



**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2018**

we love photonics



COVER *Leuchtendes Bandgewebe – Der regionale Wachstumskern TOF (tailored optical fibers) entwickelt neue Technologien für innovative Anwendungen optischer Spezialfasern. Ein TOF-Verbundprojekt beschäftigt sich mit der Lichtein- und -auskopplung in bzw. aus Fasern zur Realisierung homogener flächig leuchtender Textilgewebe. Das hier gezeigte mehrere Meter lange, flexible Leuchtband der F.J.RAMMER GmbH basiert auf eingewebten und funktionalisierten PMMA-Fasern. Für eine gleichmäßige, seitliche Abstrahlung des eingekoppelten Lichts über die gesamte Länge des Bandes wurde eine spezielle Sprühbeschichtung entwickelt. Als Lichtquelle dient eine sparsame LED, deren Lichtleistung mit einer 3D-gedruckten Ormocer®-Optik in das Faserbündel des Gewebes gerichtet eingekoppelt wird – weitere Informationen auf Seite 86. |*

Areal luminous textile fabrics – The regional growth core TOF (tailored optical fibers) develops new technologies for innovative applications of special optical fibers. One TOF joint project deals with the coupling of light into and out of fibers for the realization of homogeneously illuminated textile fabrics. The flexible light strip by F.J.RAMMER GmbH shown here, is several meters long and based on woven and functionalized PMMA fibers. A special spray coating was developed for uniform lateral emission of the coupled light over the entire length of the strip. The light source is an economical LED whose light output is directed into the fibre bundle of the fabric by means of a 3D-printed Ormocer® optic – for further information see page 86.

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2018**

VORWORT

PREFACE

Hinter uns liegt ein spannendes und ereignisreiches Jahr 2018. Als Schlüsseltechnologie hat die Photonik wesentlich zur positiven wirtschaftlichen Entwicklung beigetragen und vielfältige wissenschaftliche Erfolge befähigt. Die Auszeichnung von Donna Strickland und Gérard Mourou für die Entwicklung der »chirped pulse amplification« mit dem Nobelpreis für Physik unterstreicht die revolutionäre Bedeutung dieser Technologie, die unzählige Anwendungen in der Wissenschaft und Wirtschaft ermöglicht hat. Zugleich stellt sie auch einen bedeutenden Baustein des Erfolgs unseres Instituts dar. Mit innovativen Technologien wie dem »Coherent Combining« und Initiativen wie dem Fraunhofer Cluster of Excellence »Advanced Photon Sources« führen wir diese erfolgreiche Entwicklung fort, um das Werkzeug Laser zukünftig noch flexibler und leistungsfähiger zu machen.

Die hohe fachliche Kompetenz und die großartige Zusammenarbeit innerhalb unseres Instituts zeigten sich im letzten Jahr in vielen Projekten. Die erfolgreiche Partizipation an den Raumfahrtmissionen ISS Horizons und BepiColombo war für mich ein leuchtendes Beispiel hierfür. In enger Kooperation aller Fachabteilungen – vom Design bis zur Systemintegration – konnte unser Haus die Missionen mit den leistungsfähigen hyperspektralen Messinstrumenten DESIS und MERTIS unterstützen. Damit helfen wir, Umweltprozesse auf der Erde und die Zusammensetzung der Merkuroberfläche zukünftig noch detaillierter zu erforschen. Ich danke allen beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihr fortwährendes Engagement und freue mich auf die wissenschaftlichen Ergebnisse der Missionen.

In dem dynamischen Umfeld der Photonik konnten wir im Jahr 2018 vielfältige wegweisende Vorhaben umsetzen, bestehende Kooperationen vertiefen und neue Wege der Zusammenarbeit etablieren. Ein besonderer Höhepunkt des vergangenen Jahres lag für mich in der Eröffnung des »Fraunhofer-Projektzentrums für Mikroelektronische und Optische Systeme für die Biomedizin

We look back on an exciting and eventful year 2018. As a key technology, photonics have made significant contributions to the positive economic development and have enabled a variety of scientific achievements. The honouring of Donna Strickland and Gérard Mourou for the development of the "chirped pulse amplification" with the Nobel Prize in Physics has underlined the revolutionary importance of this technology. It has enabled countless applications in science and industry and, at the same time, represents a substantial component of the success of our institute. With innovative technologies such as "Coherent Combining" and initiatives such as the Fraunhofer Cluster of Excellence "Advanced Photon Sources", we will advance this successful development in order to make the laser an even more flexible and efficient tool in the future.

The high technical competence and the great cooperation of our institute were visible in many projects last year. Here, the successful participation in the space missions ISS Horizons and BepiColombo were wonderful examples. In close collaboration of all departments – from design to system integration – our institute was able to support these missions with the efficient hyperspectral instruments DESIS and MERTIS. In this way, we will help to further investigate environmental processes on Earth and the composition of Mercury's surface in the future. I thank all staff for their continued commitment and look forward to the scientific results of the missions.

In the dynamic environment of our Center of Excellence in Photonics, we have realized a variety of pioneering projects in 2018, deepened existing collaborations, and established new ways of cooperation. A special highlight of the past year was the opening of the "Fraunhofer Project Center Microelectronic and Optical Systems for Biomedicine MEOS" in Erfurt. Here, we will work together with colleagues from the Fraunhofer Institute for Photonic Microsystems IPMS and the Fraunhofer Institute for Cell Therapy and Immunology IZI on interdisciplinary



MEOS« in Erfurt. Hier werden wir zukünftig zusammen mit Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer-Instituts für Photonische Mikrosysteme IPMS und des Fraunhofer-Instituts für Zelltherapie und Immunologie IZI an interdisziplinären Ansätzen für die Biomedizin forschen. Ich freue mich auf die gemeinsame Bearbeitung der zahlreichen neuen und spannenden Themen.

Die wissenschaftliche Exzellenz unseres Instituts spiegelte sich auch in der Auszeichnung vielfältiger Forschungs- und Kooperationsprojekte wider: Mit dem Kaiser-Friedrich-Forschungspreis, dem Lothar-Späth-Award, dem Wissenschaftspreis des Stifterverbandes für Verbundforschung sowie den Auszeichnungen der Nachwuchsforschenden Dr. Astrid Bingel mit dem Hugo-Geiger-Preis und Dr. Fabian Stutzki mit dem Carl Zeiss Award for Young Researchers wurden besonders herausragende Arbeiten gewürdigt, die bedeutende Fortschritte in der Entwicklung und Anwendung leistungsfähiger photonischer Systeme ermöglicht haben. Ich gratuliere allen beteiligten Wissenschaftlerinnen, Wissenschaftlern und Partnerorganisationen zu ihrem begeisterten und beeindruckenden Einsatz!

Mit dem Ziel, die Zusammenarbeit mit unseren Partnern weiter zu stärken und aktuelle Entwicklungen in Wissenschaft und Wirtschaft zu diskutieren, haben wir im vergangenen Jahr die »Photonics Days 2018« als Hausmesse unseres Leistungszentrums initiiert. Das Branchentreffen der Photonik bot mit Vorträgen, Workshops, Netzwerkevents und den Auszeichnungen herausragender Abschlussarbeiten eine spannende Plattform des Austauschs und wird wegen des großen Erfolgs auch zukünftig eine feste Rolle im Jahresprogramm einnehmen.

Die stetige Veränderung der Forschungs- und Förderlandschaft und die dynamische Entwicklung der Branchen und Märkte stellen unser Institut vor neue Herausforderungen. Diese wollen wir mit der Initiierung eines Strategieprozesses als Chance nutzen mit dem Ziel, die Zusammenarbeit sowohl intern als auch extern weiter zu verbessern und uns breiter entlang der Innovations- und Wertschöpfungskette aufzustellen. Durch

approaches for biomedical applications. I look forward to joint implementation and many new and exciting topics.

Numerous awards have also illustrated the scientific excellence of our institute: with the Kaiser Friedrich Research Prize, the Lothar Späth Award, the Stifterverband Science Prize, as well as the Hugo Geiger Prize, and the Carl Zeiss Award for Young Researchers for the junior scientists Dr. Astrid Bingel and Dr. Fabian Stutzki, outstanding projects were honoured, which have enabled significant progress in the development and application of capable photonics systems. I congratulate all participating scientists and partners for their enthusiastic and impressive work!

With the aim of further strengthening the collaboration with our partners and discussing current developments in science and industry, last year we initiated the "Photonics Days 2018" as an in-house exhibition of our Center of Excellence in Photonics. A number of presentations, workshops, networking events, and thesis awards offered exciting platforms for exchange and, because of their great success, will continue to play a major role in the annual program in future. I would like to thank all those involved for the successful implementation!

The constant change in the research and funding landscape and the dynamic development of industries and markets pose new challenges for our institute. By the initiation of the strategy process, we view these challenges as an opportunity to pursue the goal of further improving cooperation, both internally and externally, and positioning our institute more broadly along the innovation and value chain. With the expansion of the research field of optical quantum technology with numerous projects and junior research groups, such as quantum imaging, quantum communication, and quantum materials, we were already able to address significant future topics. In conjunction with the Fraunhofer flagship projects "QUILT" and "Advanced Photon Sources", the success of the Cluster of Excellence "Balance of the Microverse", the BMBF initiative "Innovative University", the growth cores "Freiformoptik +" and "Tailored Optical Fibers",

LÖSUNGEN MIT LICHT SOLUTIONS WITH LIGHT



**MASCHINEN
LERNEN VERSTEHEN**



Fraunhofer
IOF



den Ausbau des Forschungsfeldes Optische Quantentechnologie mit zahlreichen Projekten und Nachwuchsgruppen, wie zu Quanten-Imaging, Quantenkommunikation und Quantenmaterialien, konnten wir im vergangenen Jahr bereits bedeutende Zukunftsthemen adressieren. Im Zusammenspiel mit den Fraunhofer-Leitprojekten »QUILT« und »Advanced Photon Sources«, dem Erfolg im Exzellenzcluster »Balance of the Microverse«, dem BMBF-Exzellenzprogramm »Innovative Hochschule«, den Wachstumskernen »Freiformoptik +« und »Tailored Optical Fibers« und der Initiierung der »Max Planck School of Photonics« sowie zahlreichen weiteren Initiativen und Forschungsvorhaben konnte unser Institut die wissenschaftliche Exzellenz stetig ausbauen. Mit der Weiterentwicklung des gemeinsam mit dem Institut für Angewandte Physik etablierten »Leistungszentrums Photonik« zur nationalen Transferstruktur und dem Aufbau des »Digital Innovation Hub Photonics« als neues Format zur Unterstützung von Gründern und Startups werden wir den Transfer innovativer Technologien in die Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft zukünftig noch stärker in den Fokus stellen. Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unseres Instituts möchte ich einen persönlichen Dank für ihr hohes Engagement am Erfolg der vielfältigen Projekte des vergangenen Jahres aussprechen und wünsche uns allen bestes Gelingen bei der gemeinsamen Umsetzung der zukünftigen Vorhaben!

Das Jahr 2019 hält für uns zahlreiche spannende Vorhaben und Ereignisse bereit: Im Jubiläumsjahr feiert die Fraunhofer-Gesellschaft ihr 70-jähriges Bestehen und blickt zurück auf unzählige Erfolgsgeschichten. Unter dem Motto #WHATSNEXT stellen wir uns gemeinsam neuen Herausforderungen und entwickeln Antworten für die großen Fragen der Zukunft. Ich bedanke mich ganz herzlich bei allen Partnereinrichtungen, Unternehmen, Forschungsförderern und Stiftungen, die uns in der Umsetzung so zahlreicher und vielfältiger Vorhaben unterstützt haben und auch zukünftig gemeinsam mit uns innovative Lösungen mit Licht entwickeln werden.

and the initiation of the "Max Planck School of Photonics", as well as many other initiatives and research projects, our institute was able to steadily expand its scientific excellence. With the development of our Center of Excellence in Photonics to a national transfer platform and the implementation of the "Digital Innovation Hub Photonics" as a new format to support founders and young startups, we will place an even stronger focus onto the transfer of solutions with light into economy, science, and society in the future. I would like to express my gratitude to all our staff for their great commitment to the success of the diverse projects of the past year and wish us all the best in the joint implementation of future projects!

The year 2019 will bring many exciting projects and events: In the anniversary year, the Fraunhofer Society celebrates its 70th birthday and looks back on countless success stories. Under the slogan #WHATSNEXT, we will face new challenges and develop answers to the big questions of the future. I sincerely thank all partner institutions, companies, funding partners, and foundations which have supported us in the implementation of the numerous and diverse projects and which will continue to jointly develop innovative solutions with light in the future.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Direktor des Fraunhofer IOF | Director of the Fraunhofer IOF

LEFT *Prof. Dr. Andreas Tünnermann spricht über die Herausforderung der Mensch-Maschine-Interaktion auf den Photonics Days 2018. | Prof. Dr. Andreas Tünnermann presents current challenges of the human-machine interaction at the Photonics Days 2018 in Jena.*

INHALT

Das Institut im Profil	8
Ausgewählte Forschungsergebnisse 2018	14
Optische Komponenten und Systeme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	18
Eingebettetes Beugungsgitter für Spektroskopie im Weltall	20
Simulation von Streulicht in Beugungsgittern	22
Stark gekrümmte Freiformoptiken für die satellitengestützte Erdbeobachtung	24
3D-Tintenstrahldruck optischer Elemente	26
Mikrooptik für automotiv Scheinwerfer	28
Mikrolinsen in Kieselglas durch UV-Abformung und Trockenätzen	30
Thermografiesystem für das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X	32
Quantenspektroskopie und Quantensensorik in Wellenleitern	34
Streulicht-Simulation in biologischem Gewebe	36
Feinmechanische Komponenten und Systeme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	38
Additive Fertigung von Metalloptiken	40
Fassung und Montierung prismatischer Optiken für die Sentinel-5 Mission	42
Funktionale Oberflächen und Schichten – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	44
Eigenschaften von Oxiden hergestellt mittels neuem PEALD-System	46
Hochbeständige Beschichtungen für einen IR-Spektrograph	48
Schichtdesign mit Berücksichtigung von $\chi^{(3)}$ - Effekten	50
Hybridmaterialien für die Herstellung stochastischer Nanostrukturen	52
Biofunktionale Oberflächen	54
Photonische Sensoren und Messsysteme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	56
Miniaturisierte Sensorik für autonomes Fahren	58
Array-Mikroskop mit Sub-Mikrometer Auflösung	60
Multispektrale 3D-Erfassung	62
Ortsaufgelöste Oberflächencharakterisierung von Freiformen	64
In-line 3D-Vermessung von Wabenkatalysatoren	66
Lasertechnik – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	68
Optische Spezialfasern	70
Kohärent kombinierte Lasersysteme basierend auf Multikernfasern	72
Volumenstrukturierung von Silizium für optische Anwendungen	74
Strategische Projekte des Fraunhofer IOF	76
Das Institut in Zahlen	98
Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces und die Fraunhofer-Gesellschaft	100
Namen, Daten, Ereignisse	106

CONTENT

Profile of the institute	8
Selected results 2018	14
Optical components and systems – scientific results from the business field	18
Immersed prism-grating-prism for optical applications in space	20
Simulation stray light of diffraction gratings	22
Highly curved freeform optics for satellite based earth observation	24
3D-inkjet printing of optical components	26
Micro-optics for automotive headlamps	28
Microlenses in fused silica by UV-replication and dry etching	30
Thermography system for the fusion experiment Wendelstein 7-X	32
Quantum spectroscopy and quantum sensing in waveguides	34
Simulation of light scattering in biological tissue	36
Precision engineering components and systems – scientific results from the business field	38
Additive manufacturing of metal optics	40
Mount and assembly of prismatic optics for the Sentinel-5 mission	42
Functional surfaces and layers – scientific results from the business field	44
Properties of oxides on a new PEALD coating system	46
Highly durable coatings for an IR-spectrograph	48
Coating design including X ⁽³⁾ effects	50
Hybrid materials for the preparation of stochastic nanostructures	52
Bio-functional surfaces	54
Photonic sensors and measuring systems – scientific results from the business field	56
Miniaturized sensors for autonomous driving	58
Array microscope with sub-micrometer resolution	60
Multispectral 3D detection	62
Characterization of freeform surfaces	64
In-line 3D measurement of honeycomb catalysts	66
Laser technology – scientific results from the business field	68
Special optical fibers	70
Coherently combined multicore fiber laser systems	72
Laser-written integrated optics deep inside silicon	74
Strategic projects of the Fraunhofer IOF	76
The institute in figures	98
Fraunhofer Group Light & Surfaces and Fraunhofer-Gesellschaft	100
Names, dates, activities	106



DAS INSTITUT IM PROFIL

PROFILE OF THE INSTITUTE

Das Fraunhofer IOF betreibt anwendungsorientierte Forschung auf dem Gebiet der Photonik und entwickelt innovative optische Systeme zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zu deren Anwendung. Das Leistungsangebot des Instituts umfasst die gesamte photonische Prozesskette vom optomechanischen und optoelektronischen Systemdesign bis zur Herstellung von kundenspezifischen Lösungen und Prototypen. Forschungsschwerpunkte sind unter anderem Freiformtechnologien, Mikro- und Nanotechnologien, Faserlasersysteme sowie optische Technologien für die sichere Mensch-Maschine-Interaktion.

