und die je nach Untergrund optimale Belichtungszeit ein. Das Scan-Ergebnis wird direkt als Vorschau angezeigt. Für die Untersuchung der Spuren wurde eine Software entwickelt, die eine forensische Auswertung der 3D- und Farbdaten ermöglicht. Bei der Entwicklung des Gesamtsystems aus Scanner und Software wurde die Datenintegrität berücksichtigt, um eine Verwendung vor Gericht zu ermöglichen.

Der 3D-Handscanner wurde in Zusammenarbeit mit Polizeibehörden in tatortähnlichen Umgebungen getestet. Die Qualität der Scan-Ergebnisse wurde mit Gips-Abgüssen, der aktuellen Standardtechnik zur Sicherung von Eindrucksuren, verglichen. Der erreichte Detailgrad durch 3D-Scanning ist hierbei gleichwertig oder höher /2/. Ein großer Vorteil gegenüber Gips-Abgüssen liegt in der berührungslosen und schnellen Erfassung der Spuren. Die Vorzüge des neuen 3D-Handscanners gegenüber bisherigen Lösungen liegen in der Kombination von hoher Mobilität mit hoher Datenqualität. Weitere Anwendungsfelder neben der Sicherung von Schuh- und Reifenspuren liegen sowohl in der Forensik bei anderen Spurenarten, als auch in der Medizin oder Archäologie.



2 Scan-Ergebnis einer Schuhsohle mit relevanten Details zur Identifizierung von Tätern. | Scan result of a shoe sole with marked details relevant for identification of criminals.

with the live camera image and selects the optimal exposure time depending on the underground. The scan result is directly presented as a preview. The investigation of the traces is carried out with dedicated software, which allows the analysis of the 3D- and color data. The whole system consisting of 3D-scanner and software was further developed with respect to data integrity issues to enable its usage as evidence in court. The 3D-scanner was tested in cooperation with crime scene investigators in environments similar to real crime scenes. The quality of the scan results was compared to plaster casts, which is the state of the art technique used to recover impression traces. The achieved level of detail through 3D-scanning is similar or even higher /2/. A great advantage in comparison to plaster casting is the contactless and quick capturing of the traces. The benefit of the new handheld 3D-scanner in relation to previous solutions is the combination of high mobility with high data quality. Further application fields besides footwear and tyre traces are other forensic trace types as well as in medicine or archaeology.

References / Literatur

/1/ www.3d-forensics.eu

/2/ Crabbe, S. et al.: Results from 3D-forensics – mobile high-resolution 3D-scanner and 3D data analysis for forensic evidence. In: Proceedings 10th Future Security - Security Research Conference, September 15 -17 (2015), 113-121.

AUTHORS

Roland Ramm

Ingo Schmidt

Peter Kühmstedt

Gunther Notni

Max Lucas¹

¹Lucas instruments GmbH

CONTACT

Roland Ramm

Phone +49 3641 807-213

roland.ramm@iof.fraunhofer.de



1

HOCHGESCHWINDIGKEITS-3D-VERMESSUNG DER AIRBAG-ENTFALTUNG HIGH-SPEED 3D-MEASUREMENT OF AIRBAG DEFLATION

Die optische 3D-Vermessung nach dem Prinzip der aktiven Triangulation ermöglicht die berührungslose Rekonstruktion von Objektoberflächen. Dieses Konzept ist seit mehreren Jahren etabliert und liefert selbst an unstrukturierten Objekten hochgenaue und sehr dichte Informationen der Objektform. Typischerweise können mit aktuellen Systemen 3D-Raten von unter 30 Hz erzielt werden. Die begrenzte zeitliche Auflösung von konventionellen 3D-Messsystemen erlaubt meist nur einen Vergleich der Objektoberflächen vor und nach einem zu untersuchenden Prozess. Die tatsächliche dynamische Änderung der Form während des Prozesses kann selbst bei moderaten Geschwindigkeiten nicht mehr rekonstruiert werden. Die begrenzte Aufnahmezeit ist dabei vorrangig durch die niedrige Bildwiederholrate der genutzten Projektionssysteme bestimmt. Die Herausforderung besteht daher in der Entwicklung neuer Konzepte für ausreichend schnelle Projektionseinheiten, welche eine möglichst hohe Lichtmenge für die extrem kurzen Belichtungszeiten von mitunter nur 15 μ s zur Verfügung stellen.

Ein entsprechendes Projektionssystem wurde basierend auf einer Gasentladungslampe mit einem Lichtstrom von fast 50.000 lm konzipiert und aufgebaut. Das System projiziert dabei kontinuierlich ein sogenanntes aperiodisches Sinusmuster. Dieses wurde ebenfalls am Fraunhofer IOF entwickelt und ermöglicht eine stabile 3D-Rekonstruktion der Objektoberfläche unter Berechnung von zeitlichen Korrelationen zwischen den Pixeln der beteiligten Kameras. Der aufgebaute 3D-Scanner ist

Using optical active triangulation, an object's surface can be reconstructed from 3D-measurement. This concept has been well established for several years, and provides high density information on the object's form with high precision. Current systems can typically work at 3D rates of approximately 30 Hz.

The restricted temporal resolution only allows measurements before and after fast running processes. The actual dynamic change in the object's form cannot be measured even at moderate change rates. The 3D rate is mainly restricted by the projection frequencies, i.e., the time required to switch projected images. Therefore the major challenge in achieving higher 3D rates is to develop faster projectors which also provide high amounts of light suited for short camera shutter times ($\sim 15 \mu$ s).

We have developed a projection system based on a gas discharge lamp with a luminous flux of almost 50000 lm. The system projects a so-called Aperiodic Sine Pattern, which was also developed at Fraunhofer IOF. In one second, the constructed scanner can provide 1200 independent 3D scans of 1 million points each. An important use of this system is in crash test research. In this field, innovative developments can reach series-production readiness much faster in a cost-efficient way because far fewer crash tests are required thanks to the significantly increased amount

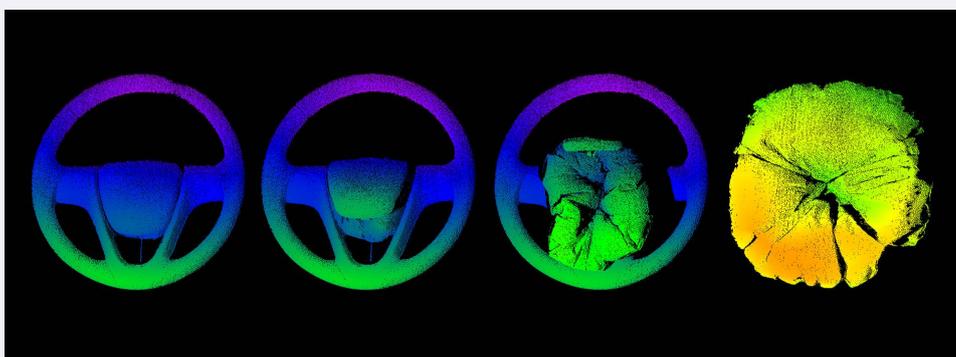
1 *Hochgeschwindigkeits-3D-Sensor. | High-speed 3D-measurement system.*

somit in der Lage, über 1200 unabhängige 3D-Datensätze pro Sekunde mit jeweils einer Million Messpunkten zu liefern. Von großem Interesse ist diese Entwicklung vor allem für die Crashtestforschung. Durch eine extrem gesteigerte Datendichte und einem gleichzeitig reduzierten Versuchsaufwand wird es möglich, innovative Produktentwicklungen kosteneffizienter und schneller zur Serienreife zu bringen. So konnten bereits 3D-Daten in Crashtests mit bisher unerreichter zeitlicher und örtlicher Auflösung aufgenommen werden.

Durch eine Reduktion der Kameraauflösung kann die zeitliche Auflösung noch weiter gesteigert werden und bei extrem schnellen Deformationen 3D-Daten der Objekte liefern. Mit einer Kameraauflösung von 500 x 500 Pixeln wurden erfolgreich reale Airbagentfaltungen mit einer 3D-Rate von 5000 Hz dokumentiert. Der gesamte Entfaltungsvorgang mit einer Dauer von gerade einmal 26 ms wurde somit durch etwa 130 unabhängige 3D-Datensätze aufgenommen. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist, dass keine Präparation der Airbags durch einen speziellen Farbauftrag oder das Einnähen von Marken notwendig ist und somit erstmalig Stichproben aus der laufenden Produktion untersucht werden können. Mit dem entwickelten 3D-Scanner können somit unverfälschte 3D-Informationen dieses extrem schnellen Prozesses aufgenommen werden.

of data. We have successfully measured crash tests at a temporal and spatial resolution unreached with other systems.

By reducing the camera's resolution, recording speed can be further increased so that even faster deformations can be measured. We have documented explosions of real airbags at a camera resolution of 500 x 500 pixels with a 3D rate of 5000 Hz. A whole deflation of an airbag lasting 26 ms can be recorded with 130 independent 3D data sets. A major advantage of our method is that the airbag does not need to be prepared in any way for the measurement (other systems require markers or special colour-coatings to be attached to the airbag). Thus, our scanner can record 3D information of this extremely fast process unaltered by preparation means.



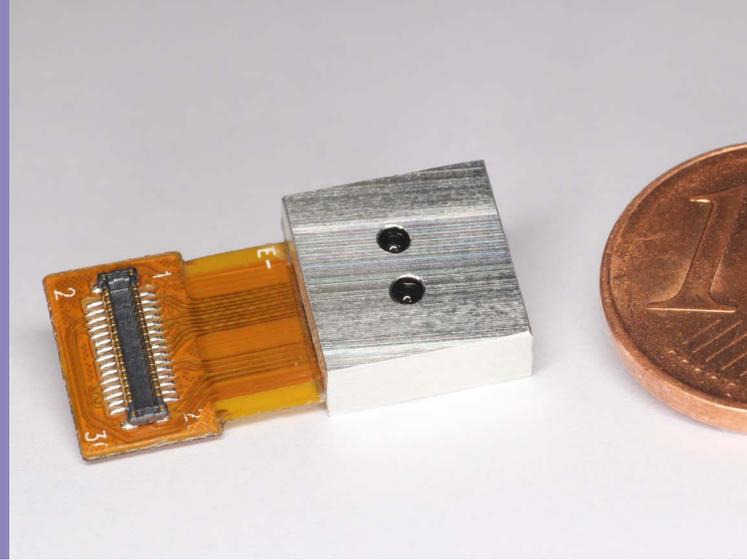
2 Demonstration einer Airbagentfaltung: 3D-Daten zu vier verschiedenen Zeitpunkten. |
Airbag inflation demonstration: 3D data at different points in time.

AUTHORS

Peter Lutzke
Patrick Dietrich
Stefan Heist
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

Dr. Peter Lutzke
Phone +49 3641 807-211
peter.lutzke@iof.fraunhofer.de



MULTIAPERTURKAMERA FÜR AUTOMOTIVE ANWENDUNGEN IM HOCHDYNAMIKBEREICH

HIGH-DYNAMIC-RANGE MULTI-APERTURE CAMERA FOR AUTOMOTIVE APPLICATION

Auf dem Weg zum unfallfreien Fahren hat die Automatisierung längst einen festen Platz in der Automobiltechnik eingenommen. Assistenz- und Sicherheitssysteme (z. B. Totwinkel-Assistent, Verkehrszeichen- und Fahrspurerkennung etc.) unterstützen zunehmend den Fahrer und greifen in die Fahrzeugsteuerung ein, um so Unfällen bestmöglich vorzubeugen. Künftig sollen dabei bis zu zehn Funktionen gleichzeitig von einem Kamerasystem bedient werden, was die Anforderungen an diese erhöht. Insbesondere für ein autonomes Fahren in Stadtumgebung und bei Nacht bedarf es der Erfassung großer Gesichtsfelder mit hoher Orts- und Winkelauflösung bei kurzen Erfassungszeiten und großem Dynamikumfang. Bislang eingesetzte konventionelle Kameras zeichnen sich insbesondere durch ihre Robustheit gegenüber Temperatur sowie mechanischen Belastungen etc. aus, besitzen jedoch im Gegenzug nachteilig große Bauformen, hauptsächlich verursacht durch die Objektivgrößen (z-Länge > 15 mm). Im Zuge der angestrebten Minimierung der Kamerabaugröße stellt die damit einhergehende Reduktion des Dynamikbereichs (gegenwärtig ≤ 70 dB, linear) eines der größten Hindernisse dar. Ziel des Projektes ist daher die Entwicklung miniaturisierter Wafer-Level-Kameramodule (z-Länge < 3 mm) mit erweiterter linearer Dynamik (> 100 dB), welche durch ein parallelisiertes Herstellungsverfahren kostengünstig und in hoher Stückzahl fertigbar sind. Für die Realisierung eines ersten Demonstrators wurde hierfür ein Systemdesign gewählt, bei dem zwei optische

Automation plays an essential role on the way to accident-free driving in the automotive industry. Drivers are increasingly supported by assistance and security systems (e.g. blind spot assistance, traffic sign and lane detection etc.) which intervene in vehicle control in order to avoid accidents. In the near future, up to ten functions should be performed by a single camera system demanding higher requirements. The acquisition of a large field of view with high spatial and angular resolution at short integration time and high dynamic range is needed, especially for autonomous driving in urban areas and at night.

Contemporary, conventional cameras are characterized by their robustness with regard to temperature change and mechanical stress. However, they are large in size mainly because of the size of the objective lens (z-height > 15 mm). The decrease of the dynamic range (currently ≤ 70 dB, linear) is one of the biggest obstacles for the miniaturization of the camera size being striven for. The aim of the project is to develop miniaturized wafer-level camera modules (z-height < 3 mm) with extended linear dynamic range (> 100 dB), manufactured by a parallelized fabrication technique at low cost and in high volume.

For the realization of a first demonstrator, a system design was chosen in which two optical channels are aligned next to each other on an image sensor. Each optical channel uses four rota-

1 Waferstapel mit auf Blendenarrays abgeformten Mikrolinsen (links) und Größenvergleich des realisierten Demonstrators (rechts). | Waferstack with microlenses molded on diaphragm arrays (left side) and size comparison of the realized demonstrator (right side).