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.

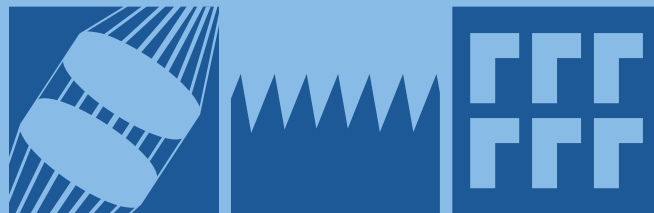
Das Institut ist in den fünf Geschäftsfeldern Optische Komponenten und Systeme, Feinmechanische Komponenten und Systeme, Funktionale Oberflächen und Schichten, Photonische Sensoren und Messsysteme sowie Lasertechnik tätig. Die enge Verzahnung der Geschäftsfelder erlaubt die Erarbeitung von komplexen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

Fraunhofer IOF conducts applied research in the field of photonics and develops innovative optical systems to control light – from generation and manipulation to its application. The services offered by the institute cover the entire photonic process chain from optomechanical and optoelectronic system design to the manufacturing of custom-specific solutions and prototypes. Current focuses of our research activities include freeform technologies, micro- and nanotechnologies, fiber laser systems, and optical technologies for safe human-machine interaction.

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 transfers and spin-off ventures. At the same time, Fraunhofer IOF is both national and international in its orientation and maintains a network of partners in Europe, North America, and Asia. 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 complex system solutions for customers. The business fields at Fraunhofer IOF are separately presented and described in the scientific articles.

KOMPETENZEN COMPETENCES



Design and Simulation

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

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. Diese Materialien werden unter anderem im Zentrum für Innovationskompetenz »ultra optics®« erforscht.

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 sowie in der Charakterisierung von Oberflächen und Schichten.

Ultrapräzisionsbearbeitung

Das Fraunhofer IOF stellt mittels Ultrapräzisionsbearbeitung Metallspiegel, Gitter, kunststoffbasierte Linsen und Linsen-Arrays 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 as well as the simulation and analysis of optical and optomechanical systems, including thermal and thermo-optical effects. Wide-ranging design and modelling tools enable even the simulation and optimization of complex systems.

Micro- and nanostructuring

The generation and replication of optical micro- and nanostructures are the 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 the highest resolution on substrates up to 12".

Optics and photonics materials

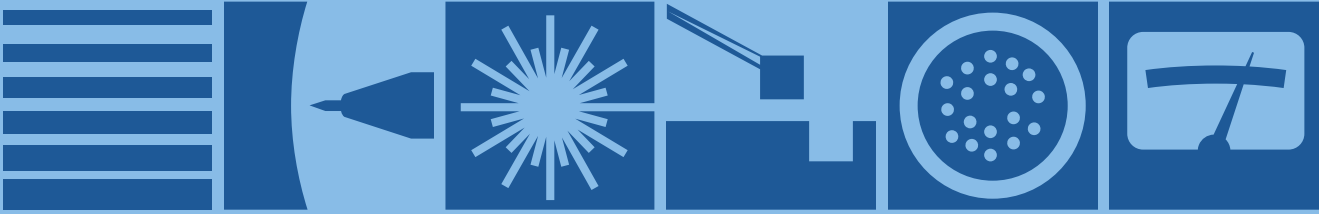
Nanostructure technology enables the development of new materials for optics and photonics, such as photonic crystals and metamaterials. The investigation of these materials is carried out at the Center for Innovation Competence "ultra optics®".

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

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 Piko- oder Femtosekunden besitzen hohes Einsatzpotenzial zur hochpräzisen Strukturierung verschiedener Materialien. Aufgrund der kurzen Energiedeposition, in einem Zeitbereich, der unterhalb der thermischen Relaxationszeit liegt, lässt sich ein Abtrag praktisch ohne mechanische oder thermische Schädigung des Werkstücks erzielen.

Mikromontage und Systemintegration

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

Laserentwicklung und nichtlineare Optik

Für die Entwicklung von Hochleistungs-Faserlasern mit beugungsbegrenzter Strahlqualität bestehen am Fraunhofer IOF Kompetenzen in Faserdesign, Optikdesign, Thermooptik, in der Aufbau- und Verbindungstechnik für Faserlaser sowie 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 pico- 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

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

Laser development and non-linear optics

For the development of high-power fiber lasers with diffraction-limited beam quality, Fraunhofer IOF has 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

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 subnanometer range and in 3D shape acquisition.

ORGANISATION ORGANIZATION







HEAD OF INSTITUTE

 Director Prof. Dr. Andreas Tünnermann	 Deputy director Dr. Ramona Eberhardt	 Deputy director Prof. Dr. Stefan Nolte
---	--	--









ADMINISTRATION

 Administration Elke Heuer	 Strategy, marketing, coordination Dr. Kevin Füchsel
---	--

BUSINESS FIELDS

 Optical components and systems Prof. Dr. Uwe Detlef Zeitner	 Precision engineering components and systems Dr. Ramona Eberhardt	 Functional optical surfaces and layers Prof. Dr. Norbert Kaiser	 Photonic sensors and measuring systems Prof. Dr. Gunther Notni
---	---	---	--

COMPETENCES

 Design and simulation Prof. Dr. Herbert Gross	 Micro and nano-structuring Prof. Dr. Uwe Detlef Zeitner	 Coating and surface functionalization Dr. Ulrike Schulz	 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 Dr. Peter Kühmstedt

STRATEGIC PROJECTS

<p>QUILT Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions Prof. Dr. Andreas Tünnermann</p> 	<p>3Dsensation Innovation alliance Prof. Dr. Andreas Tünnermann</p> 	<p>Max Planck School of Photonics Prof. Dr. Andreas Tünnermann</p> 
---	---	---

KURATORIUM ADVISORY COMMITTEE



Technical services
Wieland Stöckl



Laser technology
Prof. Dr. Stefan
Nolte



Materials for optics
and photonics
Prof. Dr. Thomas
Pertsch

TOF – Tailored
optical fibers

Dr. Ramona
Eberhardt



VORSITZENDER | CHAIR

- Dr. Michael Mertin | CeramTech Gruppe, Plochingen

MITGLIEDER | MEMBERS

- Christian Amann | BMW Group, München
- Dr. Klaus Bartholmé | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena
- Petra Bogdanski | Mahr GmbH, Jena
- Robert Fetter | Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft, Erfurt
- Gabi Grützner | micro resist technology GmbH, Berlin
- Dr. Roland Langfeld | Schott AG, Mainz
- Manfred Lieke | Airbus Defence & Space, Friedrichshafen
- Prof. Dr. Roland Sauerbrey | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden
- Dr. Christian Schmitz | TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen
- Prof. Dr. Christian Spielmann | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Optik und Quantenelektronik, Jena
- Joachim Stühler | Carl Zeiss SMT GmbH, Oberkochen
- Thomas Thöniß | Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG, Göttingen
- Dr. Werner Wilke | VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

EHRENMITGLIEDER | HONORARY MEMBERS

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

AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2018

SELECTED RESULTS 2018



Das Fraunhofer IOF betreibt seit 1992 anwendungsorientierte Forschung und hat sich in den vergangenen 27 Jahren als eine weltweit führende Forschungseinrichtung für Photonik und optische Systemtechnik etabliert. Gemeinsam mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (IAP), das Grundlagenforschung im Bereich der Optik und Photonik betreibt, bilden beide Forschungsinstitute ein gemeinsames Leistungszentrum für Photonik. Es verknüpft die herausragenden und komplementären Kompetenzen in den Bereichen Lasertechnologie, Freiformoptik, Mikro- und Nanooptik, optische Sensorik und Quantentechnologie und fördert hierdurch die einrichtungsübergreifende Entwicklung innovativer Lösungen mit Licht – von der ersten Idee bis zur Integration in das finale Produkt. Kunden und Forschungspartnern kann so bei Bedarf die komplette Prozesskette – von der Grundlagenforschung und anwendungsorientierten Forschung bis hin zur Realisierung der finalen Anwendung – angeboten werden.

Die enge Verbindung beider Institute schafft die ideale Umgebung, um bahnbrechende und zukunftsweisende Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Photonik zu realisieren. Die Vielzahl an exzellenten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und die hervorragende technische Ausstattung gebündelt am Standort Jena, verschaffen unseren Kunden und Forschungspartnern einen klaren Wettbewerbsvorteil bei der Verwirklichung von innovativen optischen Technologien und herausragenden Projekten – bspw. komplexe Komponenten für verschiedene Missionen zur satellitengestützten Erkundung unseres Sonnensystems oder Systeme zur Qualitätskontrolle im laufenden Fertigungsprozess in Industrieanlagen.

Nachfolgend präsentieren wir einige ausgewählte wissenschaftliche Ergebnisse aus 2018. Die ausgewählten Fachbeiträge stehen dabei exemplarisch für die Bandbreite unserer Forschung auf dem Gebiet Optik und Photonik. Sie geben auch einen Einblick in die Aktivitäten der fünf Geschäftsfelder des Fraunhofer IOF.

Since 1992 Fraunhofer IOF has been conducting application-oriented research and over the past 27 years, it has established itself as one of the world's leading research institutions for photonics and optical systems technology. Together with the Institute of Applied Physics of the Friedrich Schiller University Jena (IAP), which conducts basic research in the field of optics and photonics, both jointly form the Center of Excellence in Photonics. The center combines the outstanding and complementary competencies in the fields of laser technology, freeform optics, micro- and nanooptics, optical sensor technology, and quantum technology, and thus promotes the development of innovative solutions with light – from the initial idea to integration into the final product. Customers and research partners can thus be offered the complete process chain – from basic and application-oriented research to the realization of the final application.

The close connection of both institutes creates an ideal environment to realize groundbreaking and future-oriented research projects in the field of photonics. The large number of excellent scientists and the outstanding technical equipment bundled in Jena grant our customers and research partners a clear competitive advantage in the realization of innovative optical technologies and projects – e.g. complex components for various missions for satellite-supported exploration of our solar system or systems for quality control in the ongoing manufacturing process in industrial plants.

In the following, we present a selection of scientific results from 2018. The selected contributions are exemplary for the range of our research in the field of optics and photonics. They also provide an insight into the activities of Fraunhofer IOF's five business fields.

LEFT *Die Weiterentwicklung klebstofffreier Verbindungstechniken für optische Systeme ist eine unserer herausragenden Leistungen im Jahr 2018. | The further development of adhesive free joining techniques for optical systems is one of our outstanding achievements in 2018.*



OPTISCHE SYSTEME FÜR RAUMFAHRTPROJEKTE OPTICAL SYSTEMS FOR SPACE PROJECTS

Moderne und leistungsfähige Spiegeloptiken für Abbildung, Spektroskopie und Strahlformung basieren auf komplexen optischen Oberflächen. Auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrt erforscht das Fraunhofer IOF das Design, die Fertigung und die Montage moderner Teleskop- und Spektrometeroptiken mit on-axis und off-axis Asphären, Freiformflächen und strukturierten Oberflächen (Gitter).

Seine Kompetenz in der Entwicklung von optischen Systemen für Raumfahrtprojekte und Beobachtungsmissionen hat das Fraunhofer IOF in diesem Jahr u. a. in folgenden Projekten erfolgreich unter Beweis gestellt:

MERTIS

Am 20. Oktober 2018 ist die europäisch-japanische Raumsonde »BepiColombo« Richtung Merkur gestartet. Die sieben Jahre andauernde Mission soll die Geheimnisse des sonnennächsten Planeten Merkur lüften.

An Bord befindet sich ein vom Fraunhofer IOF entwickeltes thermisches Infrarot-Spektrometer auf Basis diamantbear-

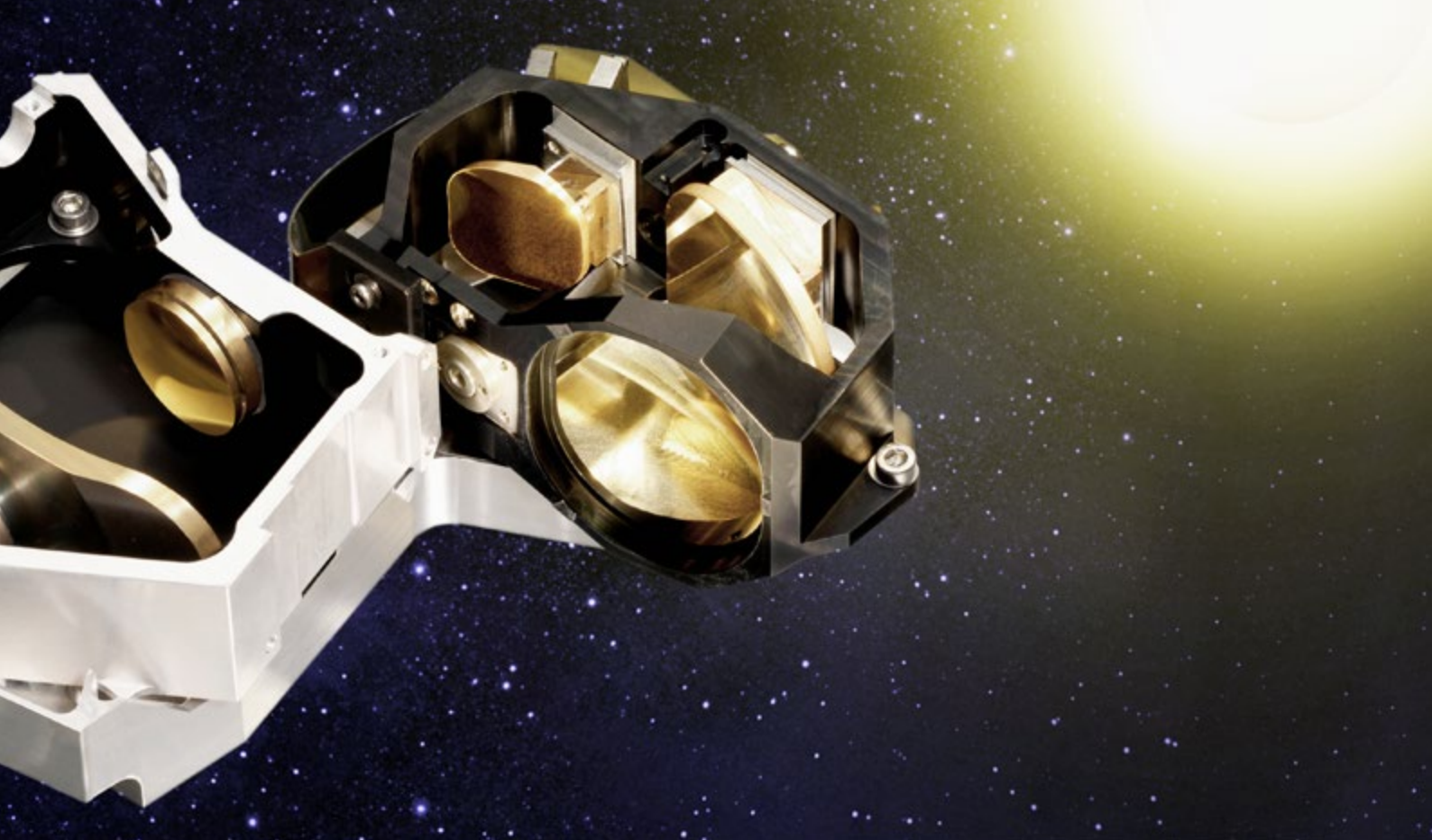
Modern and powerful mirror optics for imaging, spectroscopy, and beam shaping are based on complex optical surfaces. In the aerospace field, Fraunhofer IOF investigates the design, manufacturing, and assembly of modern telescope and spectrometer optics with on-axis and off-axis aspheres, freeform surfaces, and structured surfaces (gratings).

This year, Fraunhofer IOF has successfully demonstrated its competence in the development of optical systems for space projects and observation missions within the following projects:

MERTIS

On October 20, 2018, the European-Japanese spacecraft "BepiColombo" was launched in the direction of Mercury. The seven-year mission is to reveal the secrets of the planet nearest to the sun, Mercury.

On board is a thermal infrared spectrometer developed by Fraunhofer IOF based on diamond-machined mirrors and a



beiteter Spiegel und eines gekrümmten optischen Gitters. »MERTIS« (Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer) wird zur Charakterisierung der Minerale und Elemente auf der Merkur-Oberfläche eingesetzt.

DESIS

Mit dem DLR-Instrument »Earth Sensing Imaging Spectrometer« (kurz: DESIS) wird die Erde seit Sommer 2018 von der Internationalen Raumstation ISS mit einer Hyperspektraloptik aus 235 spektralen Kanälen beobachtet. So können wichtige Daten, z. B. über die Umwelt und zur Ressourcennutzung gesammelt werden. Für das Projekt entwickelte das Fraunhofer IOF das optische System, welches die hyperspektralen Daten für DESIS liefert.

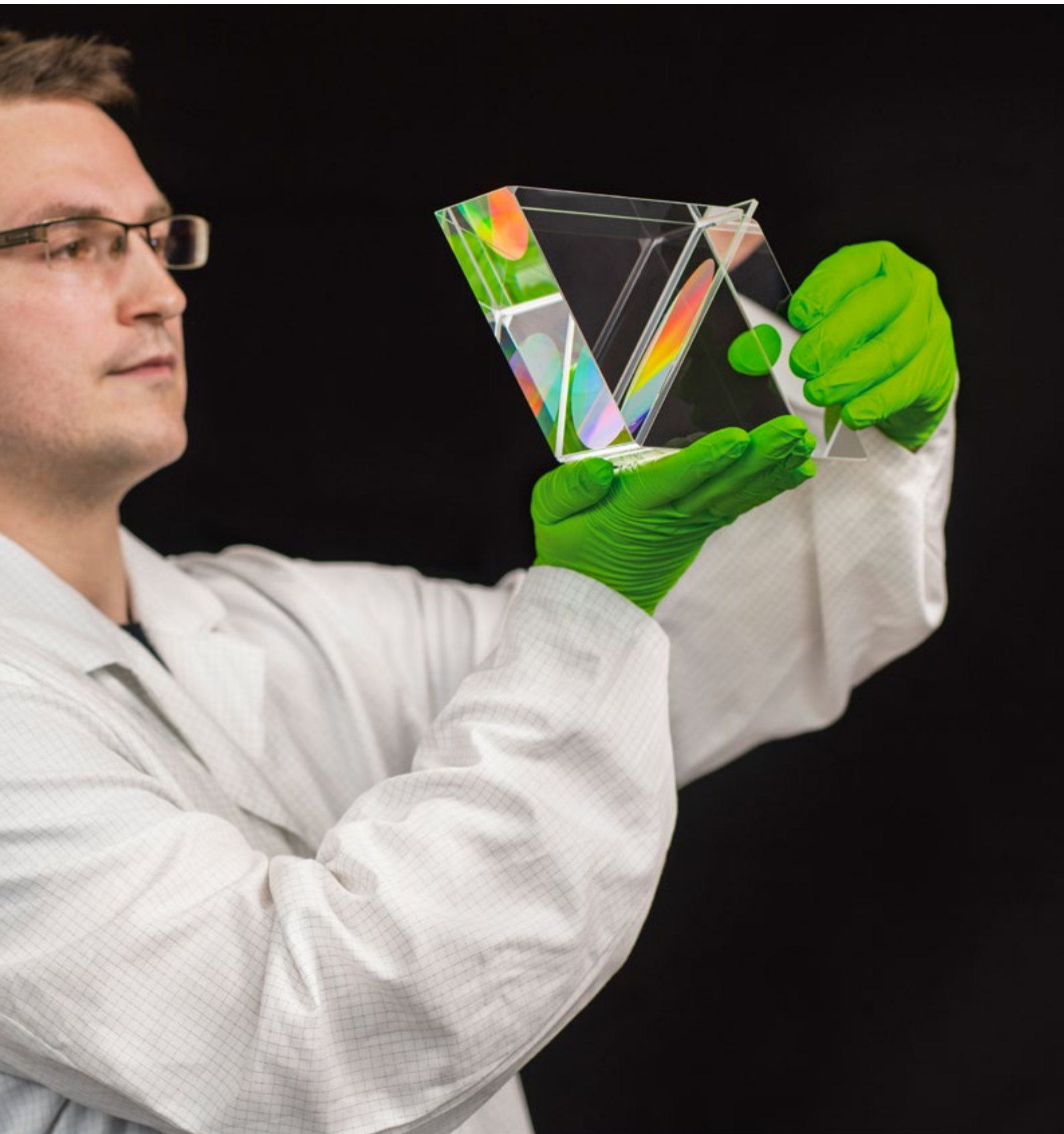
curved optical grating. "MERTIS" (Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer) is used to characterize the minerals and elements on the Mercury surface.

DESIS

With the DLR instrument "Earth Sensing Imaging Spectrometer" (DESIS), the earth has been observed since the summer of 2018 by the International Space Station ISS with a hyperspectral optics consisting of 235 spectral channels. Thus, important data, e.g. on the environment and resource use, can be gained. For the project, Fraunhofer IOF developed the optical system that provides the hyperspectral data for DESIS.

TOP *Auf dem Weg zum Planeten Merkur – thermisches IR-Spektrometer MERTIS für die Raumsonde »BepiColombo«.* | *On its way to the planet Mercury – thermal IR-spectrometer MERTIS for the "BepiColombo" spacecraft.*

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



OPTISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME

OPTICAL COMPONENTS AND SYSTEMS

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

So werden unter anderem sphärische, asphärische und freiformoptische Komponenten und Systeme für Objektive, Teleskope und Spektrometer entwickelt. Ebenso werden refraktive und diffraktive Komponenten in Gläsern und Halbleitermaterialien bis hin zu ein- und doppelseitigen Mikrolinsen-Arrays hergestellt. Die Herstellung von Gittern, Faserlasern und faseroptischen Komponenten rundet das Portfolio ab.

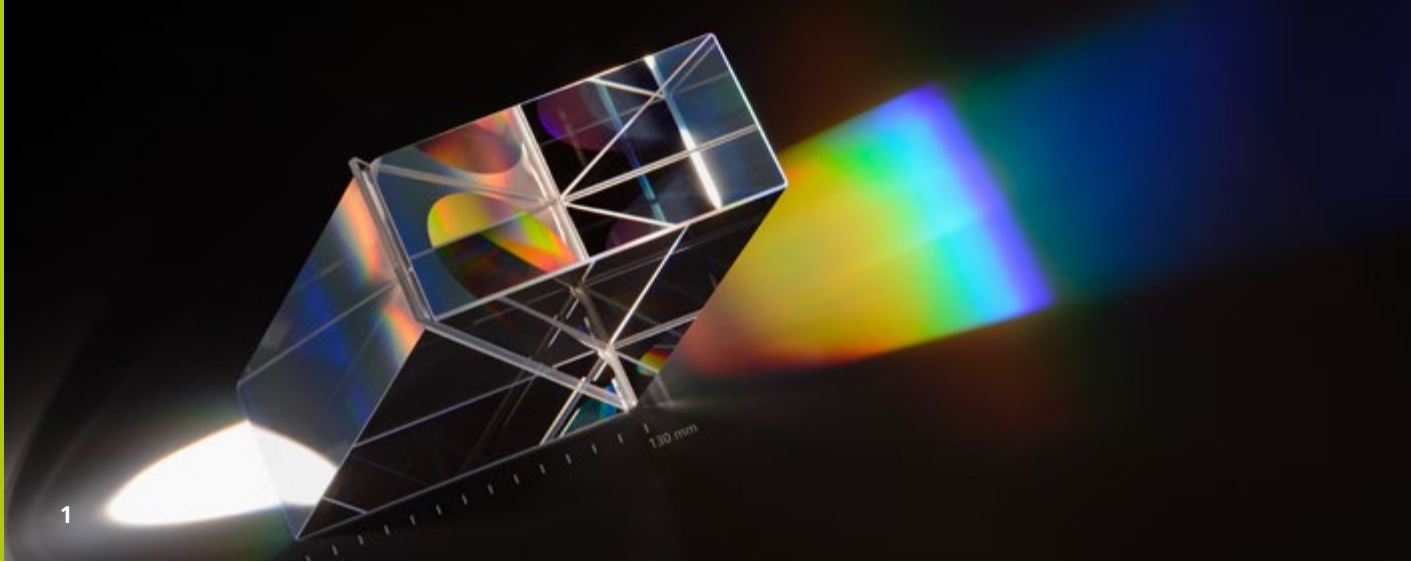
Die nachfolgenden Beiträge zeigen die in diesem Geschäftsfeld in 2018 abgeschlossenen Projekte. Bearbeitet wurden unter anderem Themen wie Gitter und Freiformspiegel für Weltraumanwendungen, Design und Streulichtsimulationen, 3D-gedruckte Optiken, Fahrzeugscheinwerfer, Mikrolinsen in Kieselglas, Thermographiesysteme sowie Quantenspektroskopie und -sensorik.

Fraunhofer IOF develops customer-specific optical and microoptical components and systems. The unique focus here is the mastery of the complete photonic process chain – from design and simulation to production and characterization – as well as the provision of classical processing methods, ultra-precision manufacturing, greyscale and electron beam lithography, additive manufacturing, and printing technologies.

Using these expertise and tools, we develop spherical, aspherical, and freeform optical components and systems for objectives, telescopes, and spectrometers. In the same way, refractive and diffractive components in glasses and semiconductor materials are produced up to single and double-sided micro lens arrays. The production of gratings, fiber lasers, and fiber optic components completes the portfolio.

The projects completed in this business field in 2018 are discussed in the following contributions. Amongst others, topics such as gratings and freeform mirrors for space applications, design and scattered light simulations, 3D-printed optics, projection headlights, microlenses in silica glass, thermography systems, as well as quantum spectroscopy and sensor technology were investigated.

LEFT *Monolithische PGP- (Prisma-Gitter-Prisma) Komponente erlaubt die Korrektur von Abbildungsfehlern in hochdispersiven abbildenden Spektrometern. | Monolithic PGP (prism-grating-prism) disperser for compensation of aberrations in high resolution imaging spectrographs.*



EINGEBETTETES BEUGUNGSGITTER FÜR SPEKTROSKOPIE IM WELTALL IMMERSED PRISM-GRATING-PRISM FOR OPTICAL APPLICATIONS IN SPACE

Aufgrund ihrer vorzüglichen Skalierungseigenschaften zwischen Auflösung und Masse haben sich Beugungsgitter in nahezu allen modernen abbildenden Spektrometern als das zentrale dispersive Bauelement etabliert. Der Einsatz von reinen Prismenspektrometern findet nur noch in Ausnahmefällen statt. Nichtsdestotrotz basieren moderne Instrumentendesigns, im Speziellen für hochauflösende Spektrometer, auf sogenannten PGP-Baugruppen (Prisma-Gitter-Prisma), welche Prismen und Gitter in besonderer Weise kombinieren. Dies ermöglicht die beste Balance zwischen einer möglichst hohen Auflösung und der Minimierung von Aberrationen.

Direkt gefügtes bzw. gebondetes Glas zeigt wichtige Vorteile für anspruchsvolle Anwendungen in rauen Umgebungen wie dem Weltraum. Im Vergleich zu anderen Füge-technologien, wie Kleben oder optisches Kontaktieren, die häufig für optische Komponenten eingesetzt werden, weist das plasmaaktivierte Direktbonds hervorragende Eigenschaften auf. Die gebildete Verbindung ist steif, sehr widerstandsfähig gegen chemische und strahlende Einflüsse und neigt nicht zu Ausgasung unter Vakuumbedingungen. Darüber hinaus ist die etablierte optische Schnittstelle intrinsisch impedanzangepasst, so dass Fresnel-Verluste an den gefügten Oberflächen vollständig unterdrückt werden, da kein zusätzliches Material eingebracht wird.

Diffraction gratings have become the central element in most modern imaging space spectrographs thanks to their unrivaled benefits in terms of resolution versus mass and volume. Nevertheless, prisms are still being used within such optical systems in order to correct for first order aberrations like smile and keystone. As a result, typical optical designs for high-resolution spectrographs rely on so-called PGP assemblies, which is a prism - grating - prism. They offer the best compromise in terms of resolution and aberration.

Directly bonded glass exhibits important benefits for demanding applications in harsh environments like space. Compared to other joining technologies, which are commonly used for optical components such as adhesive bonding or optical contacting, plasma-activated direct bonding shows superior properties. The formed connection is stiff, shows no outgassing, and is highly resistant to chemical and radiative degradation. Moreover, the established optical interface is intrinsically impedance-matched such that Fresnel losses are fully suppressed because no additional material is involved.

Here at Fraunhofer IOF, we have established a technology process that allows the design and manufacturing of monolithic PGPs (prism-grating-prism) with high

1 **Fotografie eines PGPs, welches mit weißem Licht bestrahlt wird.** |
Photograph of a PGP which is illuminated with white light.

Hier am Fraunhofer IOF haben wir einen Technologieprozess etabliert, der es ermöglicht, monolithische PGPs (Prisma-Gitter-Prisma) mit hoher Effizienz, hoher Wellenfrontgenauigkeit und hervorragender thermischer Stabilität herzustellen. Der zugrundeliegende Herstellungsprozess unterteilt sich in drei wesentliche Schritte:

- 1.) Binäre Oberflächengitter werden mit Hilfe von Elektronenstrahlolithographie und reaktivem Ionenstrahlätzen auf einem planparallelen Quarzsubstrat realisiert.
- 2.) Das Gittersubstrat wird dann durch direktes Bonden mit dem ersten Prisma in eine permanente und feste Verbindung gefügt.
- 3.) Unter Nutzung des zweiten Prismas und des gleichen Fügeprozesses wird schließlich das finale monolithische PGP-Element hergestellt.

Der gesamte Prozessablauf findet unter Reinraumbedingungen statt. Mehrere Prototypen wurden mit Beugungseffizienzen im Bereich zwischen 90 % und 95 % und einer Ausrichtgenauigkeit kleiner als eine Bogenminute zu Demonstrationszwecken realisiert.

throughput, high wavefront accuracy, and outstanding thermal stability. The underlying manufacturing process is threefold:

- 1st) Electron beam lithography and deep-reactive ion etching is used to manufacture binary surface relief gratings into a plane-parallel fused silica substrate.
- 2nd) The grating is then joined to the first prism by direct bonding and subsequently annealed to establish a first strong bond, i. e. a grism.
- 3rd) The second prism is finally merged to the grism using the same direct bonding process.

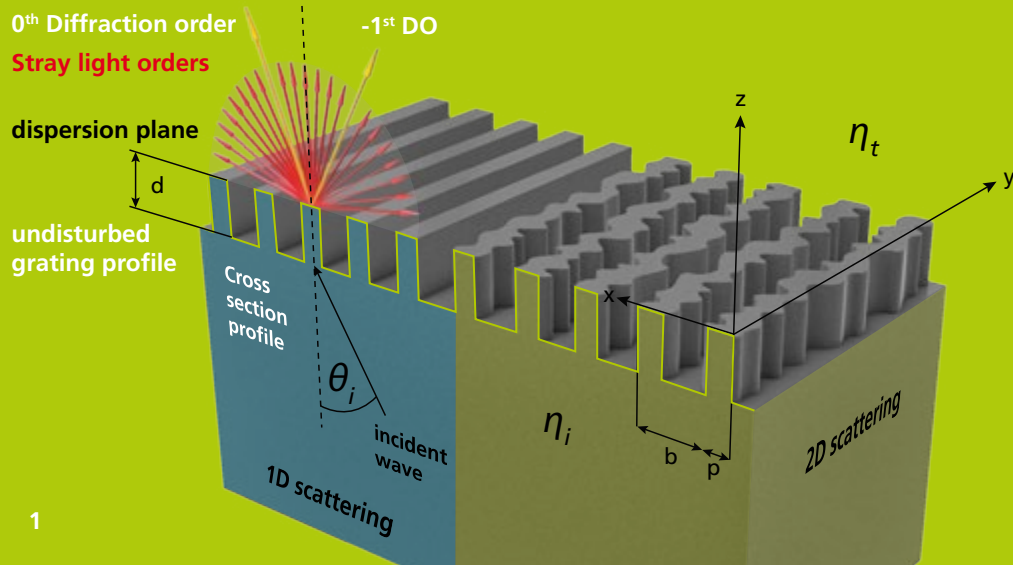
The entire process flow takes place in a cleanroom environment. Several prototypes have been realized with an optical throughput (diffraction efficiency) between 90 % - 95 % and an alignment accuracy smaller than one arc minute.