Kanäle in zeilenartiger Anordnung auf einem Bildsensor platziert werden. Jeder der Kanäle besitzt vier rotationssymmetrische optische Flächen, was die Herstellung der Linsenmaster mittels Diamantdrehen erlaubt. Die Erzeugung der tatsächlichen Linsenarrays erfolgt anschließend durch doppelseitiges Abformen mittels Step- und Repeat-Imprintverfahren auf mit Blendenarrays vorstrukturierten Wafern (Abb. 1). Über das jeweilige Öffnungsverhältnis wurden für die optischen Kanäle verschiedene Lichtempfindlichkeiten ($F\# = 2,6$ und $7,3$) eingestellt, während eine Zielauflösung von je 1,5 MP und ein Gesichtsfeld von je 60° erfasst werden. Die geringe Pixelgröße ($1,75 \mu\text{m}$) gestattet dabei die Realisierung verkleinerter Bauformen (kleiner Bilddurchmesser, kurze Brennweite). Mit Hilfe einer selbstentwickelten Software wird die HDR-Rekombination der beiden Teilbilder, inkl. Vignettierungs- und Verzeichnungskorrektur, in Echtzeit vorgenommen und gewährleistet so eine erweiterte Dynamik im fusionierten Bild gegenüber dem Einzelkanal (Abb. 2). Das dargestellte Vorhaben wird gefördert durch das BMBF im Rahmen des Verbundvorhabens SITARA (FKZ: 13N12446). Als weitere interessante Anordnungen für den Einsatz miniaturisierter Multiaperturkameras im Automotive-Bereich bzw. Personennahverkehr werden das simultane Erfassen verschiedener Gesichtsfeldgrößen als auch ein aufgeteiltes Abtasten des gesamten Gesichtsfelds untersucht.

tionally symmetric surfaces which allow the lens master molds to be fabricated by diamond turning. Subsequently, a step- and repeat imprint process is used to mold the final microlens arrays on either side of prestructured wafers carrying diaphragm arrays (Fig. 1). For each optical channel, a different light sensitivity has been realized ($F\# = 2.6$ and 7.3) by adapting the entrance pupil size whereas an image resolution of 1.5 MP and a field of view of 60° is captured. The small pixel size ($1,75 \mu\text{m}$) enables a smaller system dimension (smaller image diameter, shorter focal length) which is accompanied by a decreased dynamic range per channel. With the help of self-developed software, the HDR-recombination of both subimages can be performed in real-time, including vignetting and distortion correction, which enables the contrast or dynamic range to be improved of (Fig. 2).

This work is funded by the BMBF as a part of the joint research project SITARA (FKZ: 13N12446). As further interesting setups for the application of miniaturized multi-aperture cameras in automotive or public transport, the simultaneous acquisition of different field of view sizes as well as the segmentation of the field of view are to be investigated.



2 Zeitgleich aufgenommenes Bild des lichtunempfindlichen (links) und lichtempfindlichen optischen Kanals (mittig) sowie die HDR-Kombination aus beiden (rechts). |

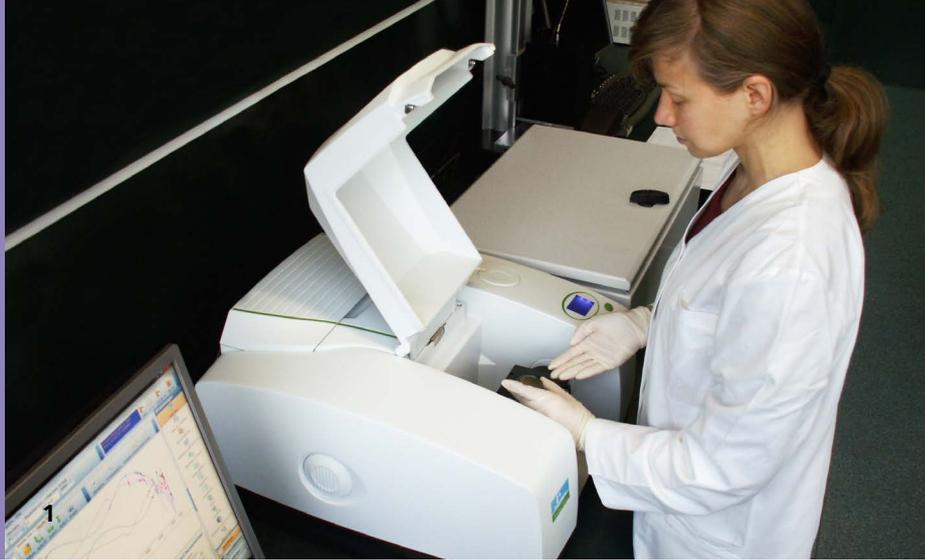
Simultaneously captured image of the light-insensitive (left side) and light-sensitive optical channel (middle) as well as the HDR-combination of both (right side).

AUTHORS

Christin Gassner
Andreas Brückner
Alexander Oberdörster
Andreas Reimann
Nico Hagen

CONTACT

Dr. Andreas Brückner
Phone +49 3641 807-421
andreas.brueckner@
iof.fraunhofer.de



INFRAROT-OPTISCHE CHARAKTERISIERUNG VON FESTKÖRPERPROBEN

INFRARED OPTICAL CHARACTERIZATION OF SOLID SAMPLES

Von der Stoffanalyse an verschiedensten Bulkproben bis zur Charakterisierung herstellungsbedingter Strukturspezifika dünner optischer Schichten stellt die Infrarotspektroskopie (IR-Spektroskopie) eine universelle zerstörungsfreie Untersuchungsmethode dar. Ursächlich dafür sind die vielfältigen Absorptionsprozesse in diesem Spektralbereich, welche neben der Anregung von Gitterschwingungen auch elektronische Prozesse wie z. B. Intradbandabsorptionen freier Ladungsträger umfassen können. IR-Spektroskopie kann in diesem Zusammenhang zur Bestimmung von optischen Konstanten genutzt werden. Im Rahmen der Bearbeitung des Verbundprojektes Freeform Optics Plus (fo⁺ / www.fo-plus.de) wurde ein Verfahren entwickelt, um mittels Fourier-Transform-Infrarot (FTIR)-Spektroskopie konsistente optische Konstanten für Substrat- und Schichtmaterialien zu bestimmen.

Der üblicherweise verwendete Probentyp bei der Bestimmung optischer Konstanten von Schichtmaterialien ist durch eine dünne Schicht, abgeschieden auf einem hinreichend dicken Substrat, gegeben. Das Messspektrum beinhaltet in diesem Fall materialspezifische Informationen über die optischen Konstanten sowohl der Schicht als auch des Substrats, die mit geometrischen Eigenschaften (insbesondere der Schicht- und Substratdicke) in recht komplexer Weise verknüpft sind. Nach der üblichen Vorgehensweise wird daher zunächst das unbeschichtete Substrat hinsichtlich seiner optischen Konstanten separat charakterisiert, um bei der Auswertung des Schicht-auf-Substrat-

Infrared (IR) spectroscopy is a universal analytical tool for non-destructive characterization of all kinds of solid matter. It yields quantitative data on the composition of samples, as well as specific information on typical microstructural sample features, as they are characteristic for thin solid films. The reason is in the multiplicity of infrared active absorption processes, which include lattice vibrations as well as the response of free charge carriers. In this connection, IR spectroscopy also finds application for determining optical constants of solids. In the frames of the joint project Freeform Optics Plus (fo⁺), we developed a procedure that allows the calculation of consistent optical constants of substrate and thin films from their Fourier-Transform-Infrared (FTIR)-spectra.

In thin film FTIR spectroscopy, a typical sample consists of a thin solid film, deposited onto a much thicker substrate. Therefore, the measured spectrum contains information on the optical constants of both the substrate and film materials, as well as on geometrical features such as substrate and film thicknesses. In characterization practice, it makes sense to first investigate the properties of a bare substrate. Having established its optical properties, the substrate parameters may be assumed to be known when turning to the investigation of a film-on-substrate sample, which facilitates determination of thickness and optical constants of the film from a sample spectrum.

1 *Spektrometer mit externem Probenraum. | Spectrometer with external sample compartment.*

Spektrums die Substrateigenschaften als gegeben ansehen zu können. Die verbleibenden Informationen im Spektrum werden dann durch die Spezifika (optische Konstanten, Schichtdicke) der dünnen Schicht bedingt.

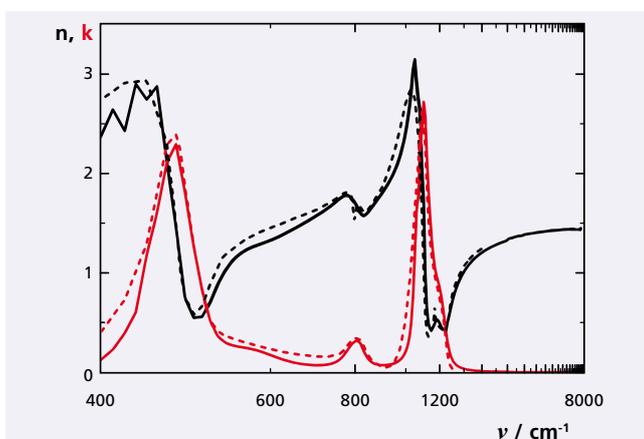
Abbildung 2 zeigt exemplarisch die optischen Konstanten (Brechzahl n und Extinktionskoeffizient k) eines handelsüblichen Q1(Quarzglas)-Substrats, wie sie mittels unserer Methodik aus dem FTIR-Transmissions- bzw. Reflexionsspektrum bestimmt wurden (durchgezogene Linien) /1/. Die gestrichelten Linien zeigen den Vergleich mit Literaturwerten /2/. Die exzellente Übereinstimmung belegt die Leistungsfähigkeit des am Fraunhofer IOF für die IR-Charakterisierung von Festkörperproben geschaffenen Aufbaus. Bisherige Anwendungen in der FTIR-Schichtspektroskopie betreffen v. a. amorphe Silizium- und Germaniumschichten.

As an example, Figure 2 shows the optical constants (refractive index n and extinction coefficient k) of a commercial Q1(fused silica)-substrate, determined by means of our method from the measured FTIR-transmission- and reflection spectra (solid lines) /1/. The dashed lines correspond to literature data /2/. The excellent agreement confirms the validity of the reported approach. First applications in thin film spectroscopy mainly concern the characterization of amorphous silicon and germanium films.

References / Literatur

/1/ Franke, C.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S. et al.: Optische Konstanten von Substraten im NIR/MIR-Spektralbereich, *Vakuum in Forschung und Praxis* (2016), Vol. 28 Nr. 1.

/2/ Palik, E.: *Handbook of Optical Constants of Solids Five-Volume Set*, Academic Press (1997), 753-763.



2 *Optische Konstanten eines Quarzglassubstrats als Funktion der Wellenzahl ν : Literaturwerte lt. /2/ (gestrichelt), unsere Ergebnisse (durchgezogen). | Optical constants of fused silica vs wavenumber ν : Literature data /2/ (in dash), our results (solid lines).*

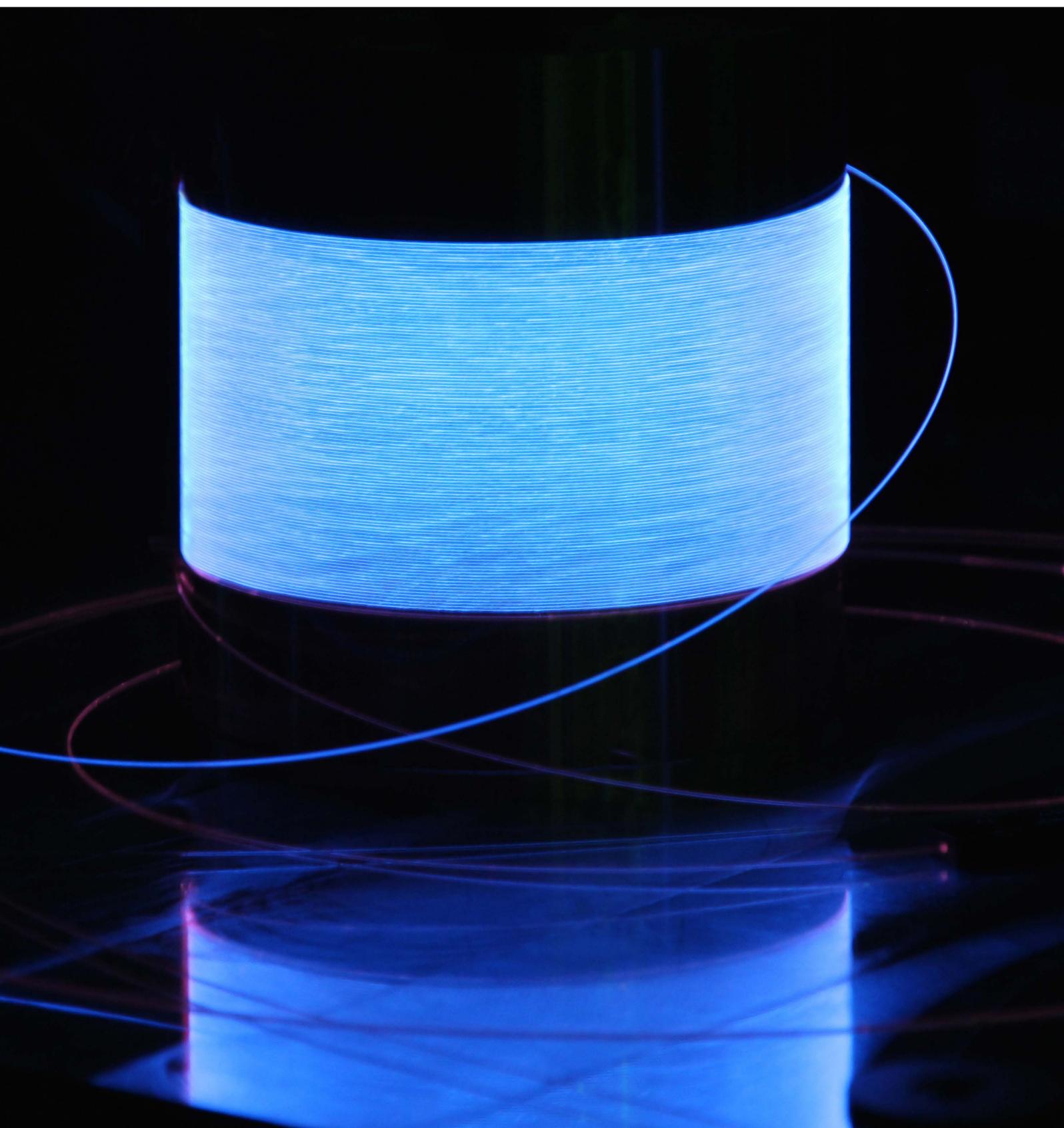
AUTHORS

Olaf Stenzel
Steffen Wilbrandt
Christian Franke
Mark Schürmann
Norbert Kaiser

CONTACT

Dr. Olaf Stenzel
Phone +49 3641 807-348
olaf.stenzel@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



LASERTECHNIK

LASER TECHNOLOGY

In dem Geschäftsfeld Lasertechnik werden neuartige Hochleistungsfaserlaser, sowie Prozesse zur Laser-Mikro-Materialbearbeitung entwickelt. Arbeitsschwerpunkte sind die Leistungskalierung beugungsbegrenzter Faserlaser in den 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 Zentrum 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.