AUTHORS

Thomas Flügel-Paul
Carolin Rothhardt
Kevin Grabowski

CONTACT

Dr. Thomas Flügel-Paul
Phone +49 3641 807-434
thomas.fluegel-paul@iof.fraunhofer.de



1

SIMULATION VON STREULICHT IN BEUGUNGSGITTERN

SIMULATION STRAY LIGHT OF DIFFRACTION GRATINGS

Beugungsgitter stellen heutzutage eine der Schlüsselkomponenten in vielen optischen Anwendungen dar. Insbesondere in spektrometrischen Instrumenten für die Astronomie und Erdbeobachtung (z. B. GAIA, FLEX, Sentinel 1-4) müssen Beugungsgitter daher strenge Spezifikationen erfüllen. Die Anforderungen an das Streulichtverhalten der Gitter werden dabei immer anspruchsvoller, da die radiometrische Genauigkeit der spektrometrischen Messung vor allem durch Streulicht reduziert wird. Dessen Ursache liegt in stochastischen Störungen der Gittergeometrie, wobei eine der bekanntesten Streulichtquellen die Kantenrauigkeit (LER) der Gitterstege darstellt (Abb. 1). Es ist daher von besonderem Interesse, die Auswirkungen stochastischer Störungen auf das Streulichtverhalten des Gitters vorherzusagen.

Die direkte Methode, die winkelaufgelöste Streulichtverteilung (ARS) zu berechnen, liegt in zweidimensionalen optischen Simulationstechniken, wie z. B. die rigorose Analyse gekoppelter Wellen (RCWA). Allerdings ist dieser 2D-Ansatz aufgrund des enormen numerischen Aufwands nicht praktikabel und schon für ein kleinperiodisches Gitter liegt die Berechnungszeit in dieser Größenordnung bei mehreren Tagen. Diese Einschränkung kann umgangen werden, wenn nur das Querschnittsprofil innerhalb einer

Nowadays, many optical applications employ diffraction gratings, which have become one of the most critical components. Especially in high-performance spectrometry (e.g., in satellites like GAIA, FLEX, Sentinel 1-4), the gratings are required to meet challenging demands. In particular, the stray light performance of spectrometer gratings is becoming increasingly critical as the radiometric accuracy of spectroscopic measurements is constrained by diffuse scattering. The scattered light originates from stochastic disturbances of the grating geometry. A prominent source is Line Edge Roughness (LER), which describes the stochastic deviation of the grating line edge from its ideal position (Fig. 1). It is therefore crucial to predict the stray light performance of stochastically disturbed gratings. The straight-forward method to calculate the angle resolved scattering (ARS) is offered by two-dimensional simulation tools, e.g. the rigorous coupled wave analysis (RCWA). Unfortunately, this 2D-approach suffers from computation times that are typically in the range of several days even for small period gratings. However, this restriction can be overcome by simply considering the cross-section profile within a 1D-RCWA-simulation (ARS1D). We have shown by analytical considerations within the frame of first Born approximation that the two-dimensionality of the entire problem can be tackled by a simple multiplication of the

1 Darstellung einer LER-gestörten Gitterstruktur und deren Querschnittsprofil. |

Illustration of a LER-disturbed grating structure and its cross-section profile.

1D-RCWA-Simulation berücksichtigt wird (ARS1D). Im Rahmen einer Bornschen Näherung konnte gezeigt werden, dass die Zweidimensionalität des Problems durch eine simple Multiplikation der 1D-ARS mit der (die Störung beschreibenden) spektralen Leistungsdichte (PSD) berücksichtigt werden kann [1].

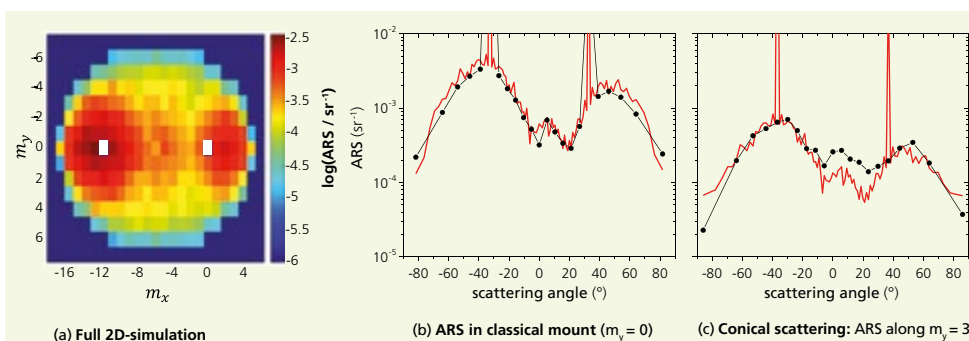
Diese Beziehung erlaubt eine enorme Reduktion des numerischen Aufwands und damit Berechnungszeiten von nur wenigen Sekunden. Die Methode kann dazu benutzt werden, das Streulichtverhalten unterschiedlicher 1D-Gitterstrukturen zu untersuchen (Abb. 2). Damit können selbst großperiodische Gitter im Rahmen rigoroser Simulationsrechnungen behandelt werden.

Literatur / References

[1] M. Heusinger, D. Michaelis, T. Flügel-Paul, U.D. Zeitner: Diffuse scattering due to stochastic disturbances of 1D-gratings on the example of line edge roughness, Optics Express 26 (2018) No. 21, pp. 28104-28118.

1D-ARS with the power spectral density of the disturbance (PSD) [1].

This relation allows an enormous reduction of the numerical effort, i.e., the computation time can be reduced to only a few seconds. The method can hence be used in order to investigate scattering spectra of various 1D-grating structures (Fig. 2). In this way, even low-frequency lamellar gratings can be rigorously examined.



2 Vergleich der numerisch berechneten Streuspektren innerhalb des 1D- und 2D-Ansatzes (rote Linie bzw. schwarze Punkte) für ein übliches Spektrometergitter. | Comparison of numerically calculated scattering spectra within the 1D and 2D approach (red line, black dots) for a common spectrometer grating.

AUTHORS

Martin Heusinger
Dirk Michaelis
Thomas Flügel-Paul
Uwe Detlef Zeitner

CONTACT

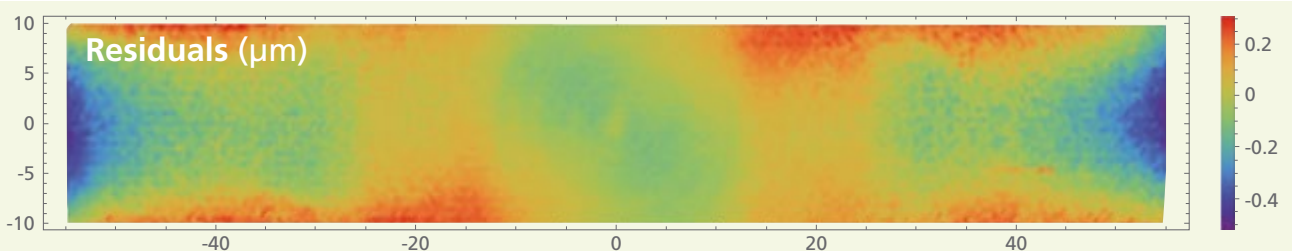
Dr. Thomas Flügel-Paul
Phone +49 3641 807-434
thomas.fluegel-paul@iof.fraunhofer.de

STARK GEKRÜMMTE FREIFORMOPTIKEN FÜR DIE SATELLITENGESTÜTZTE ERDBEOBACHTUNG

HIGHLY CURVED FREEFORM OPTICS FOR SATELLITE BASED EARTH OBSERVATION

Progressive Teleskop- und Spektrometer-Designs nutzen zunehmend die sich aus dem Einsatz von Freiformelementen ergebenden Freiheitsgrade. Für die Realisierung solcher freiformbasierten Designs werden technologisch neue Wege erschlossen. Insbesondere der Einsatz von metallbasierten Optiken erlaubt die Entwicklung neuartiger Fertigungstechnologien. Am Beispiel eines extrem gekrümmten Freiformspiegels werden Herausforderungen für die Erforschung notwendiger Technologien im Bereich Fertigung und Metrologie dargestellt. Die Freiformoptik wird in einem Erdbeobachtungsinstrument für die Erfassung von Daten des globalen Aerosol-Indexes eingesetzt. Grundlage der verwendeten Fertigungstechnologie ist die Möglichkeit, mittels monokristalliner Diamantwerkzeuge und ultrapräziser Bearbeitung bestimmte Metalle und deren Legierungen in duktil-zerspanenden Bearbeitungsverfahren bis hin zu optischen Qualitäten für den NIR-Bereich zu realisieren. Der Einsatz von röntgenamorphen Legierungen wie Nickel-Phosphor (NiP) ermöglicht die Anwendung von Polier-

Progressive telescope and spectrometer designs are increasingly exploring the potential that results from the use of freeform elements. The realization of such freeform-based designs advances the development of new technologies. In particular, the use of metal optics allows for the development of novel production technologies. As an example, highly curved freeform optics show the challenges for manufacturing and metrology. The freeform optics itself are part of an environment observation instrument for the monitoring of the global aerosol index. Ultraprecise manufacturing using monocrystalline diamonds is the base technology for the ductile cutting of non-ferrous metal alloys for IR and NIR applications. The use of X-ray amorphous alloys such as nickel-phosphorus (NiP) enables the application of polishing processes and ensures the shift of the application range of metal optics towards shorter wavelengths (VIS, UV, EUV ...). The described freeform mirror consists of aluminum (RSA6061) as base material and NiP as technological functional layer. By changing the alloy components of the substrate material, it is



2 Formabweichung des Freiformspiegels: 126 nm rms (taktile Messung mittels Panasonic UA3P). |
Shape deviation of the freeform mirror: 126 nm rms (tactile measurement via Panasonic UA3P).

verfahren und sichert die Verschiebung des Einsatzbereiches der Metalloptiken hin zu kürzeren Wellenlängen (VIS, UV, EUV ...). Die Materialkombination für den beschriebenen Freiformspiegel kombiniert Aluminium (RSA6061) als Substratmaterial und NiP als technologische Funktionsschicht. Die Vorfertigung des Spiegelkörpers erfolgt in klassischer CNC-Fräs- und -Drehbearbeitung. Die anschließenden Thermalbehandlungsschritte gewährleisten die langzeitstabile Formtreue der gewählten Materialkombination im Bereich weniger Nanometer. Die mittels XY-Polynomen beschriebene optische Freiformfläche besitzt eine annähernd zylindrische Form und eine Abweichung zur Best-Fit-Asphäre von ca. 5 mm, bei einem Flächenanstieg von beinahe 45° (Abb. 1). Die Fertigung erfolgt mittels Fast-Tool-Servo unterstützten Drehens, bei dem das Bearbeitungswerkzeug auf einer angetriebenen Zusatzachse synchron zur Drehspindel bewegt werden kann und so den Freiformanteil in die optische Oberfläche schneidet. Die Fläche wird mit dem taktilen Messsystem Panasonic-UA3P unter Berücksichtigung des Referenzbezugs von optischem und mechanischem Koordinatensystem flächig vermessen. Die Daten werden in eine Rückkopplungsschleife überführt, um in einem deterministischen Prozess die Oberflächenform zu optimieren. Nach erfolgreicher Korrektur wurde eine Abweichung zur Sollform von nur 126 nm rms realisiert (Abb. 2). In einem chemisch-mechanischen Polierschritt (CMP) wurde die Oberflächenrauheit auf Werte < 0,6 nm rms reduziert. Aufgrund der Reflexionsanforderung des für die Anwendung gewählten Wellenlängenbereichs von 300 nm bis 600 nm wurde eine hochreflektierende Schicht aus Aluminium appliziert, um eine durchschnittliche Reflexion von mehr als 90 % zu gewährleisten. Die beschriebene Freiformoptik demonstriert, wie Forschungen in Design und Fertigungstechnologien die Entwicklung innovativer Optiken vorantreiben.

even possible to avoid bi-metal effects and to apply this material combination for applications with local thermal gradients. The main body of the mirror is manufactured with classic CNC milling and turning operations. Subsequent thermal treatments ensure the long term stable shape accuracy of the chosen material combination within the range of a few nanometers. The freeform surface is described by XY-polynomials and consists of a nearly cylindrical shape with a deviation from a calculated best-fit asphere of approximately 5 mm and a slope of almost 45° (Fig. 1). The manufacturing is realized by means of fast tool servo turning, which uses an additional axis that is moving synchronously with the turning spindle and thus, cutting the freeform fraction into the optical surface. The surface is examined with a tactile measurement system (Panasonic UA3P) with reference to the optical and mechanical coordinate systems. The data is transferred into a feedback loop, which is used to minimize the surface error in a deterministic process. The result shows a shape deviation of only 126 nm rms (Fig. 2). The surface roughness was reduced by chemical mechanical polishing (CMP) to < 0.6 nm rms. By applying a highly reflective layer of aluminum, the reflectance requirements of the application of more than 90 % were achieved, averaged over the wave length range from 300 nm to 600 nm. The described freeform optics demonstrate how research in design and manufacturing technologies is driving the development of innovative optics.

AUTHORS

Ralf Steinkopf

Johannes Hartung

Wilko Fuhlrott

Dieter Gäbler

Stefan Risse

CONTACT

Dr. Stefan Risse

Phone +49 3641 807-313

stefan.risse@iof.fraunhofer.de

1 *Freiformspiegel für den Einsatz in einem satellitengestützten Erdbeobachtungssystem.* |

Freeform mirror for a satellite based earth observation system.



3D-TINTENSTRAHLDRUCK OPTISCHER ELEMENTE 3D-INKJET PRINTING OF OPTICAL COMPONENTS

Konventionell werden Mikro- und Makrooptiken über spanende Verfahren aus Glas oder durch die Abformung viskoser Polymere und Gläser gefertigt – damit lassen sich große Losgrößen realisieren. Hochindividualisierte optische Komponenten können bisher jedoch nicht wirtschaftlich hergestellt werden. Am Fraunhofer IOF wird mit dem Tintenstrahl Druck von Ormoceren® nun ein neues additives Herstellungsverfahren von dreidimensionalen Mikro- und Makrooptiken untersucht, das durch seinen digitalen Charakter die Herstellung individualisierter Optikkomponenten flexibel und kostengünstig ermöglicht.

Die Optiken werden dabei aus einem organisch-anorganischen Hybridpolymer, dem sogenannten Ormocomp®, gefertigt. Dieses Material ist im gesamten visuellen Spektralbereich hochtransparent und lässt sich genauso flexibel verarbeiten wie konventionelle organische Polymere. Durch den hohen anorganischen Anteil im Materialverbund hat Ormocomp® jedoch eine erhöhte chemische, thermische und mechanische Stabilität und ermöglicht somit die Herstellung robuster, hochindividualisierter und dreidimensionaler Optiken.

Micro and macro optical components are conventionally manufactured using milling or molding techniques of polymers and glasses. The fabrication of medium and large lot sizes is very cost efficient with these techniques. However, for cost effective manufacturing of single individualized optics, they are not suitable. To overcome this issue, inkjet printing of Ormocers® is being introduced at Fraunhofer IOF. This digital manufacturing technique is very flexible, provides a high freedom of design, and thus enables the fabrication of such highly individualized three-dimensional micro- and macro optical components.

For fully inkjet printing 3D-optical components, Ormocomp®, a hybrid organic-inorganic polymer, is used. It combines beneficial properties of organic and inorganic materials. Its processability is comparable with conventional polymers. However, it has a higher chemical, mechanical, and thermal stability because of its inorganic components. In addition, it shows a very high optical transparency in the complete visible spectrum. Therefore, Ormocomp® is highly suitable for the manufacturing of robust 3D-optics.

- 1 **Integrierte Funktionalitäten (LEDs, Baffles, gedruckte Silberspiegel) in tintenstrahlgedruckte Formkörper aus Ormocomp®.** | *Integrated functionalities (LEDs, baffles, inkjet printed silver mirrors) in fully inkjet printed 3D-Ormocomp®-structures.*
- 2 **Vollständig tintenstrahlgedruckte Formkörper aus Ormocomp®.** | *Fully inkjet printed optical components made of Ormocomp®.*

Mit einem kommerziellen Tintenstrahldrucker wird Ormocomp® schichtweise zu einem 3D-Körper aufgebaut. Hierzu wird eine niederviskose Tinte lagenweise verdrukt und durch eine UV-Belichtung vernetzt und verfestigt. Je nach gewählter Auflösung beträgt die Dicke einer einzelnen Drucklage zwischen 3 µm und 10 µm. Gedruckte Makrooptiken werden daher aus mehreren tausend Einzelschichten aufgebaut.