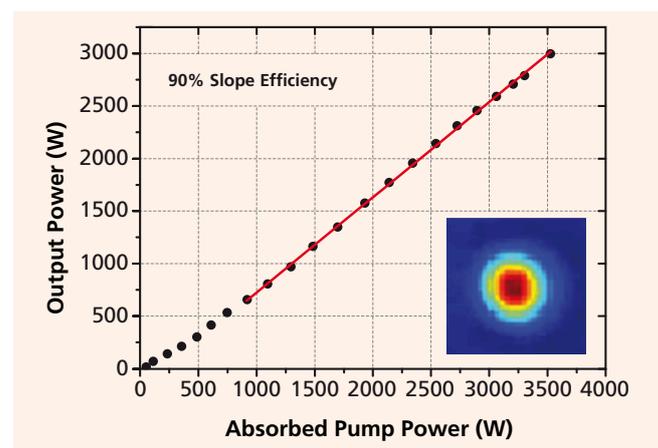


FASERTECHNOLOGIE FÜR MODEN-INSTABILITÄTSFREIE MULTI-KW FASERLASER FIBER TECHNOLOGY FOR MODE INSTABILITY-FREE MULTI KW FIBER LASERS

Der Laser ist ein wichtiger Informations- und Energieträger, verschleißfreies Werkzeug und berührungloses Messinstrument mit vielfältigen Einsatzfeldern in Wirtschaft und Wissenschaft. Im Bereich der Hochleistungsanwendungen weisen vor allem Faserlaser gegenüber anderen Lasertypen Vorteile auf, z. B. in Hinblick auf höchste Ausgangsleistung mit hervorragender Strahlqualität. Trotz der herausragenden Eigenschaften von Faserlasersystemen ist nach einem anfänglich exponentiellen Anstieg der Ausgangsleistung keine weitere Steigerung der optischen Leistung in den letzten Jahren zu verzeichnen. Dies ist nicht auf Anwendungsbarrieren, sondern auf eine neu entdeckte, fundamentale physikalische Grenze, der thermisch-induzierten Modeninstabilität, zurückzuführen.

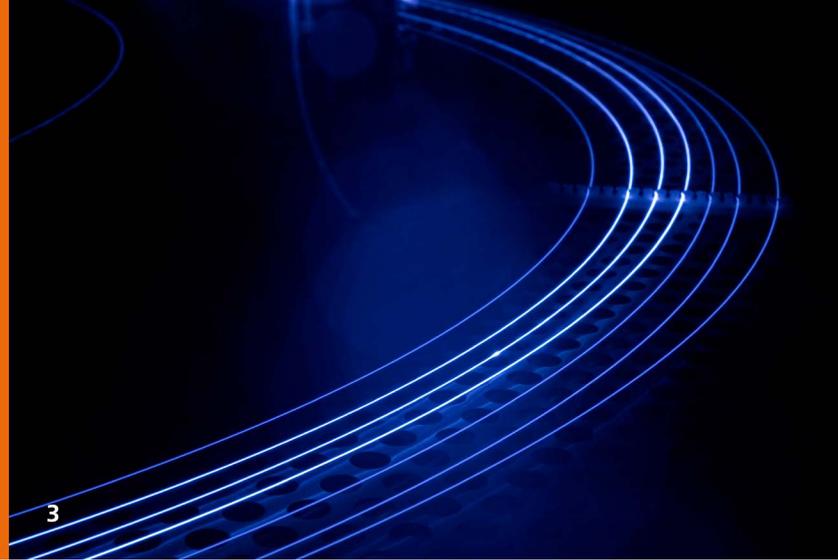
Am Fraunhofer IOF wird seit 2011 die Technologie zur Faser- vorform-Herstellung ausgebaut, um durch innovative, neue Faserdesigns die bestehenden Limitierungen zu verschieben und zu überwinden. Am Fraunhofer IOF Jena werden Fasern mittels MCVD (modified chemical vapor depositon) Technologie in Kombination mit der Lösungsdotierungstechnologie hergestellt. Um das Auftreten ungewollter nichtlinearer Effekte zu vermeiden, werden Fasern mit vergleichsweise großen Kernen hergestellt. Als Folge daraus und in Kombination mit dem Erhalt einer guten Strahlqualität ergeben sich Kerne mit sehr geringen Brechzahlspürungen. Dies stellt eine große Herausforderung für

It is well known that lasers are important information and energy carriers, as wear-free tools, and contact-free measuring devices with widely spread applications in industry and science. For high power applications in particular, fiber lasers have many advantages in comparison to other laser concepts, for example with regard to highest output power levels with excellent beam quality. In spite of the outstanding properties of fiber lasers after an initial exponential increase of output power, further power scaling has dropped in the last few years. This is not because of barriers of



4 Kennlinie des Faserlasersystems: das Lasersystem weist bis zu der Rekordausgangsleistung von 3 kW eine sehr hohe Effizienz von 90 % und eine exzellente Strahlqualität auf. | Slope of the fiber laser system: a very high slope efficiency of 90 % up to a maximum output power of 3 kW with excellent beam quality was demonstrated.

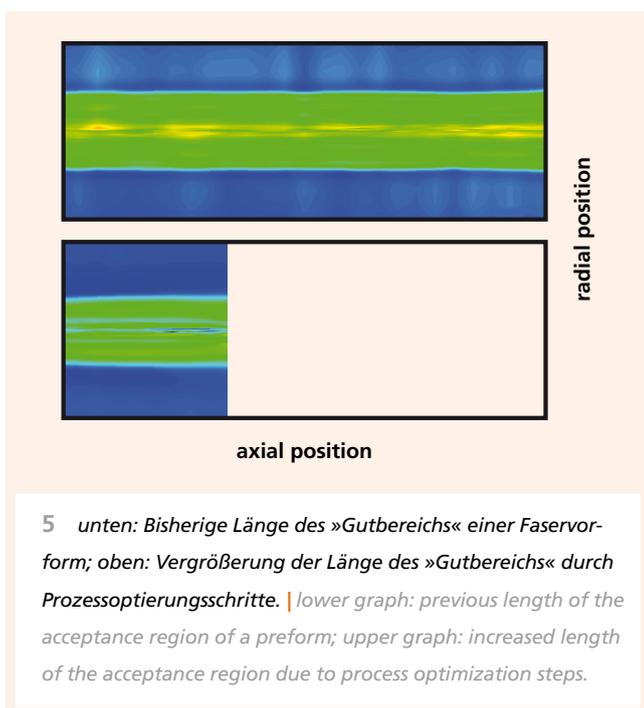
- 1 **Preformherstellung.** | Production of preforms.
- 2 **Preform.** | Preform.
- 3 **Faserlaser.** | Fiber laser.



die Genauigkeit vieler Prozessparameter bei der Faserherstellung dar.

Erstmals ist es gelungen, einen neuen Leistungsrekordwert von 3 kW Laserausgangsleistung mit exzellenter Strahlqualität und sehr guter Lasereffizienz zu realisieren (Abb. 4). Das Faserlasersystem wurde aus am Fraunhofer IOF hergestellten Fasern aufgebaut. Der bisherige Leistungsrekord am Fraunhofer IOF, der mit kommerziell erhältlichen Fasern in vergleichbaren Aufbauten erzielt werden konnte, lag bei 2,3 kW Ausgangsleistung. Dieser Erfolg verdeutlicht die Notwendigkeit, die komplexe Prozesskette vom Faserdesign bis zur Anwendung im eigenen Haus bereit zu stellen und so kurze Informationswege zu garantieren. Zukünftig soll die Optimierung der Fasern am Fraunhofer IOF weiter vorangetrieben werden. Neben der Entwicklung neuer Faserdesigns werden die Optimierung der Homogenität der Faservorformen und die Erhöhung der Ausbeute wichtige Arbeitsschritte sein (Abb. 5).

applications but a new fundamental physical limit called thermally induced mode instability. Since 2011 the technology for preform fabrication has been constructed at Fraunhofer IOF with the aim of pushing and overcoming the existing limits by realizing innovative, new fiber designs. The fibers fabricated at the Fraunhofer IOF Jena are produced by MCVD (modified chemical vapor deposition) technology combined with solution doping technology. To prevent unwanted nonlinear effects, fibers with comparable large core diameters are fabricated. In combination with the requirement of fibers allowing for excellent beam quality, one consequence is that the fiber core must have a very small increase of refractive index. This requirement is challenging and places great demands on the precision of many process parameters for fiber fabrication. For the first time, a new record of 3 kW output power with excellent beam quality and a very high slope efficiency could be demonstrated with a fiber laser system built from fibers fabricated at the Fraunhofer IOF (Fig. 4). Previously, power levels up to 2.3 kW were reached in similar setups built from commercially available fibers. The necessity of combing the whole process chain from fiber design to application, which guarantees short paths of information, is demonstrated by the great success with the fibers fabricated at the Fraunhofer IOF. In future the development fibers at the Fraunhofer IOF will be pushed further. Besides the development of new fiber designs, the improvement of fiber homogeneities and yield will also be important work packages (Fig. 5).

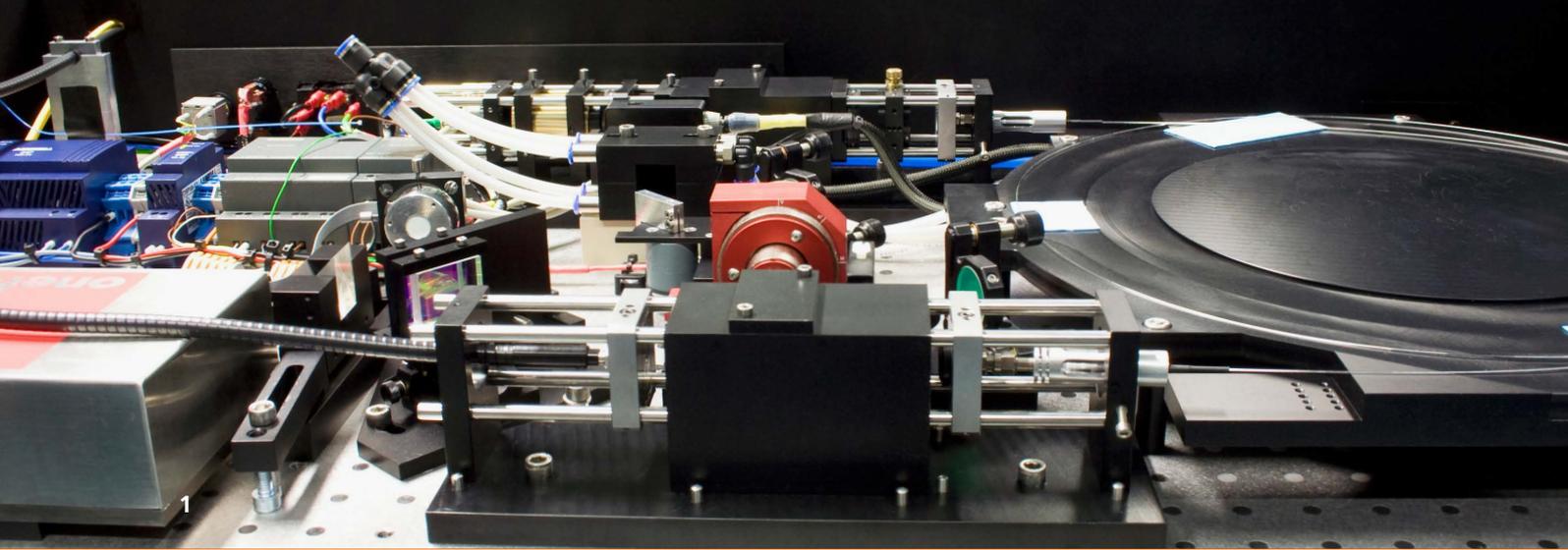


AUTHORS

Nicoletta Haarlammert
 Stefan Kuhn
 Christian Hupel
 Franz Beier
 Johannes Nold
 Thomas Schreiber

CONTACT

Dr. Nicoletta Haarlammert
 Phone +49 3641 807-334
 nicoletta.haarlammert@iof.fraunhofer.de



ULTRAKURZPULS-FASERLASER IM INFRAROTEN SPEKTRALBEREICH ULTRAFAST FIBER LASERS IN THE INFRARED SPECTRAL REGION

Hochenergetische Laserpulse mit Pulsdauern von einigen Femtosekunden bis Pikosekunden bei gleichzeitig hoher Durchschnittsleistung und exzellenter Strahlqualität sind für unterschiedlichste Anwendungen in Forschung und Industrie von zentraler Bedeutung. Zum Beispiel sind extrem herausfordernde Anwendungen wie die Elektronenspektroskopie, diffraktive Bildgebung und Teilchenbeschleunigung durch die fehlende Leistung heutiger Lasersysteme auf reine Demonstrationsexperimente begrenzt. In dieser Hinsicht erweist sich der Faserlaser als ein herausragendes Laserkonzept bei $1\ \mu\text{m}$ Emissionswellenlänge, um den stetig wachsenden Anforderungen zur Erschließung neuer Anwendungsbereiche zu begegnen. Viele Anwendungen würden allerdings von einer größeren Laserwellenlänge maßgeblich profitieren.

Der Faserlaser etablierte sich als Hochleistungslaserkonzept basierend auf Faserdotierung mit Ytterbium. Ein vielversprechendes, alternatives Material ist Thulium-dotiertes Quarzglas, das eine sehr breite Emission zwischen $1800\text{-}2050\ \text{nm}$ aufweist. Gegenwärtig wird die Erzeugung von ultrakurzen Pulsen im Wellenlängenbereich um $2\ \mu\text{m}$ basierend auf Thulium-dotierten Verstärkerfasern erforscht.

Eine größere Wellenlänge kann – neben der anwendungsbezogenen Nachfrage – auch für eine allgemeine Skalierung der Pulsspitzenleistung und Durchschnittsleistung von Faserlasersystemen interessant sein. Der störende Einfluss von wichtigen nichtlinearen Effekten reduziert sich linear oder

High-energetic laser pulses with a pulse duration of a few femtoseconds to picoseconds at simultaneously high average power and excellent beam quality are crucial to various applications in research and industry. For example, extremely challenging applications such as electron spectroscopy, diffractive imaging or particle acceleration are limited to demonstration experiments only because of the lack of high power laser sources. In this regard the fiber laser has proven itself to be an outstanding laser concept at $1\ \mu\text{m}$ wavelength to meet the continuously increasing requirements for the development of novel application fields. However, many applications would benefit greatly from a longer laser wavelength. The fiber laser was established as a high power laser based on fiber-doping with ytterbium. A promising alternative material is thulium-doped fused silica, which provides a broad emission between $1800\text{-}2050\ \text{nm}$. The generation of ultrashort pulses in the $2\ \mu\text{m}$ wavelength regime is currently being investigated based on thulium-doped fibers for amplification.

A longer wavelength is – besides the application-oriented demand – also of interest for scaling peak- and average power in fiber lasers. The detrimental influence of important nonlinear effects are linearly or quadratically reduced with wavelength. In addition the mode-field diameter can be scaled quadratically for similar tolerances of the refractive index profile. In combination, it should be feasible to scale the output power by an order

quadratisch mit der Wellenlänge. Zusätzlich kann die Modenfeldfläche bei gleichbleibenden Toleranzen für die Brechzahlanpassung quadratisch skaliert werden. In Kombination sollte eine Leistungsskalierung um eine Größenordnung durch den Wechsel der Signalwellenlänge von 1 μm zu 2 μm möglich sein.

Die Herstellung von hocheffizienten dielektrischen Reflexionsgittern in unserem Hause ermöglichten bereits Durchschnittsleistungen von 152 W und Pulsspitzenleistungen von mehr als 200 MW bei Pulsdauern von wenigen hundert Femtosekunden /1/. Eine Leistungsbegrenzung bei exzellenter Strahlqualität war dabei lediglich durch störende atmosphärische Wasserabsorptionen gegeben /2/. Bei trockener Atmosphäre konnte in einem Anschlussexperiment die nichtlineare Kompression in einer Quarzglasfaser mit einer Pulsdauer von 24 fs bei einer bislang unerreicht hohen Durchschnittsleistung von 24 W demonstriert werden /3/. Derzeitiger Brennpunkt der Forschung ist eine Skalierung der Spitzenleistung durch spektrale Verbreiterung der Pulse in gasgefüllten Hohlkernfasern und anschließender Pulskompression. In naher Zukunft werden diese Systeme Pulsspitzenleistungen von mehreren Gigawatt und gleichzeitig hohen Durchschnittsleistungen von einigen 100 W erreichen, womit herausfordernde aber gleichzeitig sehr vielversprechende Anwendungsfelder erstmalig adressiert werden können.

of magnitude by switching the signal wavelength from 1 μm to 2 μm . The in-house realization of highly efficient dielectric reflection gratings allowed for average powers of 152 W and peak powers of more than 200 MW at pulse durations of a few hundred femtoseconds /1/. The only limitation for further power scaling and diffraction-limited beam quality was the presence of detrimental atmospheric water absorption /2/.

In a subsequent experiment in dry atmosphere, the nonlinear compression in a solid-core fiber enabled pulse durations of 24 fs at previously unachieved average powers of 24 W. Current research focusses on increasing the peak power by spectral broadening in hollow-core capillaries and subsequent pulse compression. These systems will reach several GW peak power and simultaneously high average powers of a few 100 W, which will eventually be used to address challenging and promising application fields for the first time.

References / Literatur

- /1/ Fabian Stutzki et al.: Tm-based fiber-laser system with more than 200 MW peak power. In: Opt. Lett. 40, 9-12 (2015).
/2/ Martin Gebhardt et al.: Impact of atmospheric molecular absorption on the temporal and spatial evolution of ultra-short optical pulses. In: Opt. Express 23, 13776-13787 (2015).
/3/ Christian Gaida et al.: Self-compression in a solid fiber to 24 MW peak power with few-cycle pulses at 2 μm wavelength. In: Opt. Lett. 40, 5160-5163 (2015).

AUTHORS

Christian Gaida
Jens Limpert
Fabian Stutzki
Martin Gebhardt
Cesar Jauregui Misas

CONTACT

Prof. Dr. Jens Limpert
Phone +49 3641 947-811
jens.limpert@uni-jena.de



ULTRAPRÄZISE METALL-SCANSPIEGEL FÜR ULTRAKURZPULSLASER ULTRAPRECISE METAL SCAN MIRRORS FOR ULTRASHORT PULSE LASERS

Scanspiegel für Ultrakurzpuls laseranwendungen müssen leicht sein und ein geringes Drehmoment aufweisen, um eine sehr schnelle und präzise Positionierung der Pulse zu ermöglichen. Aufgrund der starken Beschleunigung gibt es hohe Anforderungen an die Steifheit der Spiegel. Zudem wird eine gute Qualität der Spiegeloberfläche benötigt. Ultrapräzise Metallspiegel sind eine attraktive Lösung, die diese Anforderungen erfüllen ^{1/}. Die einfache und kosteneffiziente Herstellungstechnologie ist ein wichtiger Vorteil gegenüber Alternativen wie Glas-, Glaskeramik- und Keramikspiegeln.

Am Fraunhofer IOF wurden Scanspiegel aus AlSi-Kompositmaterial hergestellt. Ultrapräzise AlSi-basierte Leichtgewichtsspiegel mit guter Oberflächenqualität können unter Verwendung einer elektrochemisch abgeschiedenen Nickelphosphorschicht (NiP) in Kombination mit Diamendrehen und Politurprozessen gefertigt werden. Nach der Politur wurde eine Oberflächenrauheit besser als 1 nm rms nachgewiesen. Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der amorphen NiP-Schicht und des AlSi-Substrats sind besser als 0,5 ppm angepasst.

Um eine hohe Reflektivität in Zusammenhang mit einer hohen Lasererzörschwelle (LIDT) zu erzielen, die für eine Verwendung in Scanspiegeln benötigt wird, wurde die hohe Reflektivität von Metallschichten mittels dielektrischer

Scanning mirrors for ultrashort pulse-applications must have small mechanical inertia and a small mirror mass to allow very fast and precise positioning of the pulses. Due to the high acceleration, there are stringent demands on the stiffness of the mirrors. Moreover a high quality optical surface is required. Ultraprecise metal mirrors are an attractive solution that fulfils these requirements ^{1/}. In addition, the easy and cost-effective manufacturing technology is an important advantage in comparison to alternatives such as glass-, glass-ceramics-, and ceramic-mirrors.

At Fraunhofer IOF scan mirrors were manufactured from AlSi-composite material. Ultraprecise AlSi based lightweight mirrors with high surface quality can be manufactured by applying electroless deposited nickel (NiP) platings in combination with diamond turning and polishing. A surface roughness lower than 1 nm rms was achieved after polishing. The amorphous NiP and the AlSi alloy are thermally matched better than 0.5 ppm.

In order to achieve high reflectivity values in combination with a high laser damage threshold (LIDT) suitable for scan mirrors, the high reflectivity of metal-layers was enhanced by dielectric HfO₂/SiO₂ stacks. These coatings are considerably thinner than all dielectric high-reflective coatings and have

¹ Dielektrisch verstärkte ultraleichte Metallspiegel für schnelle Galvanoscanner. |

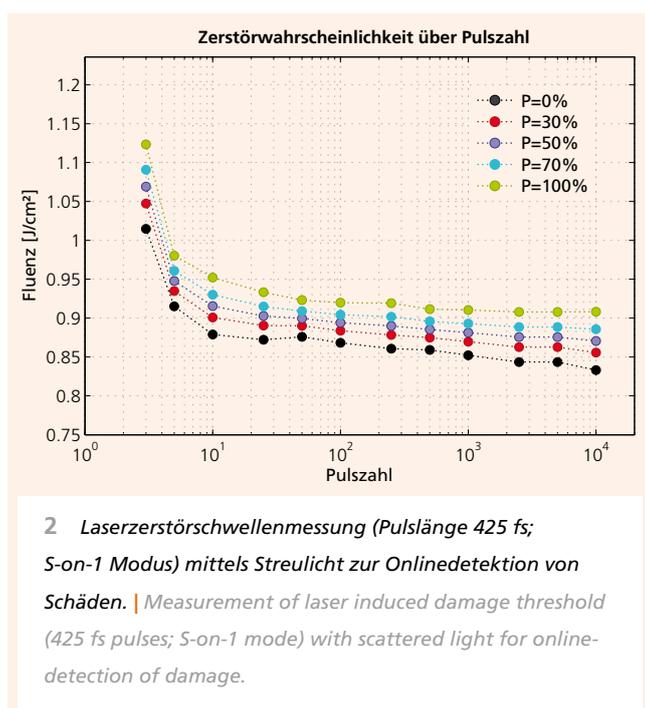
Ultralightweight metal mirrors with dielectrically enhanced metal coating for fast galvanoscanners.

HfO₂/SiO₂-Schichtstapel weiter erhöht. Diese Beschichtungen sind dünner als rein dielektrische Beschichtungen und mit ihnen lässt sich eine hinreichend hohe Laserzerstörschwelle besser als 1 J/cm²@8ps erreichen. Die Zerstörswellen wurden bei einer Wellenlänge von 1030 nm mittels eines hochempfindlichen streulichtbasierten Aufbaus gemessen.

sufficiently high damage thresholds above 1 J/cm²@8ps. The damage measurements were performed at a wavelength of 1030 nm.

References / Literatur

/1/ Schürmann, M.; Risse, S.; Kämmer, H. et al.: Metal mirrors with metal-dielectric HR-coating for ultrashort laser pulses applied in scanner applications. In: Proceedings of SPIE 9351, 93510S-1 (2015).

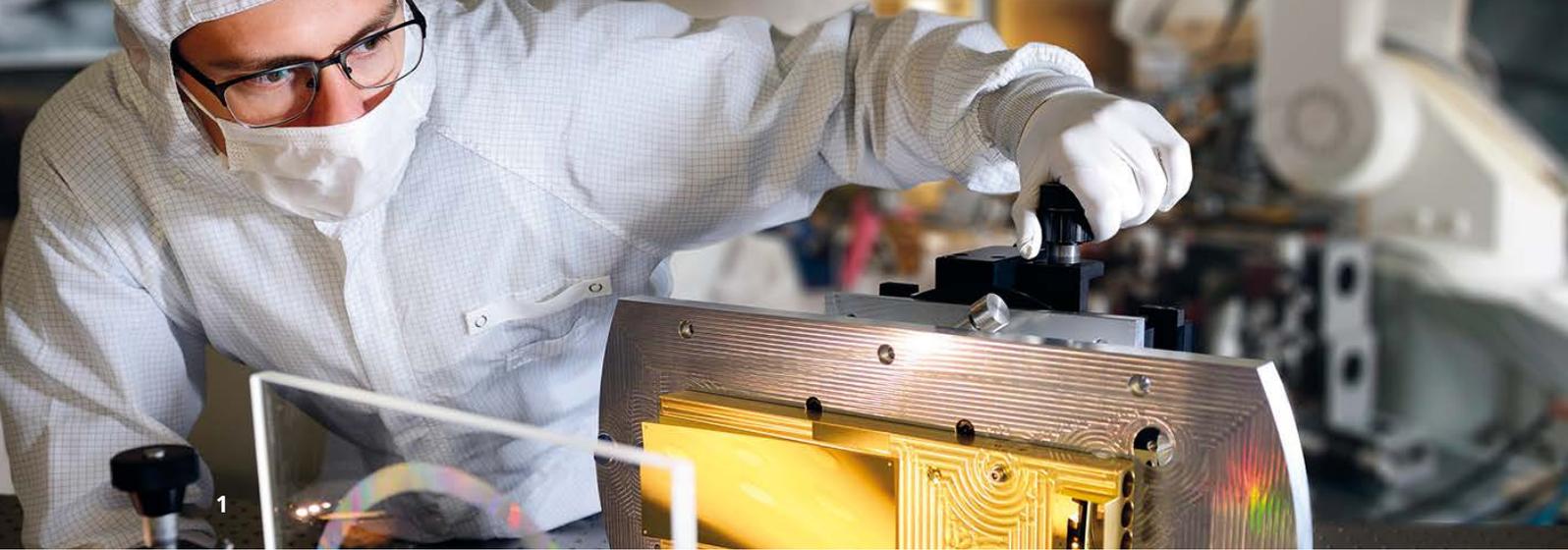


AUTHORS

Mark Schürmann
Stefan Risse
Helena Kämmer
Sandra Müller
Ralph Schlegel

CONTACT

Dr. Mark Schürmann
Phone +49 3641 807-322
mark.schuermann@iof.fraunhofer.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. Coordinated 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

- Coating and surface functionalization
- Laser-based manufacturing processes
- Laser development
- 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

- Dismantle and disconnect
- Imaging and illumination
- Joining and generating
- Lightsources and lasersystems
- Lithography
- Material testing and analytics
- Medical technology and biophotonics
- Microsystems 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

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-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-

- Optical systems and instruments
- Tool- and mouldmaking

Contact

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

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

www.light-and-surfaces.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 Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP

The Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP is developing innovative solutions in the fields of vacuum coating, surface modification, and organic semiconductors. Work areas are based on core competences such as electron beam technology, sputtering technology, plasma activated high-rate deposition and high-rate PECVD,



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

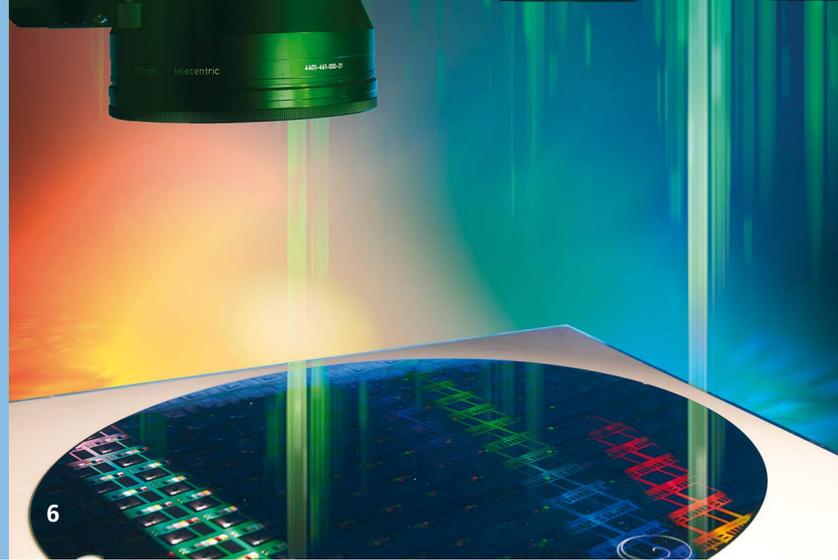
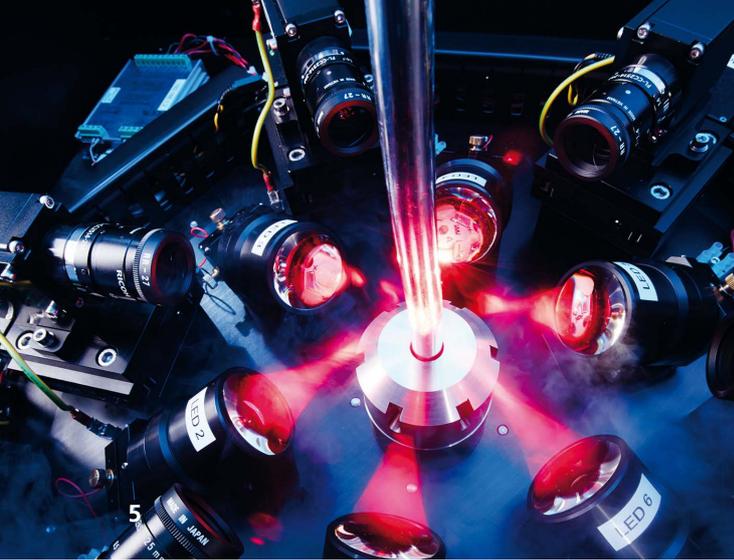
as well as technologies for organic electronics, and IC-/system-design. Our technologies and processes are used in the fields of mechanical engineering, transport, biomedical technics, architecture, preservation of cultural assets, packaging industry, environment and energy, sensors and electronics, as well as in agriculture.
www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT

More than 400 patents since 1985 makes Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT one of the most important research institutes for the industry to develop laser beam sources, laser technologies, and laser systems. Our technology areas cover the following topics: laser and optics, medical technology and biophotonics, laser measurement technology, and laser materials 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

The Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films as an innovative R & D partner provides solutions in surface engineering, which are developed in cooperation with customers from industry and research. The „product“ is the surface which is optimized by modification, structuring and / or coating for applications in the following business areas: Engineering, Tools and Automotive Industry, Aerospace, Energy and Electronics, Environment and Optics, and Life Science. The expertises of the Fraunhofer IST in the film production and coating application are supported by simulating the vacuum-based coating processes and by appropriate coating and surface analysis.
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-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 Physical Measurement Techniques IPM

Fraunhofer IPM develops tailored metrology, systems, and materials for industry. We enable our customers to improve their energy and resource management, and maximize their quality and reliability at the same time. Fraunhofer IPMs solutions turn processes more ecological as well as economical efficient. Many years of experience with optical technologies and functional materials provide high-tech solutions in production control, material characterization and testing, object and shape acquisition, gas and process technologies, and in the field of functional materials and systems.