Durch die Optimierung der Auflösung der gedruckten Lagen, der UV-Belichtung und der Anpassung der Druckdesigns lassen sich bereits Formgenauigkeiten der gedruckten Optiken erreichen, wie sie für Beleuchtungsoptiken üblich sind. So konnten schon Oberflächen von gedruckten Makrooptiken mit Rauheiten von < 60 nm und einem PV < 20 µm gedruckt werden /1/. Abbildung 2 zeigt einige Beispiele vollständig gedruckter optisch transparenter 3D-Körper aus Ormocomp®.

Durch das additive Herstellungsverfahren lassen sich in die gedruckten Optiken zusätzliche Funktionen einbringen. Abbildung 1 zeigt hybrid integrierte LEDs mit gedruckten Silberleitbahnen, monolithisch integrierte Absorberstrukturen und tintenstrahlgedruckte Silberspiegel in gedruckten Ormocomp®-Körpern.

Das Anwendungspotenzial des Verfahrens liegt im Rapid-Prototyping von Optiken und der Herstellung hochindividualisierter Komponenten mit kleinen Losgrößen.

Literatur / References

/1/ Erik Beckert, Falk Kemper, Sophie Sauva, Maximilian Reif: Additive Manufacturing of Optical Components, Printing for Fabrication Proceedings, 2018, pp. 182-185 (4).

The 3D-Ormocomp® components are manufactured using a commercial inkjet printer. The structures are sliced and printed layer-by-layer. Each printed layer of low viscous ink has to be UV-cured in order to crosslink the polymer ink and to guarantee mechanical stability of the single layers. With each printing run, a 3 µm to 10 µm thick layer is applied. Thus, macroscopic optical components consist of many thousands of layers.

By optimizing the resolution of the printed layers, the UV-curing conditions, and adapting the printed designs, high dimensional accuracies of the 3D-components could be achieved. The resulting surface roughness of macro optics is in the range of < 60 nm with a PV < 20 µm /1/. With these parameters, the optics are suitable for the use in lighting applications. Figure 2 shows some examples of fully inkjet printed 3D-optical components made of Ormocomp®. Because of the additive manufacturing approach, a further functionalization of the printed optics is possible. Figure 1 shows integrated LEDs with printed conductive tracks, integrated baffles and inkjet printed silver mirrors in fully inkjet printed three-dimensional optics.

The potential of the introduced technique lies in its use for rapid prototyping and the manufacturing of individualized components with very small lot sizes.

AUTHORS

Falk Kemper
Maximilian Reif
Lisa Pohle
Thomas Schönfelder
Erik Beckert

CONTACT

Dr. Erik Beckert
Phone: +49 3641 807-338
erik.beckert@iof.fraunhofer.de



MIKROOPTIK FÜR AUTOMOTIVE SCHEINWERFER

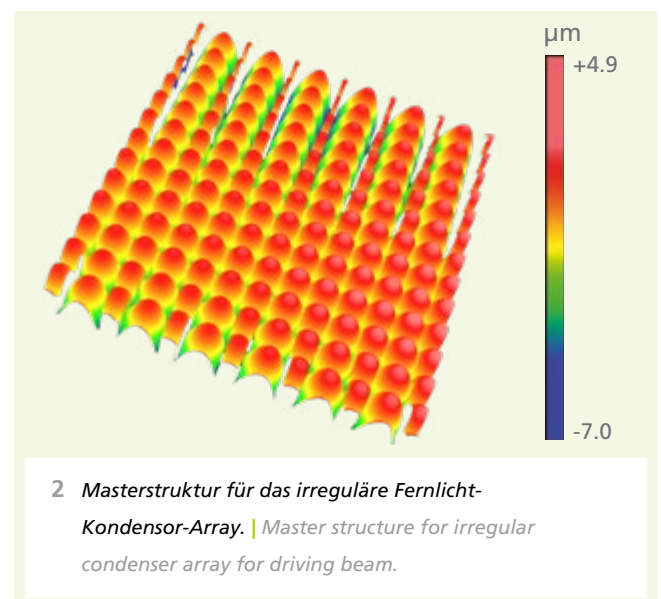
MICRO-OPTICS FOR AUTOMOTIVE HEADLAMPS

Etablierte Optiktechnologien für Kfz-Scheinwerfer wie Freiformspiegel, Asphären und Lichtleiter stoßen hinsichtlich Miniaturisierung, flexibler Konturgestaltung und Modularisierung an physikalische Grenzen. Das Fraunhofer-intern geförderte Projekt »SSL-StructuredSpotLight« untersucht den Einsatz von Tandem-Mikrolinsen-Arrays als strahlformende Tertiäroptik für automotiv LED-Lichtquellen. Die Mikrooptik erlaubt eine starke Verringerung der optischen Systemlänge und -fläche.

Tandemlinsen-Arrays als mikrooptische Realisierung des klassischen Wabenkondensors ermöglichen die hocheffiziente, étendue-erhaltende, homogene Ausleuchtung rechteckiger oder hexagonaler Felder /1/. Mit unter den Eingangslenslets vergrabenen Cr-Masken, die im Array als Blenden fungieren, erhält man einen mikrooptischen Mehrkanalprojektor /2/, der auf Kosten der Systemtransmission auch kontinuierliche Helligkeitsverteilungen generiert. Zur effizienten Erzeugung kontinuierlicher Intensitätsverteilungen wurde ein blendenfreier Optikansatz entwickelt, der die Vorteile beider Verfahren vereint: Irreguläre Wabenkondensoren /3/ formen automotiv Fern- und Abblendlichtverteilungen. Die schaltbare Segmentierung der Abstrahlung für ein blendfreies Fernlicht erfolgt durch kontrolliertes Kanalübersprechen. Die Elemente einer horizontalen LED-Zeile adressieren dabei entweder den regulären Betrieb des Wabenkondensors oder das Kanalübersprechen unterschiedlicher Ordnung (Abb. 3).

Well-established optical technologies for automotive headlamps like freeform mirrors, aspheres, and lightguides are reaching their limits in terms of miniaturization, flexible contouring, and modularization. The Fraunhofer internally funded project "SSL-StructuredSpotLight" investigates the use of tandem microlens arrays as beam-shaping tertiary optics for automotive LED light sources, which enable multi-channel optics architectures with minimal system length and area.

Tandem lens arrays as micro-optical fly's eye condenser enable efficient, étendue-conserving homogeneous illumination of rectangular or hexagonal areas /1/. The micro-optical



1 **Optischer Demonstrator eines Fernlichtscheinwerfers.** | *Optical demonstrator of a driving beam.*

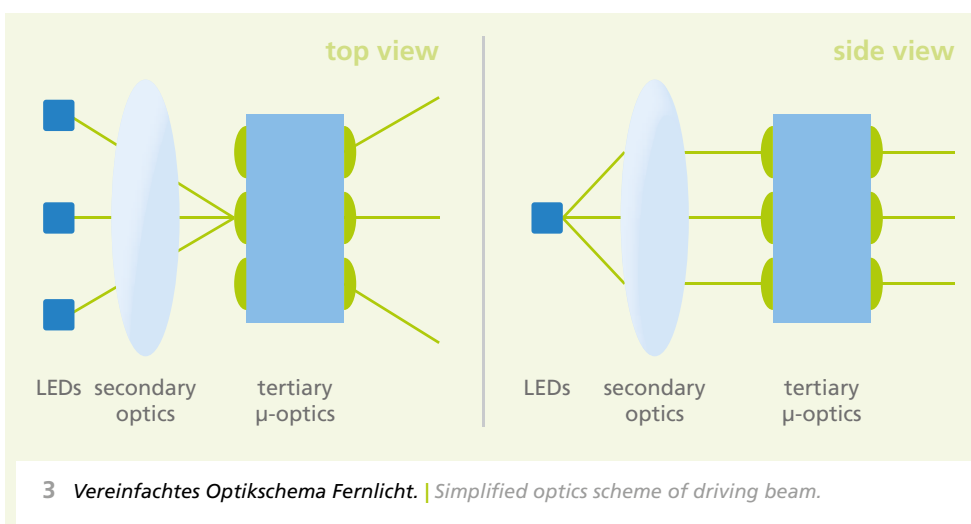
Das Mastering der irregulären Linsen-Arrays der Wabenkondensoren erfolgt durch Grautonlithographie. Unregelmäßige Linsen-Arrays (Abb. 2) mit Pfeilhöhen von über 50 µm und beugungsbegrenzter Profiltreue wurden realisiert /4/. Durch die anschließende Replikation mittels UV-Reaktionsguß erhält man zweiseitige justierte Polymer-auf-Glaselemente. Der Fernlichtdemonstrator (Abb. 1) besteht aus zwei identischen Modulen, die jeweils ein LED-Array, eine Kollimationsoptik bestehend aus Feldlinse und Kollimationsasphäre und das Tandem-Array in einem Metallgehäuse vereinigen. Die horizontal gewinkelte Anordnung der Module zueinander ermöglicht das Schalten horizontaler Segmente von nur 1.5° Breite mit einer den ECE-Regeln entsprechenden Lichtstärke von > 50 kcd.

Literatur / References

- /1/ P. Schreiber et al.: Homogeneous LED-illumination using microlens arrays, Proc SPIE Vol. 5942 (2005).
/2/ P. Schreiber et al.: Projection display having Kohler illumination of projection lenses, US 8,777,424 B2 (2014).
/3/ Ch. Li et al.: Etendue conserving light shaping using microlens arrays with irregular lenslets, Proc. SPIE Vol. 10693 (2018).
/4/ R. Leitel et al.: Evaluation of lenslet fabrication technologies for micro-optical array projectors, Proc. SPIE 10692 (2018).

multi-channel slide projector with additional buried apertures offers continuous light intensity distributions at the expense of lowered system transmission /2/. We developed a new optics design combining advantages of both approaches: Irregular fly's eye condensers /3/ form automotive high and low beam intensity distributions. Switchable segmentation for glare-free driving beam uses controlled array channel cross-talk. The chips of a linear LED array address either regular operation of the fly's eye condenser or channel-crosstalk of different order (Fig. 3).

Grayscale lithography is employed for the mastering of the fly's eye condensers. Irregular lens arrays (Fig. 2) with sag height of more than 50 µm and diffraction limited profile quality were generated /4/. Subsequent replication by UV-molding realizes double sided, aligned polymer-on-glass elements. The driving beam demonstrator (Fig. 1) consists of two identical modules, each incorporating LED array, collimation optics (field lens and collimation asphere) and tandem array in a metal housing. Tilted assembly of the two modules enables switching of horizontal segmentation with 1.5° width and a ECE conform luminous intensity of > 50 kcd.

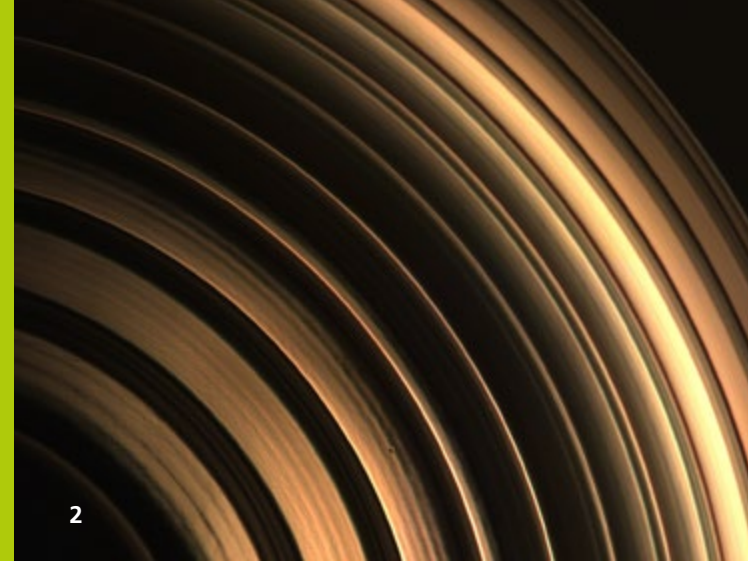
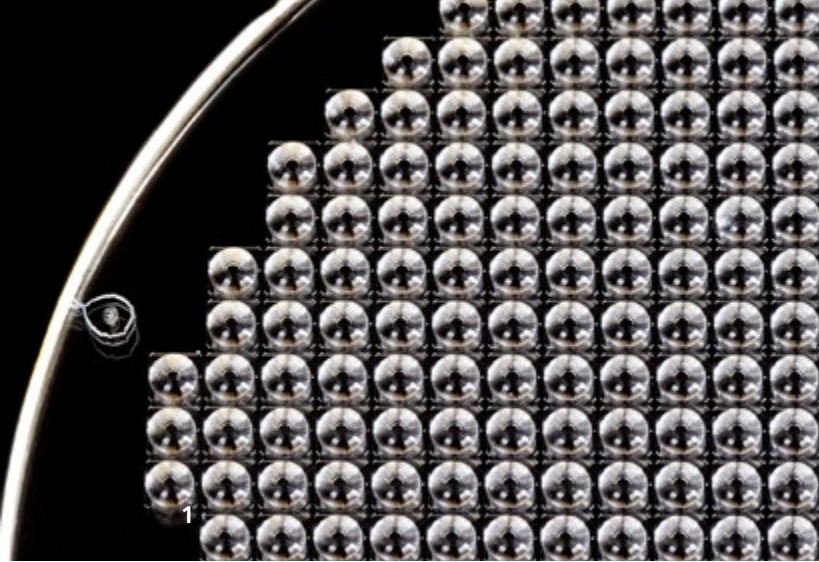


AUTHORS

Peter Schreiber
Christoph Wächter
Stephanie Fischer
Chen Li
Dirk Michaelis
Robert Leitel
Ralf Rosenberger
Marko Stumpf
Felix Kraze

CONTACT

Dr. Peter Schreiber
Phone +49 3641 807-430
peter.schreiber@iof.fraunhofer.de



MIKROLINSEN IN KIESELGLAS DURCH UV-ABFORMUNG UND TROCKENÄTZEN MICROLENSSES IN FUSED SILICA BY UV-REPLICATION AND DRY ETCHING

Die Erzeugung von Mikro- und Nanostrukturen durch UV-Abformverfahren und anschließendes reaktives Ionenätzen (RIE) ist eine attraktive Technik, weil die Abformung als Ätzmaske für die anschließende Übertragung dient und so den oft aufwändigen Lithografieschritt erspart. Was für Nanostrukturen und für geringe Strukturhöhen etabliert ist ^{1/1}, birgt zusätzliche Herausforderungen für die Erzeugung refraktiver Mikrooptik wie Mikrolinsen, Diffusoren, Prismen etc. in SiO₂ oder Si. Die Gründe hierfür sind die große Strukturhöhen von einigen 10 µm und die Forderung nach präziser 1:1 oder Proportional-Übertragung von 3D-Strukturen bei geringer Oberflächenrauheit. Daraus ergeben sich zusätzliche Forderungen an UV-Polymer und Prozesse wie präzise Abformung bei geringer und gleichmäßiger Polymerdicke, homogene RIE-Übertragungseigenschaften, Ätzraten ähnelnden von SiO₂ oder Si, Prozessfenster für glatte Oberflächen und steuerbares Ätzratenverhältnis.

Zur Lösung dieser Aufgaben wurden RIE-Übertragungstests an unterschiedlich hohen Mikrolinsen aus UV-härtbaren Polymermaterialien auf Quarzglassubstraten durchgeführt. Durch mikroskopische und profilometrische Charakterisierung teilweise transferierter Mikrolinsen (Abb. 3) konnten mehrere Materialien mit günstigen Übertragungseigenschaften und Verarbeitbarkeit identifiziert werden. Hierbei wurden die

Micro- and nanopatterning by a combination of replication and reactive ion etching (RIE) is an attractive technology. Here, the replicated pattern serves as an etching mask replacing a costlier lithography process. Being state of the art for nanostructures and low structural height ^{1/1}, the method is, however, challenging for the generation of refractive optical microstructures like microlenses, diffusers, prisms etc. in fused silica or silicon. Reasons for this are the rather high sag of several 10 µm and the requirement for precise 1:1 or proportional transfer of 3D profiles at low surface roughness. This leads to additional demands concerning the UV-curable polymer used and process steps, especially concerning uniform polymer base-layer thickness, homogeneous etching characteristics, and process windows for tunable transfer rates comparable to those of fused silica (or Si) at low surface micro-roughness.