www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS

The Fraunhofer IWS is known for its innovations in the business areas joining and cutting as well as in surface and coating technology. Our overarching cross-cutting issues are: energy storage, energy efficiency, additive manufacturing, lightweight construction, and big data. The special feature of the Fraunhofer IWS is the combination of extensive expertise in materials engineering with comprehensive experience in the development of technologies and systems engineering. Every year, numerous solutions in the field of laser material processing and film 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 67 Institute und Forschungseinrichtungen. 24 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2,1 Milliarden Euro. Davon fallen über 1,8 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Mehr als 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

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

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

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 67 institutes and research units. The majority of the nearly 24,000 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of more than 2.1 billion euros. Of this sum, more than 1.8 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 Länder 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

Minister Sigmar Gabriel

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Germany

Ministerpräsident Bodo Ramelow

Freistaat Thüringen, Germany

Minister Wolfgang Tiefensee

Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft, Germany

Ralph Lenkert

Mitglied des Deutschen Bundestags, Germany

Norbert Lindlein

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,
Max-Planck-Institut Erlangen, Germany

Yvan Bruynseraede

University of Leuven, Belgium

Dae Wook Kim

University of Arizona, USA

Yariv Shamir

Applied Physics Division, Soreq NRC, Israel

Yagi Tetsuya

Osaka University, Japan

Jennifer Decker

Botschaftsrätin Wissenschaft und Technologie,
Kanadische Botschaft in Berlin

JIA Ping

President of CIOMP, Changchun, China

Wim Leemans

LBL Lawrence Berkeley National Lab, California, USA

Gerd Leuchs

Max-Planck-Institut Erlangen, Germany

Thomas Stöhlker

GSI Atomic Physics Group, Darmstadt, Germany

Internationale Kooperationen |

International Co-operations

Austria

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

Institut für Biomedizinische Technik der Fachhochschule
Technikum Wien, Andreas Drauschke

Belgium

Katholieke Universiteit Leuven, Jeroen Lammertyn

Brazil

University of Porto Alegre, Institute for Physics, Flavio Horowitz

LEFT *Branchengespräch Optik und Photonik am Fraunhofer IOF: Prof. Dr. Andreas Tünnermann präsentiert Thüringens Ministerpräsident Bodo Ramelow vom Insektenauge inspirierte Mikrooptiken. | Meeting of the local optics and photonics industry at the Fraunhofer IOF: Prof. Dr. Andreas Tünnermann presents the Prime Minister of Thuringia Bodo Ramelow a micro-optics prototype inspired by the insect eye.*

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Canada

University of Toronto, Peter Herman, Aaron Wheeler

Université Laval, Réal Vallée

INRS Varennes, Francois Légaré, Roberto Morandotti

Czech Republic

Brno University of Technology, Miloslav Ohlidal

France

École Polytechnique, Paris, Gèrard Mourou

Great Britain

Imperial College London, Molly Stevens

National Physical Laboratory, Teddington, London,
Nigel Jennett

University of Oxford,

Martin Booth, Simon Hooker, Roman Walczak, Andrei Seryi

Indonesia

Institute for Technology Bandung, Aleksander Iskander

Israel

Soreq NRC, Yehuda Nafcha, Yoav Sintov, Bruno Sfez

Weizmann-Institut für Wissenschaften, Rehovot,
Yaron Silberberg

Technion, Haifa, Moti Segev

Italy

Sapienza University of Rome, Francesco Michelotti

Insubria University, Paolo Di Trapani

Politecnico di Torino, Fabrizio Georges

University of Turin, Federico Bussolino

Japan

University of Tokyo, Kazuo Kuroda

People's Republic of China

Tongji University, Xinbin Cheng

CIOMP, Changchun, JIA Ping, ZHANG Xuejun

Republic of South Africa

University Stellenbosch, Siyavuya Bulani

Russia

Space Research Institute Moscow, Alexander Yascovich

Spain

ICFO Barcelona, Romain Quidant, Valerio Pruni

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Andoni Moral

Centro de Astrobiología, Universidad de Valladolid,
Antonio Sansano

Switzerland

École Polytechnique de Lausanne,
Theo Lasser, Hans-Peter Herzig

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Ursula Keller

United States of America

Lawrence Livermore National Laboratory, Constantin Haefner

Lawrence Berkeley National Laboratory,
Wim Leemans, Carl Schroeder

CREOL, Martin Richardson

Messebeteiligungen | Fairs Participations

PARIS SPACE WEEK

4.–5.2.2015, Paris-Orly Airport, France

Photonics West

7.–12.2.2015, San Francisco, USA

HANNOVER MESSE

13.–17.4.2015, Hannover, Germany

Control

5.–8.5.2015, Stuttgart, Germany

Firmenkontaktbörse der FSU Jena

5.5.2015, Jena, Germany

International Paris Air Show

15.–21.6.2015, Paris Le Bourget, France

LASER World of PHOTONICS

22.–25.6.2015, München, Germany

SPIE Optical Systems Design

7.–10.9.2015, Jena, Germany

Eurodisplay

21.–23.9.2015, Ghent, Belgium

Ausbildungsmesse »Vocatium«

1.10.2015, Jena, Germany

Advanced Solid State Lasers

4.–8.10.2015, Berlin, Germany

BIOTECHNICA

6.–8.10.2015, Hannover, Germany

Firmenkontaktbörse der Ernst-Abbe-Hochschule Jena

21.–22.10.2015, Jena, Germany

MikroSystemTechnik Kongress und Ausstellung

26.–28.10.2015, Karlsruhe, Germany

Karrieremesse »Inova«

27.–28.10.2015, Technische Universität Ilmenau, Germany

Aus- und Weiterbildung I 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.

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 der Bildverarbeitung

Qualitätsmanagement

Technische Universität Ilmenau

Prof. Dr. Andreas Tünnermann/Dr. Olaf Stenzel

Thin Film Optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Doktorandenseminar der Abbe School of Photonics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

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

Atom- und Molekülphysik

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Stefan Nolte

Ultrafast optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Jens Limpert

Grundlagen der Laserphysik

Friedrich-Schiller-Universität Jena

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

Laser Physics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Herbert Gross

Advanced lens design

Design & correction of optical systems

Fundamentals of microscopic imaging

Imaging and aberration theory

Friedrich-Schiller-Universität Jena

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Prof. Dr. Thomas Pertsch

Astro Photonics

Computational photonics

Computational Physics I

Fundamentals of modern optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. habil. Uwe Detlef Zeitner

Micro- and Nano-Technology

Introduction to Optical Modelling

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Konferenzen – Workshops – Events |

Conferences – Workshops – Events

Internationales Jahr des Lichts

17.1.2015, LICHTphänomene, Auftaktveranstaltung

15.–18.4.2015, Optikexperimente zum Anfassen

22.–26.9.2015, Highlights der Physik

SPIE Advanced Lithography

22.–26.2.2015, San Jose, CA, USA

DPG Symposium Plasma und Optische Technologien

3.3.2015, Bochum, Germany

19-th European OptiLayer Workshop

16.–18.3.2015, Garching bei München, Germany

VDI Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik

17.–18.3.2015, Nürtingen bei Stuttgart, Germany

2nd International Symposium on Microoptical Imaging and Projection - MIPS 2015

24.–26.3.2015, Jena, Germany

OptoNet-Seminar ADVANCED LENS DESIGN

25.–27.3.2015, Tagungshotel Großebersdorf, Germany

2015 SVC TechCon

27.–30.4.2015, Santa Clara, CA, USA

SPIE Optics+Photonics

9.–13.8.2015, San Diego, CA, USA

SPIE Optical Systems Design

7.–10.9.2015, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Germany

Photonik-Akademie Jena

14.–18.9.2015, Jena, Germany

Eurodisplay. Conference and exhibition

21.–23.9.2015, Ghent, Belgium

Advanced Solid State Lasers

4.–8.10.2015, Berlin, Germany

Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik

12.–15.10.2015, Dresden, Germany

MikroSystemTechnik

26.–28.10.2015, Karlsruhe, Germany

3Dsensation Workshop für Beiratstreffen

20.11.2015, Jena, Germany

IRTG Guided Light, Tightly Packed

12.–14.11.2015, Toronto, Canada

Fraunhofer-Allianz VISION »Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion«

25.–26.11.2015, Jena, Germany

Preise | Prizes

ERC Advanced Grant, Andreas Tünnermann

Preisträger im Wettbewerb »Ausgezeichneter Ort im Land der Ideen 2015«, Peter Kühmstedt

Rudolf-Kingslake-Award 2014 (überreicht September 2015), Stefan Heist, Andreas Mann, Peter Kühmstedt, Peter Schreiber und Gunther Notni

Green Photonics Sonderpreis Thüringen (STIFT), Martin Heilemann (Masterarbeit), Sven Döring (Dissertation)

Dissertationspreis der Physikalisch-Astronomischen-Fakultät der FSU Jena, Falk Eilenberger

Ehrenurkunde für die besten Auszubildenden der FhG und Prüfungsbeste 2015 der IHK Gera, Anna Franziska Gottwald

Beste Studienabschlussarbeit im Bereich Ingenieurwesen 2015, VDI Thüringen, Eric Müller

Bachelorarbeiten I Bachelor Theses

Toni Bauer

Mikro- und Nanostrukturierung von Diamant mit dem Helium-Ionen-Mikroskop

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2015

Manuel Ehrenberger

Herstellung und Charakterisierung von Preformen für angepasste passive Glasfasern

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 10/2015

Phillipp Gierschke

Charakterisierung transversaler Moden in optischen Glasfasern mittels räumlich und spektral aufgelöster Interferometrie (S^2 -Messung)

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 08/2015

Sandra Günther

Untersuchung des Einflusses von hydrophoben Beschichtungen auf die Reinigungsbeständigkeit von Antireflexstrukturen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 06/2015

Denny Hadlich

Charakterisierung eines handgehaltenen 3D-Scanners für Anwendungen im Außenbereich

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 10/2015

Dave Horn

Aufbau, Inbetriebnahme und Charakterisierung einer Vorrichtung zur gezielten Einstellung der Ebenheit optischer Substrate im sub- μm -Bereich

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 09/2015

Clemens Kloß

Electrical characterization and study of THz-Emission from monocrystalline silicon

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2015

Patrick Kömpf

Inkjet-Druck polymerbasierter Opferschichten zur Erzeugung 2,5-dimensionaler Strukturen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 09/2015

Fabian Lami

Mikrocontrollergesteuerter Impulsbetrieb von Leistungs-LEDs

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 03/2015

Kim Alina Lammers

Untersuchungen zur Ladungsträgerdynamik in Doppelpulsversuchen mit ultrakurzen Laserpulsen

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2015

Wilko Middents

Spektrale Stabilisierung von Laserdioden mittels ultrakurzpuls-geschriebener Volumen-Bragg-Gitter in Kieselglas

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2015

Friedrich Möller

Development of an FTIR spectrometer for the characterization of photonic nanostructures

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2015

Sebastian Müller

Erweiterte Anwendung eines mehrkanaligen Near-To-Eye Displays als Diagnosegerät für Fehlsichtigkeiten

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 05/2015

Konrad Naumann

Untersuchung von induzierten Spannungen an direkt gefügten Kristallen

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2015

Tom Pertermann

Mikrostrukturierung von Glas mit ultrakurzen Laserpulsen

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2015

Conrad Rößler

Untersuchungen zur zerstörungsfreien 3D-Formvermessung mittels eingepprägter Wärmemuster

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2015

Alexander Wiede

Fehlerkompensation an einem 5-Achs-Positioniersystem

Technische Universität Ilmenau, 08/2015

Sönke Ziemer

Comparison of propagation models of ultrashort pulses

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2015

Masterarbeiten | Master Theses

Ernest Ahiavi

Nucleation Studies and Nanolaminates for x-Ray mirrors
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/2015

Nils Becker

Adaptive pulse measurement using a pulse shaper
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 10/2015

Jan-Michael Feustel

Untersuchung amorpher Siliziumschichten hinsichtlich der mechanischen Bearbeitbarkeit
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 01/2015

Méabh Garrick

Spectrally Resolved Laser-induced Damage Testing
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2015

Li Guangrui

Gold nanostructures fabricated by nanosphere lithography
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07/2015

Nico Hagen

Konzeption und Validierung einer hochgenauen Justagemethode für die Step-and-Repeat-UV-Replikation
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 12/2015

Christoph Hebig

Untersuchung eines Projektionssystems für aktive Triangulationsverfahren basierend auf diffraktiven optischen Elementen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 06/2015

Fabian Heisler

Characterization and application of the resonant properties of out-diffused silver nanoislands
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2015

Tobias Hermeyer

Design und Charakterisierung eines flachbauenden Multiaperturmikroskops mit hohem Auflösungsvermögen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 06/2015

Robert Ihl

Erzeugung einer polierfähigen Oxidschicht auf Al6061
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 12/2015

Nancy Kaufmann

Untersuchung der Reproduzierbarkeit der optischen

Eigenschaften von SiO₂- und Nb₂O₅-Einzelschichten, hergestellt mittels PEM geregeltem reaktiven Magnetronsputtern

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 03/2015

Teresa Kopf

Konzeptionierung, Auslegung und Auswertung kinematischer Lagerungen für die Waferleveljustage
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 04/2015

Chang Liu

Design of a near-infrared broadband microscopic objective
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/2015

Diinesh Lokanathan

Investigations of induced aberrations in optical systems
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2015

Gregor Matz

Correction of microscopic endoscope objectives
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/2015

Sergii Morozov

Relaxation dynamics of quantum systems in the vicinity of plasmonic structures
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/2015

Marcin Olecki

Dynamic low-order correction by active optical compensators
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/2015

Rafael Quintero-Bermudez

Parametric frequency conversion in nanostructured waveguides
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2015

Marc Reig Escalé

Mapping the guided light distribution in nanowires
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 03/2015

Olga Rodenko

Autofluorescence modeling in microscopy
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 03/2015

Immam Setiawan Wahyutama

Table-Top Coherent Imaging - Towards Nanometer Resolution
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/2015

Evgeny Shestaev

Femtosecond oscillators for non-steady-state enhancement cavities

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07/2015

Svetlana Shestaeva

Atomic layer deposition of dielectric materials for optical coatings

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/2015

Getnet Kassa Tadesse

Spectral Beam Combining by Femtosecond Laser Written 2D Volume Bragg Gratings in Fused Silica

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/2015

Maxim Tschernajew

High Harmonic Sources

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 10/2015

Xiaohan Wang

Field enhancement using plasmonic nanoparticles and their use in integrated optical spectroscopy

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/2015

Tobias Weihs

Aufbau und Charakterisierung eines Head-Up Displays mit Arrayprojektionsoptik

Universität Göttingen, 06/2015

Michal Wojdyr

Investigations of novel schemes of spatial and temporal combining of ultrashort pulses

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 10/2015

Norman Worku

Simulation of pulse propagation through optical systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/2015