In order to solve these problems, we performed test etchings with UV cured microlenses on a fused silica substrate using different polymers as well as different lens sag. In particular, we characterized partially transferred lenslets (Fig. 3) by microscopic inspection and surface profilometry. Several polymers with favorable transfer characteristics were identified by evaluation of slope angle dependent etching defects and micro roughness as well as transfer rate.

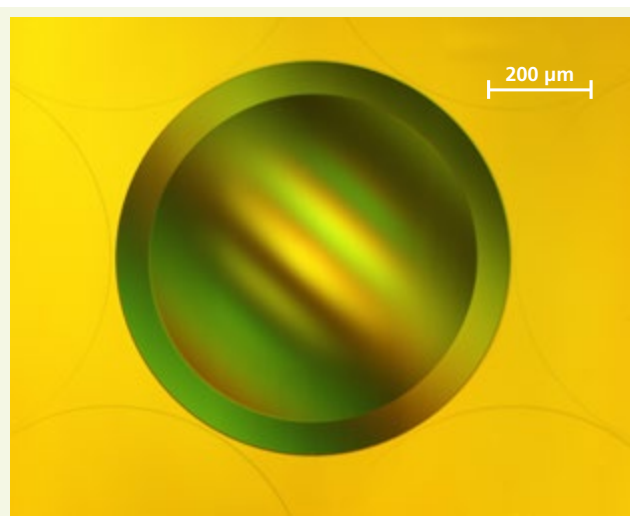
1 *Kieselglaswafer mit Mikrolinsen.* | *Fused silica wafer with microlenses.*

2 *Detail einer durch Reaktivionenätzen übertragenen Fresnel-Mikrolinse.* | *Detail of Fresnel microlens transferred by RIE.*

Defektfreiheit (Ätzgrübchen), Mikrorauheit, maximal übertragbare Flankenwinkel und die Selektivität zu SiO₂ beurteilt.

Als erstes Anwendungsbeispiel wurde eine aufwändig mittels Grautonlithografie /2/ hergestellte Fresnel-Linsen-Masterstruktur auf Kieselglaswafer abgeformt und übertragen (Abb. 1). Es wurde ein Ätzratenverhältnis von 1:1, eine Flankensteilheit der Störflanken von 80°, eine Oberflächenrauheit < 2 nm rms bei einer übertragenen Tiefe von 60 µm erreicht. Abbildung 2 zeigt eine Dunkelfeld-Mikroskopaufnahme eines Linsenviertels.

Das Verfahren birgt großes Potenzial, weil es durch die geringeren Kosten neue Anwendungsfelder für Mikrooptik in Kieselglas erschließt, hier beispielhaft Kollimatoren für UV-LEDs.



3 *Teilweise übertragene Mikrolinse. |*
Partially transferred microlens.

As a first demonstration of the technology, we transferred a replicated Fresnel lens to UV grade fused silica (Fig. 1). The replication master was generated before using an elaborate gray scale lithography process /2/.

We achieved a transfer ratio of 1:1, draft angle of 80°, and a rms surface roughness of < 2 nm at an etching depth of 60 µm. Figure 2 shows a dark field micrograph of a lens detail.

This technology is promising for the collimation of UV LEDs and for further applications where precise fused silica elements at reduced cost are required.

References / Literatur

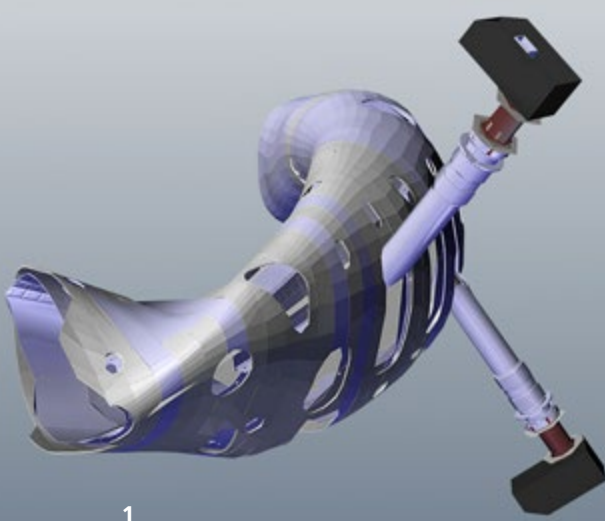
- /1/ P. Jin, N. Liu, T. T. Liu, J. B. Tan: Replication of micro optical element with continuous relief profile in fused silica using UV-embossing and Reactive Ion Etching, Microelectronic Engineering Volume 87, Issues 5-8, May–August 2010, Pages 1086-1090.
- /2/ H.-C. Eckstein et al.: High dynamic grayscale lithography with an LED based micro-image stepper, Proc. of SPIE Vol. 9780 (2016), p. 97800T.

AUTHORS

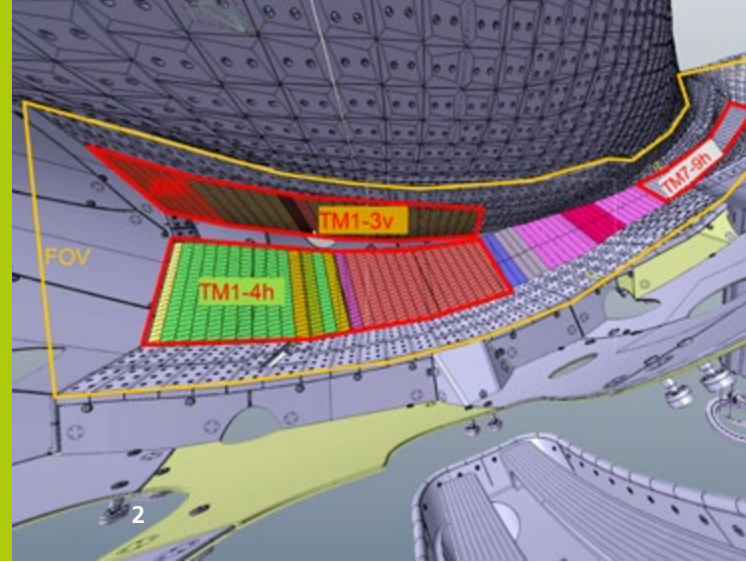
Peter Dannberg
Andre Matthes
Sylke Kleinle

CONTACT

Dr. Peter Dannberg
Phone +49 3641 807-420
peter.dannberg@iof.fraunhofer.de



1



2

THERMOGRAFIESYSTEM FÜR DAS FUSIONSEXPERIMENT WENDELSTEIN 7-X

THERMOGRAPHY SYSTEM FOR THE FUSION EXPERIMENT WENDELSTEIN 7-X

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) untersucht an seinem Standort Greifswald die Eignung des Stellarator-Konzepts als Grundlage für künftige Fusionskraftwerke. Die für die Kernfusion erforderlichen hohen Temperaturen im mittels Magnetfeldern geführten Plasma führen zu erheblichen thermischen Belastungen innerhalb des Plasmagefäßes – insbesondere der sogenannten Divertoren. Diese bestehen aus Graphitkacheln, über die die Randschicht des Plasmas gelenkt wird, um dieses von Verunreinigungen zu befreien. Damit ein dauerhafter, sicherer Betrieb der Anlage gewährleistet werden kann, müssen diese Bereiche thermografisch überwacht werden.

Für diese Aufgabe wurde am Fraunhofer IOF in Zusammenarbeit mit dem IPP ein Thermografiesystem entwickelt, das eine ortsauflösende Temperaturmessung auf den Divertorkacheln während des Betriebes ermöglicht. Eine besondere Herausforderung stellten dabei die stark eingeschränkten Platzverhältnisse und die Lage der Messobjekte dar. Der Strahlengang des Systems musste zwischen den supraleitenden Spulen, die das Magnetfeld für die Führung des Plasmas erzeugen, hindurchgeführt werden. Gleichzeitig ist die Fläche, auf der sich die Divertoren befinden, durch die in sich verdrehte Torusform sehr langgezogen und teilweise nur unter ungünstigen Winkeln sichtbar. Trotz dieser ungünstigen Bedingungen muss das System eine für die Messaufgabe ausrei-

At its site in Greifswald, the Max Planck Institute for Plasma Physics (IPP) researches the feasibility of the stellarator type reactor for future fusion power plants. The high temperatures required for nuclear fusion within the magnetically confined plasma cause substantial thermal loads within the plasma vessel – especially on the so-called divertors. These consist of graphite tiles, over which the edge of the plasma is directed to remove impurities from the plasma. To ensure a sustained and safe operation of the reactor, the divertors must be monitored thermographically.

For this purpose, a thermography system that allows spatially resolved temperature measurements on the divertor tiles during operation of the reactor was developed at Fraunhofer IOF in co-operation with the IPP. The constrained construction space as well as the position and orientation of the measurement objects were especially challenging. The beam path had to be placed between the super-conducting coils that produce the magnetic field for plasma confinement. At the same time, the surface with the divertors is very elongated and viewing angles are unfavorable due to the twisted-torus shape of the plasma vessel. In spite of this, the system has to provide sufficient optical resolution for all locations of the measurement field.

1 **Ausschnitt aus dem inneren Bereich eines der insgesamt fünf Torussegmente mit den zwei zugehörigen Thermografiesystemen. |**

Inner structure of one of the five torus segments with two dedicated thermography systems.

2 **Blick von der Position des Thermografiesystems auf einen der Divertorbereiche des Reaktors. |**

View from the location of the thermography system towards one of the divertor areas of the reactor.

chende Auflösung an allen Punkten des Messfeldes sicherstellen. Der Systementwurf kombiniert eine Abbildung der Divertoren im mittleren Infrarotbereich (Wellenlänge 3-5 μm) mit einem Kanal für UV und sichtbares Licht. Neben der Messung der Temperatur der Divertoroberfläche sind so Messungen der Verteilung der Intensität verschiedener Spektrallinien im Plasma des Stellarators möglich.

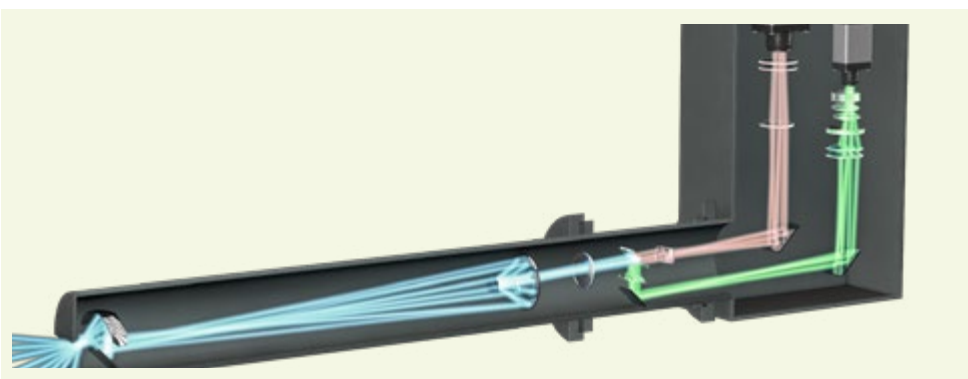
Das optische System gliedert sich in zwei Teile: Der vordere Teil befindet sich innerhalb des Vakuumgefäßes und wird von beiden optischen Kanälen gleichzeitig genutzt. Die Messobjekte werden durch eine kleine Lochblende beobachtet, um die thermische Belastung der optischen Elemente zu minimieren. Ein elliptischer Off-Axis-Spiegel direkt hinter der Lochblende reduziert die großen Feldwinkel der einfallenden Lichtbündel und erzeugt ein erstes Zwischenbild. Dieses wird von einem Teleskopsystem aus zwei Spiegeln in ein zweites Zwischenbild abgebildet, das außerhalb des Vakuumgefäßes liegt. An einem Strahlteiler werden Infrarot und UV/VIS-Kanal getrennt und anschließend durch separate Linsensystemen zu den jeweiligen Kameras geführt.

Nach der Realisierung dieses Entwurfs werden insgesamt zehn dieser Thermografiesysteme die thermische Überwachung sicherheitskritischer Elemente im Wendelstein 7-X übernehmen.

The system design combines imaging of the divertors in the mid-infrared range (3-5 μm wavelength) with a channel for UV and visible light. In addition to measuring the temperature of the divertor surface, it is possible to monitor the intensity distribution of various spectral lines in the plasma of the stellarator.

The optical system consists of two parts: The front section is placed within the vacuum vessel and is used by both optical channels simultaneously. The measurement objects are viewed through a pinhole to minimize the thermal load on the optical elements. An elliptical off-axis mirror reduces the large angles of the incoming beams and forms a first intermediate image. This is re-imaged by a two-mirror telescope into a second intermediate image outside the vacuum vessel. IR and UV/VIS channels are separated by a beam splitter and are guided to their respective cameras by dedicated lens systems.

After realization of this design, a total of ten of these thermography systems will enable the thermal monitoring of crucial elements in the Wendelstein 7-X reactor.



3 Schnittansicht des Thermografiesystems. | Cross-section of the thermography system.

AUTHORS

Uwe Lippman

Joris Fellingner¹

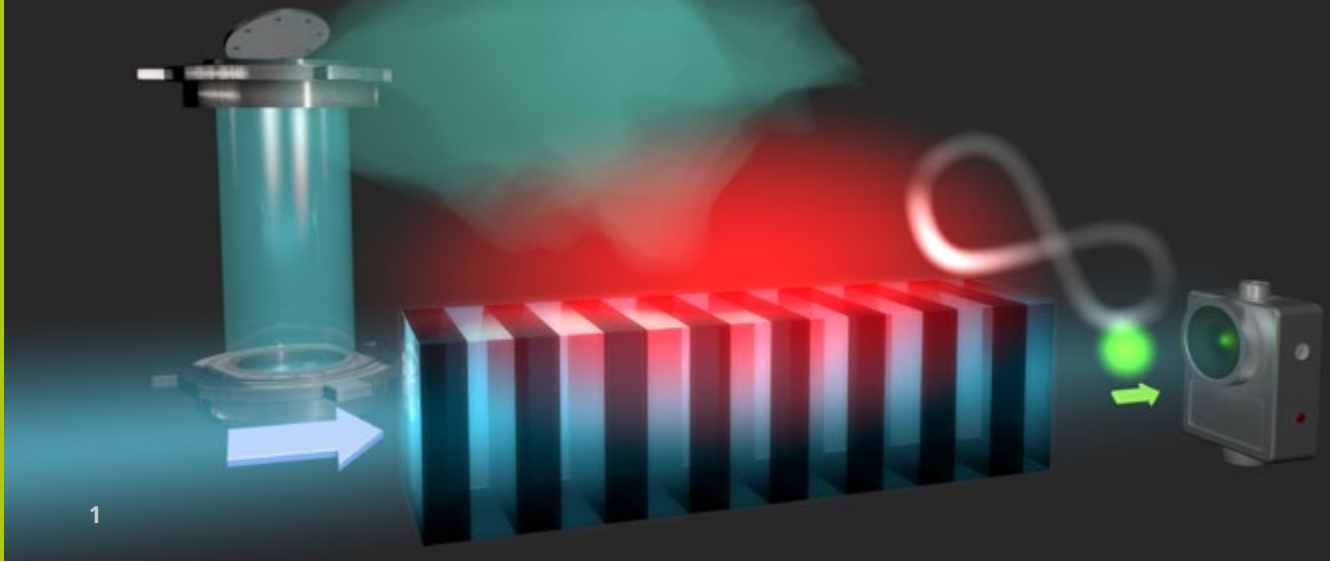
¹ Max Planck Institute
for Plasma Physics (IPP),
Greifswald

CONTACT

Uwe Lippmann

Phone +49 3641 807-249

uwe.lippmann@iof.fraunhofer.de



QUANTENSPEKTROSKOPIE UND QUANTENSENSORIK IN WELLENLEITERN

QUANTUM SPECTROSCOPY AND QUANTUM SENSING IN WAVEGUIDES

Verschränkte Photonenpaare sind eine wichtige Grundlage für die Quantentechnologien. Sie können durch spontane nichtlineare Konversion effizient in nichtlinearen Wellenleitern erzeugt werden. Dabei zerfällt ein kurzwelliges Pumpphoton in zwei Photonen mit längerer Wellenlänge: Signal und Idler. Viele Anwendungen der Quantentechnologien basieren auf der Interaktion solcher Photonenpaare mit zu untersuchender Materie, z. B. in der Quantenspektroskopie. Wellenleiter stellen auch dafür eine geeignete Plattform dar, da sie eine große Wechselwirkungslänge zwischen Licht und dem Untersuchungsobjekt erlauben.