Yueqian Zhang

Design of camera lens for vision sensor

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 10/2015

Dissertationen | Dissertations

Dr.-Ing. Anika Brahm

Terahertz-Computer-Tomographie mit Zeitbereichs-spektroskopie-Systemen

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/2015

Dr.-Ing. Andreas Breitbarth

Entwicklung von Methoden zur optischen 3D-Vermessung in Bewegung

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/2015

Dr. rer. nat. Stefan Demmler

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

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2015

Dr. rer. nat. Wiebke Eckstein

Computergenerierte Hologramme auf Basis binärer Subwellenlängenstrukturen

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/2015

Dr.-Ing. Nils Heidler

Untersuchungen zylindrischer Gasführungselemente für Hochvakuumanwendungen

Technische Universität Ilmenau, 11/2015

Dr. rer. nat. Tobias Herffurth

Light scattering and roughness analysis of optical surfaces and thin films

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/2015

Dr.-Ing. Christoph Thomas Jocher

Generation, Amplification and Characterization of Cylindrical Vector Beams in Optical Fibers

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/2015

Dr. rer. nat. Robert Kammel

Tailored Femtosecond Laser Structuring for Intraocular Surgery

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/2015

Dr. rer. nat. Angela Klein

Scanning near-field optical microscopy: from single-tip to dual-tip operation

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/2015

Dr.-Ing. Nicolas Lange

Lithografisch hergestellte, polymerbasierte elektrostatische Aktuatoren ohne Pull-In-Effekt

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07/2015

Dr.-Ing. Reinhold Lehneis

Pulse shortening of passively Q-switched microchip lasers

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/2015

Dr. rer. nat. Peter Lutzke

Untersuchungen zur optischen 3D-Vermessung von transluzenten Objekten mittels aktiver Triangulation

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07/2015

Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Otto

Transverse mode instabilities in high-power fiber-laser systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/2015

Dr. rer. nat. Stephan Ratzsch

Untersuchung der plasmaunterstützten Atomlagenabscheidung für das Auftragen von optischen Schichten

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/2015

Dr. rer. nat. Stefan Steiner

Richtungsselektive optische Filterelemente auf Basis von Gitterstrukturen

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/2015

Dr. rer. nat. Lorenz Stürzebecher

Beugungslithographie zur Fertigung optischer Nanostrukturen

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/2015

Dr. rer. nat. Fabian Stutzki

Yb- and Tm-based ultrashort-pulse fiber-laser systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/2015

Dr. rer. nat. Marcus Trost

Light scattering and roughness properties of optical components for 13.5 nm

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/2015

Dr. rer. nat. Christian Voigtländer

Bandwidth control of femtosecond pulse written fiber Bragg gratings

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 03/2015

Schutzrechte I Intellectual Property

Patentoffenlegungen I Patent First Publications

Eckstein, C.; Zeitner, U.

Elektromagnetische Strahlung streuendes Element

EP 2 959 331 A1; US 2015-036437/0407; CN 105074511

Fuchs, F.; Zeitner, U.D.; Kley, E.-B.

Beugungsgitter und Verfahren zu dessen Herstellung

EP 2 820 453 A1; US 2015-0022893 A1

Fuchs, F.; Zeitner, U.

Reflexionsbeugungsgitter und Verfahren zu dessen Herstellung

EP 2 839 325 A1; US 2015-0109672 A1

Gäbler, D.; Kaiser, N.; Ohl, A. (INP Greifswald); Köpp, D. (INP); Foest, R. (INP); Harhausen, J. (INP)

Plasma-ionengestütztes Beschichtungsverfahren und Plasmasonde

DE 10 2013 110 722 A1

Kaiser, N.; Schulz, U.; Rickelt, F.; Munzert, P.

Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht auf einer Silikonoberfläche und optisches Element

DE 10 2014 105 939 A1; US 2015-0309214; JP 2015-210531

Klenke, A.; Otto, H.-J.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

Optische Anordnung mit Strahlaufteilung

DE 10 2014 001 252 A1

Lutzke, P.; Schmidt, I.

Vorrichtung, Aufsatz und Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung von statischen und dynamischen Objektoberflächen

DE 10 2013 012 939 A1

Nolte, S. (IAP); Döring, S. (IAP); Brahm, A.; Willms, A.; Notni, G.

Verfahren und System zur Erzeugung von breitbandigen Antireflexstrukturen für den Terahertz-Frequenz-Bereich

DE 10 2014 200 742 A1

Oberdörster, A.

Mehrkanaloptik-Bildaufnahmevorrichtung

DE 10 2013 226 789 A1

Schreiber, P.; Sieler, M.; Kraus, M.

Projektionsdisplay für virtuelle Bilder mit Mehrkanaloptik

US 2015-0085256 A1; SG 11201406172 R; CN 104321680;
JP 2015-518575

Schulz, U.; Rickelt, F.; Bruynooghe, S. (Zeiss); Tonova, D. (Zeiss);
Koch, T. (Zeiss)

**Verfahren zur Herstellung eines reflexionsmindernden
Schichtsystems und reflexionsminderndes Schichtsystem**

DE 10 2014 100 769 A1

Sieler, M.; Schreiber, P.

**Projektionsdisplay mit Mehrkanaloptik mit nicht kreisförmiger
Gesamtaperatur**

US 2015 0062446 A1

Steglich, M. (IAP); Kley, E.-B.; Käsebier, T. (IAP); Lehr, D. (IAP)

Strahlungsabsorber auf Siliziumbasis

DE 10 2013 108 288 A1

Szameit, A.; Gräfe, M.; Heilmann, R.; Perez-Leija, A.; Nolte, S. (IAP)

**Verfahren und Vorrichtung zur Generierung von
Zufallszahlen**

DE 10 2014 202 312 A1

Tünnermann, A.; Limpert, J.; Jansen, F. (IAP); Eidam, T. (IAP);
Jauregui, C. (IAP); Otto, H.-J. (IAP); Stutzki, F. (IAP)

**Mitigation of Mode Instabilities in high-average power
waveguide laser systems**

EP 2 837 072 A1

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.

**Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und
Verfahren zur Herstellung derselben**

EP 2 920 636 A1

Yulin, S.; Nesterenko, V.; Kaiser, N.

Multilayer-Spiegel für den EUV- Spektralbereich

EP 2 864 825 A1

Patenterteilungen | Patent Assignations

Bruchmann, C.; Beckert, E.; Peschel, T.; Damm, C.

**Adaptiver deformierbarer Spiegel zur Kompensation von
Fehlern einer Wellenfront**

EP 2 269 106 B1

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

**Multiperturkamera mit optimierter Tiefenaufklärung und
Unterbringung an Stirnseite eines Bildschirmgeräts**

DE 10 2014 213 371.8 B3

Fuchs, F.; Zeitner, U.

**Reflexionsbeugungsgitter und Verfahren zu dessen
Herstellung**

DE 10 2012 103 443 B4

Heist, S. (IAP); Kühmstedt, P.; Notni, G.

Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung einer Oberfläche

DE 10 2013 013 791 B4

Kalkowski, G.; Risse, S.; Peschel, T.; Damm, C.

Flexibel verformbares Halteelement für Substrate

DE 10 2008 052 100.0 B4

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

Mikrostrukturierte Großkernfaser

US 9,170,368 B2

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Seise, E. (IAP); Eidam, T. (IAP);
Schimpf, D.; Röser, F.

**Vorrichtung zum Verstärken und/oder Transportieren von
elektromagnetischer Strahlung**

US 8,982,453 B2

Limpert, J.; Nodop, D.; Misas, C.-J.; Tünnermann, A.

**Verfahren zur effizienten Frequenzkonversion in optischen
Fasern**

EP 2 656 141 B1; US 9,057,928 B2

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Cesar, J.; Stutzki, F. (IAP);
Jansen, F. (IAP)

Reduzierung Moden höherer Ordnung

US 9,065,245 B2

Nopod, D.; Steinmetz, A.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

Lasersystem mit nichtlinearer Kompression

US 8,948,219 B2

Notni, G.; Kühmstedt, P.; Schreiber, P.; Sieler, M.; Breitbarth, A. (IAP)
Projektionssystem mit statischen Mustererzeugungselementen und mehreren optischen Kanälen zur optischen 3D-Vermessung
DE 10 2012 206 472 B4

Schulz, U.; Kaiser, N.; Munzert, P.; Ludwig, H. (IAP)
Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht auf einem Substrat und Substrat mit einer Entspiegelungsschicht
DE 10 2013 103 075 B4

Sieler, M.; Förster, E.; Schreiber, P.
Projektionsdisplay und dessen Verwendung
EP 2 443 506 B1

Sieler, M.; Schreiber, P.; Förster, E.
Projektionsdisplay und Verfahren zum Anzeigen eines Gesamtbilds
JP 5719650

Steiner, S.; Kley, E.-B.
Optischer Filter mit einem resonanten Wellenleitergitter
DE 10 2011 084 055.9 B4

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.
Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen einer Struktur, Abformwerkzeug
US 8,945,458 B2; JP 5819828

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.
Verfahren zum Herstellen einer Struktur, optisches Bauteil, optischer Schichtstapel
DE 10 2009 055 088.7 B4; JP 5731507

Wippermann, F.; Lange, N.; Reimann, A.; Bräuer, A.
Polymere optische Komponenten mit integrierten mechanischen Strukturen mit thermisch induzierter, axialer Positionsänderung
DE 10 2013 209 814 B4

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben
DE 10 2013 209 823 B4

Yulin, S.; Feigl, T.; Benoit, N.; Kaiser, N.
Thermisch stabiler Multilayer-Spiegel für den EUV-Spektralbereich
DE 10 2006 006 283.3 B4

Yulin, S.; Nesterenko, V.; Kaiser, N.
Multilayer-Spiegel für den EUV- Spektralbereich
DE 10 2012 105 369.3 B4

[Gebrauchsmustererteilung | Utility Patent Assignment](#)

Oberdörster, A.
Bildverflechtung ohne Speicherpuffer
GBM DE 20 2013 012 088.6

Wissenschaftliche Publikationen | Scientific Publications

Bücher | Books

Burmeister, Frank; Steenhusen, S.; Houbertz, R.; Asche, T. S.; Nickel, J.; Nolte, Stefan; Tucher, N.; Josten, P.; Obel, K.; Wolter, H.; Fessel, S.; Schneider, A. M.; Gärtner, K.-H.; Beck, C.; Behrens, P.; Tünnermann, A.; Walles, H.

Two-photon polymerization of inorganic-organic polymers for biomedical and microoptical applications

Optically Induced Nanostructures - Biomedical and technical applications, S. 239-265, ISBN 9783110354324

Coriand, Luisa; Rettenmayr, Markus; Duparré, Angela

Relationship Between the Roughness and Oleophilicity of Functional Surfaces

Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion, S. 165-179, ISBN 9781118472927

Dreisow, F.; S. Döring, A. Ancona, J. König, S. Nolte

Drilling with Ultrashort Laser Pulses at High Repetition Rates

Ultrashort Pulse Laser Technology - Laser Sources and Applications, S. 175-200, ISBN 9783319176581

Füchsel, Kevin; Kroll, Matthias; Otto, Martin ; Martin Steglich, Martin; Bingel, Astrid; Käsebier, Thomas; Wehrspohn, Ralf B.; Kley, Ernst-Bernhard; Pertsch, Thomas; Tünnermann, Andreas

Black Silicon Photovoltaics

Photon Management in Solar Cell, S. 117-144, ISBN 9783527411757

Heinrich, M.; S. Nolte, A. Szameit

Nonlinear light propagation in laser-written waveguide arrays

Planar waveguides and other confined geometries: Theory, Technology, Production and Novel Applications, S. 185-206, ISBN 9781493911790

Limpert, J.; T. Eidam, M. Baumgartl, F. Röser, M. Plötner, B. Ortaç, S. Nolte, A. Tünnermann

Compact Ultrafast Oscillators and High Performance Ultrafast Amplifiers Based on Ytterbium-Doped Fibers

Ultrashort Pulse Laser Technology - Laser Sources and Applications, S. 75-91, ISBN 9783319176581

Richter, S. M. Heinrich, F. Zimmermann, C. Vetter, A. Tünnermann, S. Nolte

Nanogratings in Fused Silica: Structure, Formation and Applications

Progress in Nonlinear Nano-Optics, S. 49-71, ISBN 9783319122168

Schulz, Ulrike; Rickelt, Friedrich; Munzert; Peter; Kaiser, Norbert; Ludwig, Henning

Organische Nanostrukturen zur Entspiegelung optischer Oberflächen

Jahrbuch der Optik und Feinmechanik 2015, S. 53-68, ISBN 9783000494031

Stenzel, Olaf

Simulation der optischen Konstanten von PVD-Mischschichten auf der Basis klassischer Mischmodelle

Simulation in der Dünnschichttechnik, S. 33-46, ISBN 9783959000383

Stenzel, Olaf

The Physics of Thin Film Optical Spectra. An Introduction

Springer Series in Surface Sciences 44, ISBN 9783319216010

Zimmermann, F.; S. Richter, R. Buschlinger, S. Shukla, R. Heintzmann, U. Peschel, S. Nolte

Ultrashort pulse-induced periodic nanostructures in bulk glass: from fundamentals to applications in high-resolution microscopy

Optically induced nanostructures - Biomedical and technical applications, S. 93-115, ISBN 9783110337181

Zeitschriften | Journals

Alaee, R.; Lehr, D.; Filter, R.; Lederer, Falk; Kley, Ernst-Bernhard; Rockstuhl, Carsten; Tünnermann, Andreas
Scattering Dark States in Multiresonant Concentric Plasmonic Nanorings
ACS Photonics 2 (2015) 8, p. 1085-1090,
ISSN 23304022

Bauer, Franziska; Michalowski, Andreas; Kiedrowski, Thomas; Nolte, Stefan
Heat accumulation in ultra-short pulsed scanning laser ablation of metals
Optics Express 23 (2015) 2, p. 1035-1043, ISSN 1094-4087

Beier, Matthias; Hartung, Johannes; Peschel, Thomas; Damm, Christoph; Gebhardt, Andreas; Scheiding, Sebastian; Stumpf, Daniela; Zeitner, Uwe; Risse, Stefan; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas
Development, Fabrication and Testing of an Anamorphic Imaging Snap-Together Freeform
Applied Optics 54 (2015) 12, p. 3530-3542,
ISSN 1559128X

Blumröder, Ulrike; Steglich, Martin; Schrepel, Frank; Hoyer, Patrick; Nolte, Stefan
THz emission from argon implanted silicon surfaces
Physical Status, Solidi B 252 (2015) 1, p. 105-111,
ISSN 03701972

Bourgin, Yannick; Siefke, Thomas; Käsebier, Thomas; Genevée, Pascal; Szeghalmi, Adriana; Kley, Ernst-Bernhard; Zeitner, Uwe
Double-sided structured mask for sub-micron resolution proximity i-line mask-aligner lithography
Optics Express 23 (2015) 13, p. 16628-16637,
E-ISSN 10944087

Bräuer-Burchardt, Christian; Heinze, Matthias; Schmidt, Ingo; Kühmstedt, Peter; Notni, Gunther
Underwater 3D surface measurement using fringe projection based scanning devices
Sensors 16 (2015) 1, Article Number 13, ISSN 14248220

Bräuer-Burchardt, Christian; Kühmstedt, Peter; Notni, Gunther
High-speed surface acquisition - Current developments in fringe projection technique
Allg. Vermessungs-Nachrichten (2015) 1, p. 11-21,
ISSN 00025968