Am Leistungszentrum Photonik werden integrierte Wellenleitersysteme untersucht, welche die Erzeugung von Photonenpaaren mit der zur Messung notwendigen Licht-Materie-Wechselwirkung in einem Bauelement kombinieren. Für die quantenoptische Spektroskopie im mittleren Infrarot (MIR) wurde ein neuartiges Konzept entwickelt, welches schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist [1]. Dabei wird ein nichtlinearer Wellenleiter zur Erzeugung von Signal- und Idlerphotonen ungleicher Wellenlänge von den zu untersuchenden Medien, z. B. Gase oder Flüssigkeiten, eingehüllt. Erzeugte Idlerphotonen im MIR können aufgrund ihrer langen Wellenlänge mit diesen Analyten interagieren. Die kürzerwelligen Signal- und Pumpphotonen dagegen sind im Wellenleiter lokalisiert und werden durch das Analyt nicht beeinflusst. Trotzdem können durch Vermessung des Spektrums der Signalphotonen

Entangled photon pairs are an integral ingredient of many quantum technologies. They can be efficiently generated through the process of spontaneous parametric down-conversion (SPDC) in waveguides with 2nd order nonlinearity, where a high-frequency pump photon can split into a pair of lower-frequency signal and idler photons. Furthermore, many applications require the interaction of these photon pairs with matter, e.g. for spectroscopy. Waveguides are also an ideal platform for enhancing such light-matter interactions, as they increase the interaction length between the light entering the waveguide and the matter surrounding it.

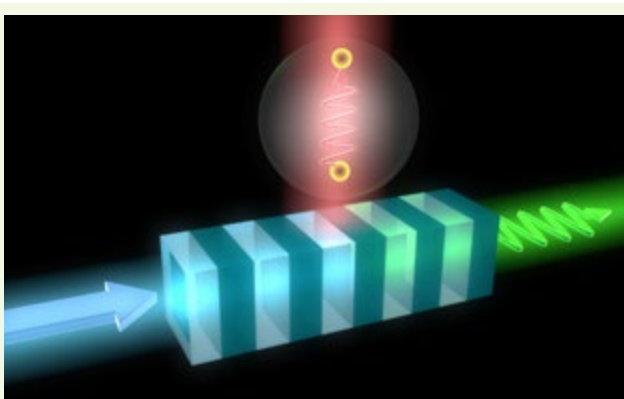
Integrated systems, where the generation and the interaction stages are combined in nonlinear waveguides, are investigated at the Center of Excellence in Photonics. It was developed a novel concept for the use of such a system in quantum spectroscopy in the mid-infrared, as schematically shown in Figure 1 [1]. Here, a waveguide generating photon pairs by SPDC is surrounded by an analyte, e.g. a gas. The generated idler at infrared wavelengths can sense the optical properties of the surrounding medium due to its large spatial extent. The short-wavelength pump and signal modes, on the other hand, are strongly confined and have negligible interaction with the analyte. Just by detecting the spectrum of the signal photons in the visible, the properties of the surrounding medium at the infrared idler wavelength can be deduced.

1 *Schematische Darstellung des Konzepts der integrierten Quantenspektroskopie mit nichtlinearen Wellenleitern.* |

Schematic visualization of integrated quantum spectroscopy using a single nonlinear waveguide.

die spektralen Eigenschaften des Umgebungsmediums im MIR Spektralbereich der Idlerphotonen deduziert werden.

Dieser Messansatz kann durch Verwendung periodisch strukturierter Wellenleiter noch wesentlich sensitiver gemacht werden. Dabei wird die optische Bandlücke der periodischen Struktur genutzt. Für Wellenlängen von Signal oder Idler innerhalb dieser Bandlücke ist die Photonenpaarerzeugung für gewöhnlich vollkommen unterdrückt. Allerdings kann schon die Anwesenheit eines einzelnen Atoms mit Übergängen im entsprechenden Spektralbereich die Erzeugung eines Photonenpaares ermöglichen. Dabei wird eines der Photonen von dem Atom absorbiert, das zweite wird vom Wellenleiter emittiert und zeigt die Präsenz des Atoms an. Diese durch Einzelatome vermittelte Photonenpaarerzeugung kann für ultrasensitive Spektroskopie, aber auch für die Kopplung von Photonen an Quantenspeicher für Quantenkommunikationssysteme genutzt werden.



2 Schematische Darstellung von durch einzelne Atome vermittelter Photonenpaarerzeugung in Wellenleitern mit periodischer Strukturierung. |

Schematic visualization of atom-mediated photon-pair generation using a nonlinear periodic.

This approach can be made extremely sensitive by using a periodically nanostructured nonlinear waveguide. Relying on the zero density-of-states of bandgap modes in periodic waveguides, the generation of quantum light can become conditional on the interaction with external matter, such that even the presence of a single atom near the nonlinear structure can completely change the generation dynamics /2/. Usually, photon-pair generation cannot take place with a mode in the bandgap. However, a single atom in the vicinity, as shown in Figure 2, can enable the generation of a photon pair, one photon of which is directly absorbed. The second photon is exiting the waveguide and heralds the presence of the atom. This so-called atom-mediated SPDC can have applications ranging from hypersensitive quantum spectroscopy to interfacing photon-qubits with quantum memories for quantum communication systems.

References / Literatur

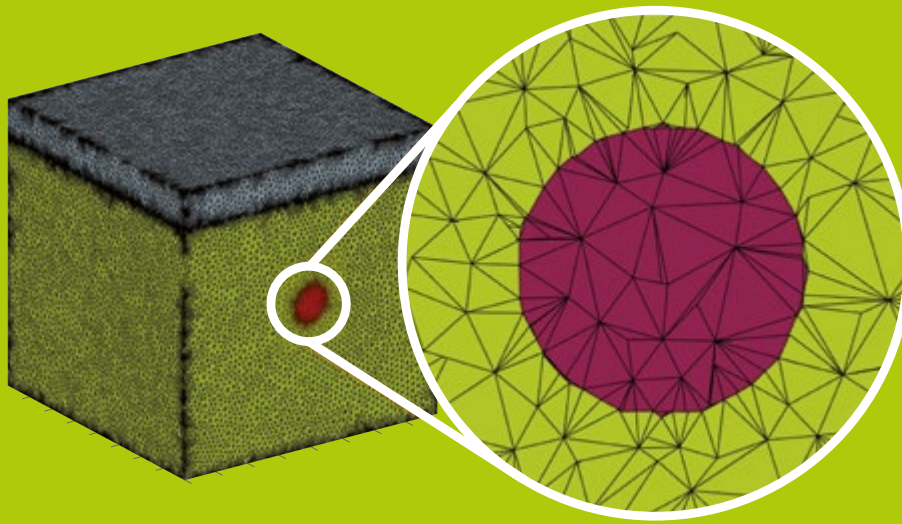
- /1/ A. S. Solntsev, P. Kumar, T. Pertsch, A. A. Sukhorukov, and F. Setzpfandt, "Towards SPDC Spectroscopy on a LiNbO₃ Chip," in Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPCom, SOF), OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), paper SeM2J.5.
- /2/ S. Saravi, A. N. Poddubny, T. Pertsch, F. Setzpfandt, and A. A. Sukhorukov, "Atom-mediated spontaneous parametric down-conversion in periodic waveguides," *Optics Letters* 42, 4724–4727 (2017).

AUTHORS

Frank Setzpfandt
Sina Saravi
Pawan Kumar
Thomas Pertsch

CONTACT

Prof. Dr. Thomas Pertsch
Phone +49 3641 947-840
thomas.pertsch@iof-web.fraunhofer.de



1

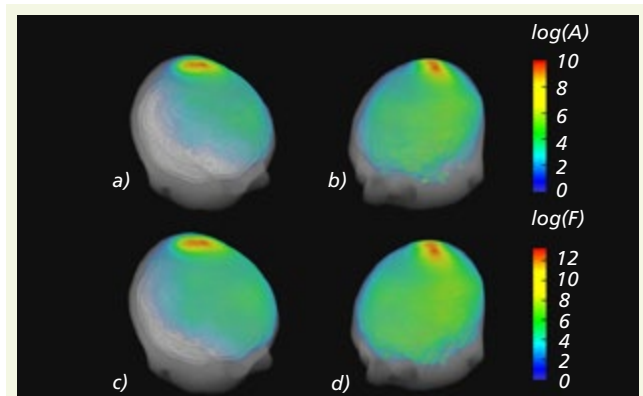
STREULICHT-SIMULATION IN BIOLOGISCHEM GEWEBE

SIMULATION OF LIGHT SCATTERING IN BIOLOGICAL TISSUE

Die Simulation der Propagation von Licht in biologischem Gewebe ist eine Schlüsselmethode für das Design und die Optimierung von lichtbasierten biomedizinischen Instrumenten wie bspw. optische kohärente Tomographie oder Mikroskopie mit tiefer Eindringtiefe. Im Vergleich zur Licht-Propagation in transparenten Medien ist die Simulation der Propagation in stark streuenden Medien erheblich komplizierter. Unter den verschiedenen Simulationsmethoden ist die Monte-Carlo-Simulation die robusteste und am einfachsten zu implementieren.

Die Effizienz und Genauigkeit der Monte-Carlo-Methode wird hauptsächlich durch die 3D-Diskretisierung des Gewebe-Volumens bestimmt. Um den Einfluss verschiedener Gewebemodelle auf die Leistungsfähigkeit der Methode zu untersuchen, wurden voxel- und tetraeder-basierte Gitterstrukturen implementiert, ausgewertet und verglichen (Abb. 1). Um reale biomedizinische Instrumente simulieren zu können, ist eine akkurate Modellierung der Lichtquelle und des Detektors notwendig. Dazu wurden Modelle für beliebige Weitfeld-Lichtquellen und Detektoren implementiert. Außerdem wurde ein Schnittstelle zwischen der gitterbasierten Methode und konventioneller Optik-Design-Software (OpticStudio Zemax) implementiert, das die Integration von optischen Systemen in der Simulation ermöglicht. Zur verbesserten Handhabung der Software wurde eine grafische Bedienoberfläche programmiert. Dies erleichtert die Modellierung der Problemstellung

The simulation of light propagation in biological tissue is a key method for the design and optimization of light-based biomedical instruments such as optical coherent tomography or microscopes with deep penetration depth. Compared to simulation of light propagation in transparent media, the high scattering property of biological tissues makes the light propagation more complex to simulate. Of all the simulation methods, the Monte Carlo simulation is the most robust and straightforward approach. The key factor that determines the efficiency and accuracy of the Monte Carlo simulation is the 3D discretization of the tissue volume. In order to evaluate the impact of different tissue models, both voxel-based and tetrahedral mesh-based tissue models (Fig. 1) have been

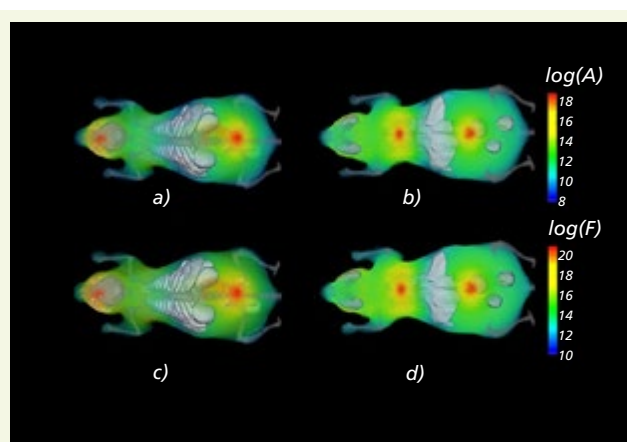


2 3D-Absorption (a, b) und Fluenz-Verteilungen (c, d) im Gehirn. | 3D absorption (a, b) and fluence (c, d) distributions inside the brain model.

1 Voxel-basiertes Gewebemodell. | Voxel based tissue model.

und hilft bei der Analyse der Simulationsergebnisse. Die konventionelle Monte-Carlo-Simulation ist nur für lineare Streuung anwendbar. Jedoch arbeiten viele moderne biomedizinische Instrumente mit nichtlinearen Prozessen, wie bspw. der 2-Photonen-Absorption. Um auch nichtlineare Prozesse simulieren zu können, wurde eine zusätzliche Toolbox entwickelt, die es erlaubt, sowohl lineare als auch nicht-lineare Streuung im Gewebe zu simulieren. Dabei können die Kopplungseffizienz und die Punktspreizfunktion des Gesamtsystems direkt berechnet werden. Dies ist besonders hilfreich im Design der Instrumente, da dadurch kritische Parameter wie die Eindringtiefe oder die Lochblendengröße in der konfokalen Detektion bestimmt werden können.

Die neue Simulationsmethode wurde mit analytischen Ergebnissen wie der Diffusionstheorie und der konventionellen Monte-Carlo Methode verglichen und als akkurat angenommen. Zur Demonstration wurden diffuse Lichtverteilungen in einem menschlichen Gehirnmodell (Abb. 2) und einer Maus (Abb. 3) mit der neuen Simulationsmethode berechnet.



3 3D-Absorption (a, b) und Fluenz-Verteilungen (c, d) in der Maus (a, c: Draufsicht; b, d: Untersicht). | 3D absorption (a, b) and fluence (c, d) distributions inside the mouse (a, c: top view; b, d: bottom view).

implemented in the simulation code and the corresponding performance of two models has been compared and evaluated. In order to simulate an actual biomedical instrument, accurate modelling of the light source and detector is necessary. Therefore, the new simulation code is able to model arbitrary wide-field light sources and detectors. Furthermore, an interface between the new simulation code and conventional optical design software (OpticStudio Zemax) is also provided, which enables the integration of the actual optical system in the Monte Carlo simulation. In order to improve the user experience, an toolbox has been developed which enables users to easily set up simulations and analyze simulation results. As the nonlinear process is widely used in modern biomedical instruments while the conventional Monte Carlo simulation is only applicable for linear scattering, an additional toolbox has been developed to simulate the two-photon fluorescence microscope. This toolbox considers the influence of both linear and nonlinear scattering in the tissue while it directly calculates the coupling efficiency and the point spread function of the complete system, which allow the designers to determine the critical parameters such as the penetration depth or the size of the pin-hole in confocal detection. In order to evaluate the new simulation code, the simulation results have been compared with analytical solutions such as the diffusion theory, conventional Monte Carlo simulation code and with experimental results. Based on the comparison, the simulation result of the new simulation code is considered to be accurate. As a test run, diffusive light intensity distributions in a human brain model and a whole mouse model have been calculated by the new tool (Fig. 2, 3).

AUTHORS

Xiang Lu

Herbert Gross

CONTACT

Xiang Lu

Phone +49 3641 947847

xiang.lu@uni-jena.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



FEINMECHANISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME / PRECISION ENGINEERING COMPONENTS AND SYSTEMS

Die Kombination von Feinmechanik und Optik stellt ein strategisches Alleinstellungsmerkmal des Fraunhofer IOF innerhalb der deutschen und europäischen Forschungslandschaft dar und setzt die Tradition Jenas als einen der führenden Optikstandorte fort. Das Geschäftsfeld Feinmechanische Komponenten und Systeme betreibt die kundenspezifische Auslegung und Fertigung von mechanischen Baugruppen und Maschinen für sehr verschiedene Anwendungen – auch für extreme Anforderungen wie Ultrahochvakuum oder kryogene Temperaturen. Ein Schwerpunkt sind Systeme unter Einsatz von Leichtgewichtsstrukturen, welche zum Teil mittels additiver Fertigung hergestellt werden. Diese Komponenten und Systeme finden vielfach Verwendung in der Raumfahrt. Weiterhin werden neue Verfahren zur Aufbau- und Verbindungstechnik von optischen Systemen und darauf basierenden Vorrichtungen und Sondermaschinen entwickelt.

Die Bandbreite der in diesem Geschäftsfeld in 2018 abgeschlossenen Projekte zeigen die nachfolgenden Beiträge. Die ausgewählten Themen umfassen die additive Fertigung von Ultraleichtgewichtspiegeln für Weltraumanwendungen und die Montierungen von Optikkomponenten mit speziellen Halterungen für den Einsatz in Satelliten.

The combination of precision mechanics and optics represents a strategic unique feature of Fraunhofer IOF within the German and European research landscape and continues Jena's tradition as one of the leading centers for optics. The business field Precision Engineering Components and Systems is responsible for customer-specific design and the manufacturing of mechanical assemblies and machines for various applications – even for extreme requirements such as ultra-high vacuum or cryogenic temperatures. There is a focus on systems with lightweight structures, which are partly manufactured by means of additive manufacturing. These components and systems are widely used in space. Furthermore, new methods for the assembly and integration of optical systems and devices, as well as resultant special machines are being developed.