Breitkopf, Sven; Eidam, Tino; Klenke, Arno; Carstens, Henning; Holzberger, Simon; Fill, Ernst E.; Schreiber, Thomas; Krausz, Ferenc; Tünnermann, Andreas; Pupeza, Joachim; Limpert, Jens
Stack and dump: Peak-power scaling by coherent pulse addition in passive cavities
European Physical Journal: Special Topics 224 (2015) 13,
p. 2573-2577, ISSN 19516355

Bruynooghe, Stephane; Tordova, Diana A.; Sundermann, Michael; Koch, T.; Schulz, Ulrike
Antireflection coatings combining interference multilayers and a nanoporous MgF₂ top layer prepared by glancing angle deposition
Surface and Coatings Technology 267 (2015), p. 40-44,
ISSN 02578972

Burkhardt, Thomas; Hornaff, Marcel; Burkhardt, Diana; Beckert, Erik
Optical path difference evaluation of laser-soldered optical components
Journal of European Optical Society 10 (2015), Article No. 15059, ISSN 19902573

Chung, H.; K. H. Huang, S. L. Yang, W. K. Chang, C. W. Wu, F. Setzpfandt, T. Pertsch, D. N. Neshev, Y. H. Chen
Adiabatic light transfer in titanium diffused lithium niobate waveguides
Optics Express 23 (24) (2015) p. 30641-50, ISSN 10944087

Chung, H.; W. K. Chang, C. H. Tseng, R. Geiss, T. Pertsch, Y. H. Chen
Electro-optically spectrum tailorable intracavity optical parametric oscillator
Optics Letters 40 (22) (2015) p. 5132-5135,
ISSN 01469592

Colonnier, Fabien; Manecy, Augustin; Juston, Raphaël; Mallot, Hanspeter; Leitel, Robert; Floreano, Dario; Viollet, Stéphane
A small-scale hyperacute compound eye featuring active eye tremor: Application to visual stabilization, target tracking, and short-range odometry
Bioinspiration and Biomimetics 10 (2015) 2, p. 1-18,
ISSN 17483182

Decker, M.; I. Staude, M. Falkner, J. Dominguez, D. N. Neshev, I. Brener, T. Pertsch, Y. S. Kivshar
High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces
Advanced Optical Materials 3 (6) (2015) p. 813-820,
ISSN 21951071

Dietz, R.; A. Brahm, A. Velauthapillai, A. Wilms, C. Lammers, B. Globisch, M. Koch, G. Notni, A. Tünnermann, T. Goebel, M. Schell

Low temperature grown photoconductive antennas for pulsed 1060 nm excitation: Influence of excess energy on the electron relaxation

Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves 36 (1) (2015) p. 60-71, ISSN 18666892

Diziain, S.; R. Geiss, M. Steinert, C. Schmidt, W.-K. Chang, S. Fasold, D. Fuessel, Y.-H. Chen, T. Pertsch

Self-suspended micro-resonators patterned in Z-cut lithium niobate membranes

Optical Materials Express 5 (9) (2015) p. 2081-2089, ISSN 21593930

Douglass, G.; F. Dreisow, S. Gross, S. Nolte, M. J. Withford

Towards femtosecond laser written arrayed waveguide gratings

Optics Express 23 (16) (2015) p. 21392-21402, ISSN 10944087

Dunkel, Jens; Wippermann, Frank; Reimann, Andreas; Brückner, Andreas; Bräuer, Andreas

Fabrication of microoptical freeform arrays on wafer level for imaging applications

Optics Express 23 (2015) 25, p. 31915-31925

Eidam, Tino; Kienel, Marco; Klenke, Arno; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Divided-pulse amplification for terawatt-class fiber lasers

European Physical Journal: Special Topics 224 (2015) 13, p. 2567-2571, ISSN 19516355

Errmann, Ronny; Minardi, Stefano; Labadie, Lucas; Muthusubramanian, Balaji; Dreisow, Felix; Nolte, Stefan; Pertsch, Thomas

Interferometric nulling of four channels with integrated optics

Applied Optics 54 (2015) 24, p. 7449-7454, ISSN 1559128X

Esslinger, Moritz; Gross, Herbert

Simulation of differential interference contrast microscopy and influence of aberrations

Journal of Microscopy 259 (2015) 1, p. 59-65, ISSN 00222720

Fedorov, S.; N. N. Rosanov, A. V. Chipouline, T. Pertsch

Hysteresis assisted narrowband resonances in a chain of nonlinear plasmonic arrays

JOSA B Optical Physics 32 (5) (2015) p. 824-837, ISSN 07403224

Franke, Christian; Stenzel, Olaf; Wilbrandt, Steffen; Wolf, Josephine; Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas

Estimation of the composition of coelectron-beam-evaporated thin-mixture films by making use of the Wiener bounds

Applied Optics 54 (2015) 9, p. 2362-2370, ISSN 07338724

Fruhnert, M.; F. Kretschmer, R. Geiss, I. Perevyazko, D. Cialla-May, M. Steinert, N. Janunts, D. Sivun, S. Hoepfner, M. D. Hager, T. Pertsch, U. S. Schubert, C. Rockstuhl

Synthesis, Separation, and Hypermethod Characterization of Gold Nanoparticle Dimers Connected by a Rigid Rod Linker

Journal of Physical Chemistry C 119 (31) (2015) p. 17809-17817, ISSN 19327447

Gaida, C.; Kienel, M.; Mueller, M.; Klenke, A.; Gebhardt, M.; Stutzki, F.; Jauregui, C.; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Coherent combination of two Tm-doped fiber amplifiers

Optics Letters 40 (2015) 10, p. 2301-2304, ISSN 01469592

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

Self-compression in a solid fiber to 24 MW peak power with few-cycle pulses at 2 μ m wavelength

Optics Letters 40 (22) (2015) p. 5160-5163, ISSN 01469592

Gebhardt, Martin; Gaida, C.; Haedrich, S.; Stutzki, F.; Jauregui, C.; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Nonlinear compression of an ultrashort-pulse thulium-based fiber laser to sub-70 fs in Kagome photonic crystal fiber

Optics Letters 40 (2015) 12, p. 2770-2773, ISSN 01469592

Gebhardt, Martin; Gaida, Christian; Stutzki, Fabian; Haedrich, Steffen; Jauregui, Cesar; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Impact of atmospheric molecular absorption on the temporal and spatial evolution of ultra-short optical

Optik Express 23 (2015) 11, p. 13776-13787, ISSN 10944087

Gebhardt, Sylvia; Ernst, Dörte; Bramlage, Bernhard; Pabst, Oliver; Oberdörster, Alexander

Micro-positioning stages for adaptive optics based on piezoelectric thick film actuators

Journal of Ceramic Science and Technology 06 (2015) 04, p. 285-290

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

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

Nanotechnology 27 (2015) p. 065301, ISSN 09574484

Geiss, R.; Saravi, S.; Sergeyev, A.; Diziain, S.; Setzpfandt, F.; Schrepel, Frank; Grange, R.; Kley, Ernst-Bernhardt; Tünnermann, Andreas; Pertsch, Thomas

Fabrication of nanoscale lithium niobate waveguides for second-harmonic generation

Optics Letters 40 (2015) 12, p. 2715-2718, ISSN 01469592

Geiss, Reinhard; Brandt, Juliane; Hartung, Holger; Tünnermann, Andreas; Pertsch, Thomas; Kley, Ernst-Bernhard; Schrepel, Frank

Photonic microstructures in lithium niobate by potassium hydroxide-assisted ion beam-enhanced etching

Journal of Vacuum Science & Technology, B33 (2015) 1, Article No. 010601, ISSN 10711023

Gottschall, Thomas; Meyer, Tobias; Baumgartl, Martin; Jauregui, César; Schmitt, Michael C.; Popp, Jürgen; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Fiber-based light sources for biomedical applications of coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy

Laser and Photonics Reviews 9 (2015) 5, p. 435-451, ISSN 18638880

Gottschall, Thomas; Meyer, Tobias; Schmitt, Michael; Popp, Jürgen; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Four-wave-mixing-based optical parametric oscillator delivering energetic, tunable, chirped femtosecond pulses for non-linear biomedical applications

Optics Express 23 (2015) 18, p. 23968-23977, ISSN 10944087

Graefe, Markus; Heilmann, Rene; Nolte, Stefan; Szameit, Alexander

On-chip generation of Einstein-Podolsky-Rosen states with arbitrary symmetry

Applied Physics Letters 106 (2015) 18, Article No. 181106, ISSN 00036951

Guo, H.; B. Zhou, M. Steinert, F. Setzpfandt, T. Pertsch, H.-p. Chung, Y.-H. Chen, M. Bache

Supercontinuum generation in quadratic nonlinear waveguides without quasi-phase matching

Optics Letters 40 (4) (2015) p. 629-632, ISSN 01469592

Haarlamert, Nicoletta; Sattler, Bettina; Liem, Andreas; Strecker, Maximilian; Nold, Johannes; Schreiber, Thomas; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas; Ludewigt, Klaus; Jung, Markus

Optimizing mode instability in low-NA fibers by passive strategies

Optics Letters 40 (2015) 10, p. 2317-2320, ISSN 01469592

Hadrich, Steffen; Krebs, Manuel; Hoffmann, Armin; Klenke, Arno; Rothhardt, Jens; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Exploring new avenues in high repetition rate table-top coherent extreme ultraviolet sources

Light-Science & Applications 4 (2015), Article No. e320, ISSN 20477538

Hashimoto, F.; S. Richter, S. Nolte, Y. Ozeki, K. Itoh

Time-resolved Micro-Raman Measurement of Temperature Dynamics during High-Repetition-Rate Ultrafast Laser Microprocessing

Journal of Laser Micro NanoEngineering 10 (1) (2015) p. 29-32, ISSN 18800688

Heilmann, R.; M. Gräfe, S. Nolte, A. Szameit

A novel integrated quantum circuit for high-order W-state generation and its highly precise characterization

Science Bulletin 60 (1) (2015) p. 96-100, ISSN 20959273

Holzberger, S.; Lilienfein, N.; Carstens, H.; Saule, T.; Hoegner, M.; Luecking, F.; Trubetskov, M.; Pervak, V.; Eidam, T.; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas; Fill, E.; Krausz, F.; Pupeza, I.

Femtosecond Enhancement Cavities in the Nonlinear Regime

Physical Review Letters 115 (2015) 2, Article No. 023902, ISSN 00319007

Jäger, Matthias L.; Plötner, Marco; Eschrich, Tina; Vries, Oliver de; Kobelke, Jens; Schreiber, Thomas; Unger, Sonja; Eberhardt, Ramona; Bartelt, Hartmut; Tünnermann, Andreas
High-Brightness Incoherent Combination of Fiber Lasers in 7 x 1 Fiber Couplers at Average Powers > 5 kW
Journal of Lightwave Technology 33 (2015) 20, p. 4297-4302, ISSN 07338724

Jauregui, Cesar; Otto, Hans-Juergen; Stutzki, F.; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas
Simplified modelling the mode instability threshold of high power fiber amplifiers in the presence of photodarkening
Optics Express 23 (2015) 16, p. 20203-20218, ISSN 10944087

João, Celso P.; Wagner, Florian; Körner, Jörg; Hein, Joachim; Gottschall, Thomas; Limpert, Jens; Bagnoud, Vincent
A 10-mJ-level compact CPA system based on Yb:KGW for ultrafast optical parametric amplifier pumping
Applied Physics B-Lasers and Optics 118 (2015) 3, p. 401-407, ISSN 09462171

Kaiser, Norbert; MacLeod, Hugh Angus; Liu, Xü; Wang, Zhanshan
Preface to the Special Issue of selected papers from Frontiers of Optical Coatings 2014
Thin Solid Films 592 (2015) 1, p. 215, ISSN 00406090

Kalkowski, Gerhard; Risse, Stefan; Zeitner, Uwe; Fuchs, Frank; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas
Glass-glass direct bonding
ECS Transactions 64 (2015) 5, p. 3-11, ISSN 19386737

Keil, R.; C. Noh, A. Rai, S. Stützer, S. Nolte, D. G. Angelakis, A. Szameit
Optical simulation of charge conservation violation and Majorana dynamics
Optica 2 (5) (2015) p. 454-459, ISSN 23342536

Kienel, Marco; Müller, Michael; Klenke, Arno; Eidam, Tino; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas
Multidimensional coherent pulse addition of ultrashort laser pulses
Optics Letters 40 (2015) 4, p. 522-525, ISSN 01469592

Knipper, R.; A. Brahm, E. Heinz, T. May, G. Notni, H.-G. Meyer, A. Tünnermann, J. Popp
THz Absorption in Fabric and Its Impact on Body Scanning for Security Application
IEEE Transactions On Terahertz Science and Technology 5 (6) (2015) p. 999-1004, ISSN 2156342X

Kruk, S.; A. N. Poddubny, D. A. Powell, C. Helgert, M. Decker, T. Pertsch, D. N. Neshev, Y. S. Kivshar
Polarization properties of optical metasurfaces of different symmetries
Physical Review B 91 (19) (2015) p. 195401, ISSN 10980121
Lange, Nicolas; Wippermann, Frank; Beckert, Erik; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas

Polymer-Based Pull-In Free Electrostatic Microactuators Fabricated on Wafer-Level
Journal of Microelectromechanical Systems 24 (2015) 4, p. 949-957, ISSN 10577157

Leavey, S.; Barr, B.W.; Bell, A.S.; Gordon, N.; Gräf, C.; Hild, S.; Huttner, S.H.; Kley, E.-B.; Kroker, S.; Macarthur, J.; Messenger, C.; Pitkin, M.; Sorazu, B.; Strain, K.; Tünnermann, A.
Upper limit to the transverse to longitudinal motion coupling of a waveguide mirror
Classical and Quantum Gravity, 32 (2015) 17, Article No. 175005, ISSN 02649381

Lebugle, Maxime; Graefe, Markus; Heilmann, Rene; Perez-Leija, Armando; Nolte, Stefan; Szameit, Alexander
Experimental observation of N00N state Bloch oscillations
Nature Communications 6 (2015), Article No. 8273, ISSN 20411723

Lehr, Dennis; Reinhold, Jörg; Thiele, Illia; Hartung, Holger; Dietrich, Kay; Menzel, Christoph; Pertsch, Thomas; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas
Enhancing second harmonic generation in gold nanoring resonators filled with lithium niobate
Nano letters 15 (2015) 2, p. 1025-1030, ISSN 15306984

Leonhard, Nina D.; Shatokhin, Vyacheslav N.; Buchleitner, Andreas
Universal entanglement decay of photonic-orbital-angular-momentum qubit states in atmospheric turbulence
Physical Review A 91 (2015) 1, Article No. 012345, ISSN 10502947

Lilienfein, N.; Carstens, H.; Holzberger, S.; Jocher, C.; Eidam, T.; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas; Apolonski, A.; Krausz, F.; Pupeza, I.

Balancing of thermal lenses in enhancement cavities with transmissive elements

Optics Letters 40 (2015) 5, p. 843-846, ISSN 01469592

Liu, Wie; Schimpf, Damian N.; Eidam, Tino; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas; Kärtner, Franz X.; Chang, Guoqing

Pre-chirp managed nonlinear amplification in fibers delivering 100 W, 60 fs pulses

Optics Letters 40 (2015) 2, p. 151-154, ISSN 16717694

Lorenz, Hagen; Beckert, Erik; Schoedel, Rene

Phase topography-based characterization of thermal effects on materials and joining techniques

Applied Optics 54 (2015) 8, p. 2046-2056, ISSN 1559128X

Lutzke, Peter; Heist, Stefan; Kühmstedt, Peter; Kowarschik, Richard; Notni, Gunther

Monte Carlo simulation of three-dimensional measurements of translucent objects

Optical Engineering 8 (2015) 8, Article No. 150357, ISSN 00913286

Matthaeus, Gabor; Bergner, Klaus; Ametowobla, Mawuli; Letsch, Andreas; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

CIGS P3 scribing using ultrashort laser pulses and thermal annealing

Applied Physics A: Materials Science and Processing 120 (2015) 1, p. 1-4, ISSN 09478396

Meier, T. A.; Poehler, Elisabeth; Kemper, F.; Pabst, Oliver; Jahnke, Heinz Georg; Beckert, Erik; Robitzki, Andrea Anneliese; Belder, Detlev

Fast electrically assisted regeneration of on-chip SERS substrates

Lab on a Chip 15 (2015) 14, p. 2923-2927, ISSN 14730197

Meinders, M.; S. Kroker, A. P. Singh, E.-B. Kley, A. Tünnermann, K. Danzmann, R. Schnabel

Cancellation of lateral displacement noise of three-port gratings for coupling light to cavities

Optics Letters 40 (9) (2015) p. 2053-2055, ISSN 01469592

Naujok, Philipp; Katzer, Christian; Schmidl, Gabriele; Jatschka, Jacqueline; Fritzsche, Wolfgang; Schmidl, Frank

Optical characterization of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film modified gold nanoparticles

Applied Surface Science 357 (2015) 1, p. 340-345, ISSN 01694332

Naujok, Philipp; Yulin, Sergiy; Bianco, Anna; Mahne, Nicola; Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas

$\text{La/B}_4\text{C}$ multilayer mirrors with an additional wavelength suppression

Optics Express 23 (2015) 4, p. 4289-4295, ISSN 10944087

Otto, Hans-Juergen; Modsching, Norbert; Jauregui, Cesar; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

Impact of photodarkening on the mode instability threshold

Optics Express 23 (2015) 12, p. 15265-15277, ISSN 10944087

Otto, Martin; Algasinger, Michael; Branz, Howard; Gesemann, Thomas; Fuchs, Kevin et al.

Black Silicon Photovoltaics

Advanced Optical Materials 3 (2015) 2, p. 147-164, ISSN 21951071

Paul, Thomas; Matthes, Andre; Harzendorf, Torsten; Ratzsch, Steffan; Zeitner, Uwe

Half-wave phase retarder working in transmission around 630 nm realized by atomic layer deposition of sub-wavelength gratings

Optical Materials Express 5 (2015) 1, p.124-129, ISSN 21593930

Pericet-Camara, Ramon; Dobrzynski, Michal K.; Juston, Raphael; Viollet, Stephane; Leitel, Robert; Mallot, Hanspeter A.; Floreano, Dario

An artificial elementary eye with optic flow detection and compositional properties

Journal of Royal Society Interface 12 (2015) 109, Article No. 20150414, ISSN 17425689

Pshenay-Severin, E.; I. Mukhin, S. Fasold, R. Geiss, A. Steinbrück, R. Grange, A. Chipouline, T. Pertsch

Relaxation time mapping of single quantum dots and substrate background fluorescence

JETP Letters 102 (3) (2015) p. 161-166, ISSN 00213640

Qi, J.; T. Kaiser, A. E. Klein, M. Steinert, T. Pertsch, F. Lederer, C. Rockstuhl

Enhancing resonances of optical nanoantennas by circular gratings

Optics Express 23 (11) (2015) p. 14583-14595, ISSN 10944087

Ratzsch, Stephan; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas; Szeghalmi, Adriana

Encapsulation process for diffraction gratings

Optics Express 23 (2015) 14, p. 17955-17965, ISSN 10944087

Ratzsch, Stephan; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas; Szeghalmi, Adriana

Influence of the oxygen plasma parameters on the atomic layer deposition of titanium dioxide

Nanotechnology 26(2015)2, Article No. 024003, ISSN 09574484

Ratzsch, Stephan; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas; Szeghalmi, Adriana

Inhibition of crystal growth during plasma enhanced atomic layer deposition by applying BIAS

Materials 8 (2015) 11, p. 7805-7812, ISSN 19961944

Reinlein, Claudia; Goy, Matthias; Lange, Nicolas; Appelfelder, Michael

Mounting with compliant cylinders for deformable mirrors

Optics Letters 40 (2015) 7, p. 1536-1539, ISSN 01469592

Ricciardi, Serena; Frascella, Francesca; Angelini, Angelo; Lamberti, Andrea; Munzert, Peter et al.

Optofluidic chip for surface wave-based fluorescence sensing

Sensors and Actuators B: Chemical 215 (2015), p. 225-230, ISSN 09254005

Richter, Daniel; Voigtlaender, Christian; Kraemer, Ria G.; Thomas, Jens U.; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

Discrete nonplanar reflections from an ultrashort pulse written volume Bragg grating

Optics Letters 40 (2015) 12, p. 2766-2769, ISSN 01469592

Richter, Sören; Möncke, Doris; Zimmermann, Felix; Kamitsos, Efstratios; Wondraczek, Lothar; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

Ultrashort pulse induced modification in ULE - from nanograting formation to laser darkening

Optical Materials Express 5(2015)8, p. 1834-1850, ISSN 21593930

Richter, Sören; Zimmermann, Felix; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

Toward laser welding of glasses without optical contacting

Applied Physics A: Materials Science and Processing 121 (2015) 1, p. 1-9, ISSN 09478396

Rothhardt, J.; S. Hädrich, S. Demmler, M. Krebs, D. Winters, T. Kuehl, T. Stöhlker, J. Limpert, A. Tünnermann

Prospects for laser spectroscopy of highly charged ions with high-harmonic XUV and soft x-ray sources

Physica Scripta T166 (2015) p. 14030, ISSN 00318949

Saravi, S.; S. Diziain, M. Zilk, F. Setzpfandt, T. Pertsch

Phase-matched second-harmonic generation in slow-light photonic crystal waveguides

Physical Review A 92 (6) (2015) p. 063821, ISSN 10502947

Schröder, Sven; Finck, Alexander von; Duparré, Angela

Standardization of light scattering measurements

Advanced Optical Technologies 4 (2015) 5-6, p. 361-375, ISSN 21928576

Schröder, Sven; Trost, Marcus; Garrick, Méabh; Duparré, Angela; Cheng, Xinbin; Zhang, Jinlong; Wang, Zhanshan

Origins of light scattering from thin film coatings

Thin solid films 592 (2015) 1, p. 248-255, ISSN 00406090

Schulz, Ulrike; Munzert, Peter; Rickelt, Friedrich; Präfke, Christiane; Gratzke, Nancy; Knopf, Heiko; Wolleb, Sabrina; Kaiser, Norbert

Inorganic-organic hybrid coatings for antireflection of optical surfaces

Vakuum in Forschung und Praxis 27 (2015) 3, p. 20-25, ISSN 0947076X

Schulz, Ulrike; Rickelt, Friedrich; Ludwig, Henning;
Munzert, Peter; Kaiser, Norbert

Gradient index antireflection coatings on glass containing plasma-etched organic layers

Optical Materials Express 5 (2015) 6, p. 1259-1265,
ISSN 21593930

Schwinde, Stefan; Schürmann, Mark; Jobst, Paul Johannes;
Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas

Description of particle induced damage on protected silver coatings

Applied Optics 54 (2015) 16, p. 4966-4971,
ISSN 1559128X

Schwinde, Stefan; Schürmann, Mark; Kaiser, Norbert

UV-enhanced Ag-coatings with optimized environmental stability

Vakuum in Forschung und Praxis 27 (2015) 5, p. 33-34,
ISSN 0947076X

Sergeyev, A.; R. Geiss, A. S. Solntsev, A. A. Sukhorukov,
F. Schrempel, T. Pertsch, R. Grange

Enhancing Guided Second-Harmonic Light in Lithium Niobate Nanowires

ACS Photonics 2 (6) (2015) p. 687-691,
ISSN 2330-4022

Setzpfandt, F.; A. S. Solntsev, J. Titchener, C. W. Wu, C. Xiong,
R. Schiek, T. Pertsch, D. N. Neshev, A. A. Sukhorukov

Tunable generation of entangled photons in a nonlinear directional coupler

Laser & Photonics Reviews 10 (1) (2015) p. 131-136,
ISSN 1863-8880

Setzpfandt, F.; W. Sohler, R. Schiek, T. Pertsch

Nonlinear coupling in discrete optical waveguide arrays with quadratic nonlinearity

Physical Review A 92 (4) (2015) p. 043832, ISSN 10502947

Sinibaldi, A.; Danz, N.; Anopchenko, A.; Munzert, P.;
Schmieder, S.; Chandrawati, R.; Rizzo, R.; Rana, S.;
Sonntag, F.; Occhicone, A.; Napione, L.; De Panfilis, S.;
Stevens, M. M.; Michelotti, F.

Label-Free Detection of Tumor Angiogenesis Biomarker Angiopoietin 2 Using Bloch Surface Waves on One Dimensional Photonic Crystals

Journal of Lightwave Technology 33 (2015) 16,
p. 3385-3393, ISSN 07338724

Sinibaldi, Alberto; Anopchenko, Aleksei; Rizzo, Riccardo;
Danz, Norbert; Munzert, Peter; Rivolo, Paola;
Francesca, Frascella; Serena, Ricciardi;
Francesco, Michelotti

Angularly resolved ellipsometric optical biosensing by means of Bloch surface waves

Analytical and Bioanalytical Chemistry 407 (2015) 14,
p. 3965-3974, ISSN 16182642

Steglich, M.; Oehme, M.; Käsebier, T.; Zilk, M.; Kostecki,
K.; Kley, Ernst-Bernhard; Schulze, J.; Tünnermann, Andreas

Ge-on-Si photodiode with black silicon boosted responsivity

Applied Physics Letters 107 (2015) 5, Article Number 051103,
ISSN 00036951

Steglich, Martin; Käsebier, Thomas; Schrempel, Frank;
Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas

Self-organized, effective medium Black Silicon for infrared antireflection

Infrared Physics and Technology 69 (2015), p. 215-221,
ISSN 13504495

Stenzel, Olaf; Harhause, J.; Gäbler, Dieter; Wilbrandt, Steffen;
Franke, Christian; Foest, R.; Kaiser, Norbert

Investigation on the reproducibility of optical constants of TiO₂, SiO₂, and Al₂O₃ films, prepared by plasma ion assisted deposition

Optical Materials Express 5 (2015) 9, p. 2006-2023,
ISSN 21593930

Strassmeier, K.G.; Ilyin, I.; Järvinen, A.; Weber, M.; Woche, M.;
Barnes, S.I.; Bauer, S.M.; Beckert, Eric; Bittner, W.; Bredthauer,
R.; Carroll, T.A.; Denker, C.; Dionies, F.; DiVarano, I.; Döscher,
D.; Fechner, T.; Feuerstein, D.; Granzer, T.; et al.

PEPSI: The high-resolution ichelle spectrograph and polarimeter for the Large Binocular Telescope

Astronomische Nachrichten 336 (2015) 4, p. 324-361,
ISSN 00046337

Stürzebecher, L.; F. Fuchs, U.D. Zeitner, A. Tünnermann

High resolution proximity lithography for nano-optical components

Microelectronic Engineering 132 (2015) p. 120-134,
ISSN 0167-9317

Stutzki, Fabian; Gaida, Christian; Gebhardt, Martin; Jansen, Florian; Jauregui, Cesar; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas
Tm-based fiber-laser system with more than 200 MW peak power
Optics Letters 40 (2015) 1, p. 9-12,
ISSN 01469592

Tessmer, M.; H. Gross
Generalized propagation of light through optical systems. I.+II. Mathematical basics
JOSA A Optics Image Science and Vision 32 (2) (2015) p. 258-266, ISSN 1084-7529

Tillmann, Max; Tan, Si-Hui; Stoeckl, Sarah E.; Sanders, Barry C.; Guise, Hubert de; Heilmann, Rene; Nolte, Stefan; Szameit, Alexander; Walther, Philip
Generalized Multiphoton Quantum Interference
Physical Review X 5(2015)4, Article No. 041015,
ISSN 21603308

Tugchinn, Bayarjargal N.; Janunts, Norik; Klein, Angela E.; Steinhilber, Michael; Fasold, Stefan; Diziain, Severine; Sison, Miguel; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas; Pertsch, Thomas
Plasmonic Tip Based on Excitation of Radially Polarized Conical Surface Plasmon Polariton for Detecting Longitudinal and Transversal Fields
ACS Photonics, 2 (2015) 10, p.1468-1475,
ISSN 23304022

Vries, Oliver de; Saule, Tobias; Plötner, Marco; Lücking, Fabian; Eidam, Tino; Hoffmann, Armin; Klenke, Arno; Hädrich, Steffen; Limpert, Jens; Holzberger, Simon; Schreiber, Thomas; Eberhardt, Ramona; Pupez, Joachim; Tünnermann, Andreas
Acousto-optic pulse picking scheme with carrier-frequency-to-pulse-repetition-rate synchronization
Optics Express 23 (2015) 15, p. 19586-19595,
ISSN 10944087

Weichelt, Tina; Stürzebecher, Lorenz; Zeitner, Uwe
Optimized lithography process for through-silicon via-fabrication using a double-sided (structured) photomask for mask aligner lithography
Journal of Micro-Nanolithography Memos and Moems 14 (2015) 3, Article No. 034501, ISSN 19325150

Williams, R. J.; Nold, Johannes; Strecker, M.; Kitzler, O.; McKay, A.; Schreiber, Thomas; Mildren, R. P.
Efficient Raman frequency conversion of high-power fiber lasers in diamond
Laser and Photonics Reviews 9 (2015) 4, p. 405-411,
ISSN 18638880

Zeuner, Julia M.; Rechtsman, Mikael C.; Plotnik, Yonatan; Lumer, Yaakov; Nolte, Stefan; Rudner, Mark S.; Segev, Mordechai; Szameit, Alexander
Observation of a Topological Transition in the Bulk of a Non-Hermitian System
Physical Review Letters 115 (2015) 4, Article No. 040402,
ISSN 00319007

Zimmermann, Felix; Plech, Anton; Richter, Sören; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan
On the rewriting of ultrashort pulse-induced nanogratings
Optics Letters 40 (2015) 9, p. 2049-2052,
ISSN 01469592

LASER
World of
PHOTONICS

OPTISCHE
TECHNO-
LOGIEN
FORUM

ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN ONLINE | ADDITIONAL INFORMATION ONLINE

Im Jahr 2015 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 2015, 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
Sylvia Bathke
Anne Groß
Annika Höft
Franziska Becker

Redaktionsschluss | Editorial deadline

18.03.2016

Gestaltung | Graphic design

Walter Oppel
Christian Süß

Druck | Print

Buchdruckerei Emil & Dr. Edgar Richter
Amtsplatz 4
07646 Stadtroda
www.druck-richter.de