The range of projects completed in this business field in 2018 are presented in the following articles. The selected topics include the additive manufacturing of ultra-light mirrors for space applications and mounts of optical components for use in satellites.

LEFT *Mehr Freiheit im Design – additiv gefertigte Metallspiegel. |
More freedom in design – additively made metal mirrors.*



ADDITIVE FERTIGUNG VON METALLOPTIKEN ADDITIVE MANUFACTURING OF METAL OPTICS

Metalloptiken finden ihre Anwendung unter anderem in wissenschaftlichen Instrumentierungen für die Erdbeobachtung, bei Scanspiegeln für die Lasermaterialbearbeitung oder für Hochleistungsanwendungen z. B. in der EUV-Lithographie. Klassische Fertigungsverfahren durch subtraktive Bearbeitung unterliegen starken Einschränkungen im Design solcher Optiken. Die Additive Fertigung (AM) mittels selektiven Laserschmelzens ermöglicht die Herstellung optimierter Spiegelkörper. Der schichtweise Aufbau des AM-Prozesses führt zu einer stark erhöhten Designfreiheit.

Anhand von umfangreichen Prozessstudien konnten optimierte Parameter zur Verarbeitung des pulverförmigen Ausgangswerkstoffes evaluiert werden. Die Verarbeitung eines Aluminium-Silizium-Werkstoffes mit einem hohen Silizium-Anteil von 40 % (AlSi40) ist mit sehr geringer Porosität ($< 0,05\%$) möglich. Untersuchungen von Materialproben zeigen, dass die mechanischen Kennwerte besser als konventionell gefertigte Halbzeugen sind. Es wird ein E-Modul von 100 GPa und eine Zugfestigkeit R_m von 260 MPa erreicht. Computertomographische (CT) Messungen ermöglichen die Kontrolle der Geometrie von internen oder komplexen Strukturen der gefertigten Bauteile. Der Ausdehnungskoeffizient des Materials ist an die nachträglich aufgebrachte Polierschicht angepasst, wodurch thermisch induzierte Deformationen minimiert werden.

Applications for metal optics include scientific instrumentations for earth observation, scan mirrors for laser material processing, or high power tools e.g. for EUV-lithography. The commonly used subtractive approaches are subject to severe limitations regarding the design of those mirrors. Additive Manufacturing (AM) of metal optics using selective laser melting is used to realize optimized mirror bodies. The layer wise built up of parts by AM is able to avoid these limitations.

After extensive process studies, optimized parameters for the processing of the powder based raw material have been evaluated. The processing of aluminium-silicon material with a high silicon content of up to 40 % (AlSi40) is possible, realizing a very low porosity of 0.05 %. Studies of material samples show a Young's modulus of 100 GPa and a tensile strength R_m of 260 MPa. The mechanical values are better than the conventionally manufactured semi-finished products. The coefficient of thermal expansion of AlSi40 is matched to the successively applied polishing layer, minimizing thermal induced bending effects. Computer tomographic measurements (CT) enable the geometric testing of internal volumes and complex structures of the manufactured parts.

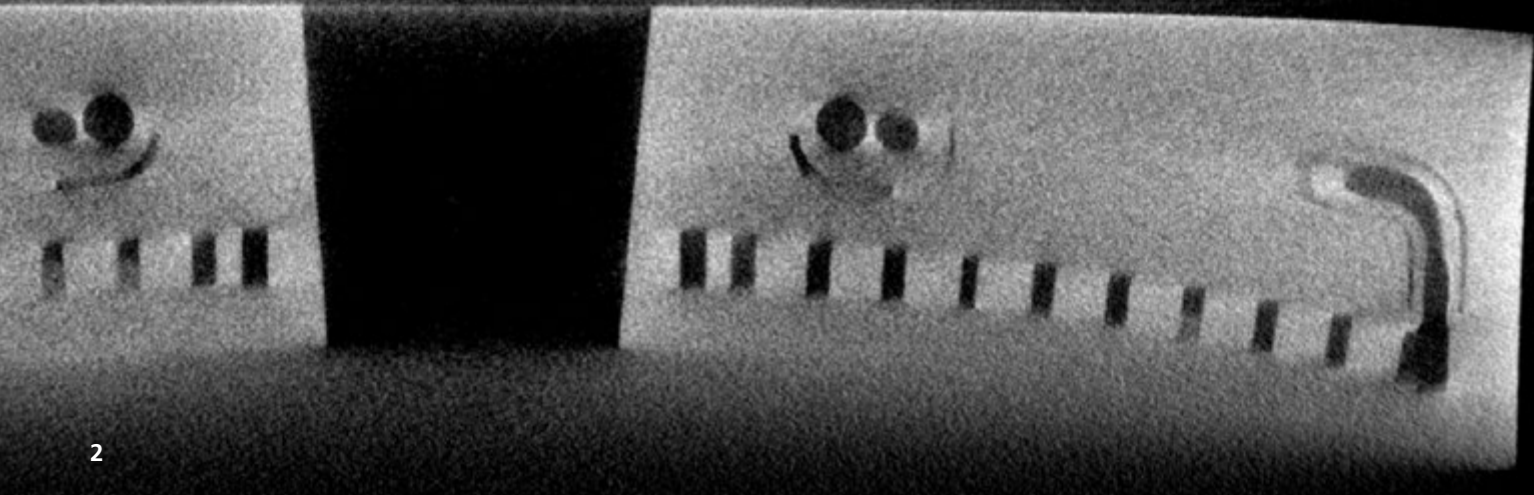
The direct integration of cooling channels into high power optics enables a uniform temperature distribution even

1 **Additiv gefertigte Scanspiegel eines topologieoptimierten Designs für die Arges GmbH.** |

Additively made scanning mirror using topology optimized design for Arges GmbH.

2 **CT-Aufnahme eines additiv gefertigten Hochleistungsspiegels mit interner Kühlstruktur für optiX fab GmbH.** |

Computer tomographic measurement of AM high power mirror with internal cooling channels for optiX fab GmbH.



Eine direkte Integration von Kühlkanälen in Hochleistungs-optiken ermöglicht eine gleichmäßige Temperaturverteilung auch bei hohen thermischen Lasten. Nachteile klassischer Designs wie die Verwendung von zusätzlichen Fügeverbindungen oder ungleichmäßige Abstände der Kanäle zur optischen Oberfläche können somit aufgehoben werden.

Durch topologieoptimierte Designs erreichen Scanspiegel verbesserte Torsionseigenfrequenzen (12 kHz), wodurch höhere Scangeschwindigkeiten und somit eine effizientere Lasermaterialbearbeitung ermöglicht wird.

Die Reduzierung der Masse unter Beibehaltung der mechanischen Steifigkeit ist für Anwendungen in Raumfahrtmissionen besonders vorteilhaft. Hier können Gewichtseinsparungen von bis zu 70 % realisiert werden.

Die additiv gefertigten Grundkörper können mit der etablierten Prozesskette der Optikfertigung bearbeitet werden. Nach der finalen Bearbeitung unter Nutzung der etablierten Technologiekette (Diamantbearbeitung – magnetorheologisches Polieren – chemisch-mechanisches Polieren) wurden Formabweichungen kleiner 150 nm PV und Rauheiten von < 1 nm RMS erreicht.

Danksagung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt »AM-OPTICS« wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm »Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen« (02P15B204) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

for high thermal loads. The disadvantages of conventional methods such as additional bonds or uneven distances to the optical surface can be eliminated by AM.

Topologically optimized designs allow scan mirrors to achieve improved torsional frequencies (12 kHz), enabling higher scan speeds and thus more efficient laser material processing.

The reduction of mass while retaining the mechanical stiffness of mirrors is a major advantage for space applications. Mass savings of up to 70 % can be achieved.

The additively made mirror bodies are processed using the established production chain for optical components including diamond turning, coating, and polishing. After the final processing using the established technology chain (diamond processing – magnetorheological polishing – chemical-mechanical polishing), shape deviations of less than 150 nm peak-to-valley and surface roughnesses of < 1 nm RMS have been achieved.

Acknowledgement

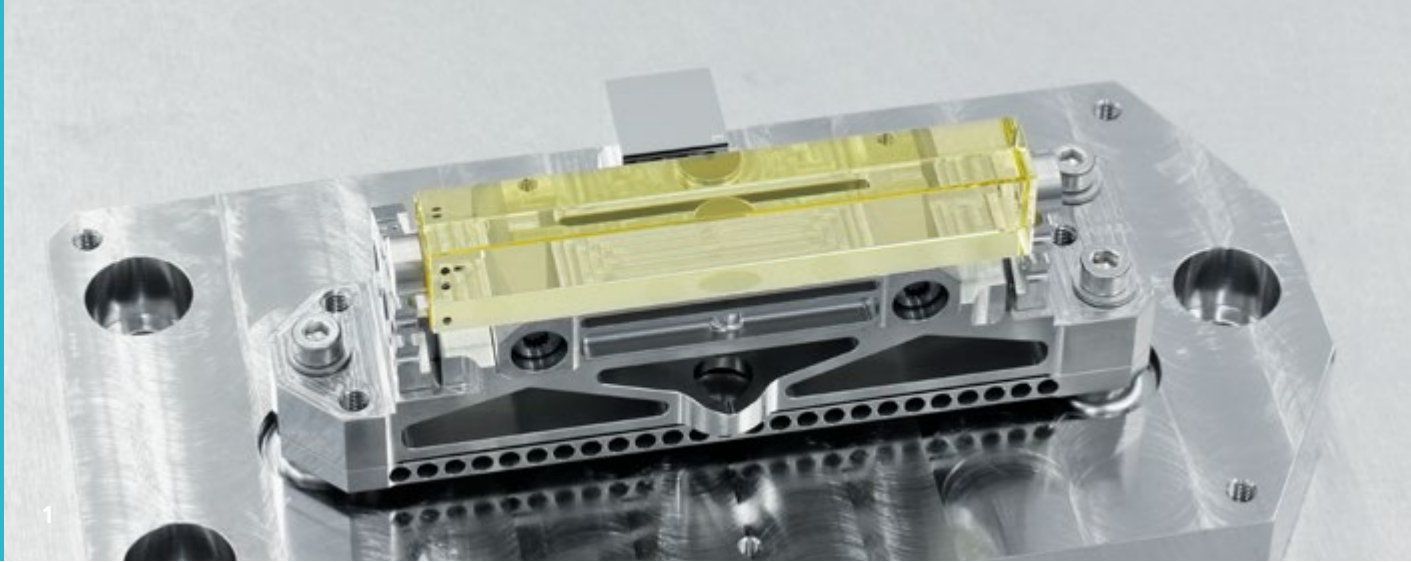
The research project "AM-OPTICS" is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the Program "Innovations for Tomorrow's Production, Services, and Work" (02P15B204) and managed by the Project Management Agency Karlsruhe (PTKA).

AUTHORS

Nils Heidler
Enrico Hilpert
Stefan Risse

CONTACT

Dr. Nils Heidler
Phone +49 3641 807-379
nils.heidler@iof.fraunhofer.de



FASSUNG UND MONTIERUNG PRISMATISCHER OPTIKEN FÜR DIE SENTINEL-5 MISSION MOUNT AND ASSEMBLY OF PRISMATIC OPTICS FOR THE SENTINEL-5 MISSION

Das Sentinel-5/UVNS (Ultraviolet Visible Near-Infrared Sounder) Instrument ist ein hochauflösendes Spektrometersystem, welches in sieben unterschiedlichen Spektralbändern die Erdatmosphäre auf Treibhausgase und Feinstaub hin untersucht.

Im Nah-Infrarot-Spektrometer des Instruments müssen drei rechteckig zugeschnittene Optikkomponenten aufgenommen werden. Um solche prismatischen Bauteile sicher zu halten, hat das Fraunhofer IOF eine kinematische Halterung inklusive Montagetechnologie entwickelt.

Die ROM (Rectangular Optics Mount) Breadboards umfassen drei unterschiedliche Baugruppen: eine rechteckig zugeschnittene Kollimationslinse (COL1) aus dem optischen Glas CTK112 (Abb. 1) und zwei Umlenkspiegel (FOLD1 und FOLD2) auf je einem Glassubstrat aus NG5 (Abb. 2, 3), welche jeweils in eine spezielle Haltestruktur aus Titan eingeklebt sind. Die gesamte Montierung enthält eine zweistufige mechanische Entkopplung, welche mittels verschieden ausgeführter Festkörpergelenke gewährleistet, dass die zulässige Belastung und Deformation der Optikkomponenten nicht überschritten wird.

The Sentinel-5/UVNS (Ultraviolet Visible Near-Infrared Sounder) instrument is a high resolution spectrometer system operating in the ultraviolet to shortwave infrared range with seven different spectral bands to observe trace gas concentrations and aerosols in the Earth's atmosphere.

The instrument's near-infrared spectrometer requires the inclusion of three rectangular-cut optical components. For the purpose of securely holding such prismatic components, Fraunhofer IOF has developed a kinematic mount including assembly technology.

The ROM (Rectangular Optics Mount) breadboards contain three different components: a rectangular collimating lens (COL1) made of optical glass CTK112 (Fig. 1) and two deflecting mirrors (FOLD1 and FOLD2), each on a glass substrate made of NG5 (Fig. 2, 3) that are glued in a special titanium support structure. The entire mounting includes a two-stage mechanical decoupling. By means of differently designed solid state joints, such a mounting ensures non-exceedance of the allowable load and deformation of the optical components.

1 Breadboard der Kollimationslinsen Baugruppe COL1, aufgeschraubt auf Testadapter mit Referenzwürfel. |

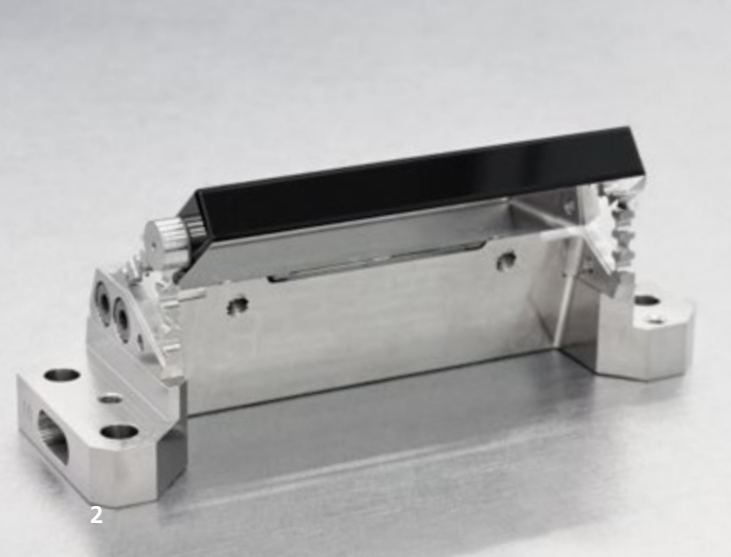
Breadboard of collimating lens assembly COL1, screwed onto test adapter with reference dice.

2 Breadboard der Umlenkspiegel Baugruppe FOLD1. |

Breadboard of the deflection mirror assembly FOLD1.

3 Breadboard der Umlenkspiegel Baugruppe FOLD2, aufgeschraubt auf Testadapter. |

Breadboard of the deflecting mirror assembly FOLD2, screwed on test adapter.



Die erste Stufe ist in der Schnittstelle zum Instrument integriert und besteht aus drei Membranfedern. Ebenfalls zugehörig zu dieser Schnittstelle ist ein präzise gefertigtes Abstimmelement (Shim), welches zur Anpassung von Höhe und Winkellage der Optiken im Hinblick auf die letztlich im Instrument benötigte Justierung dient. Die zweite Stufe der Entkopplung ist direkt durch eine kinematische Aufnahme der Optikkomponenten in der Haltestruktur realisiert.

Zu Beginn des Montageprozesses werden die Optikkomponenten und die Haltestruktur mittels 3-Achs-Koordinatenmesstechnik präzise vermessen und Einzelteile der Haltestruktur nachbearbeitet, so dass die Optiken an ihrem nominell richtigen Platz stehen, während sich definierte, gleichmäßig dünne Klebespalte ergeben.

Die Festkörpergelenke der Haltestrukturen sind bereits fertig montiert, wenn die Optikkomponenten eingeklebt werden. Es entstehen keine zusätzlichen Kräfte und Momente durch eine nachträgliche Justierung und Fixierung der Gelenke an der Haltestruktur.

Die aufgebauten Breadboards zeigen eine sehr gute Positionsstabilität und eine sehr geringe Deformation der Optikflächen bei Klimatests, Temperaturzyklen und Vibrationstests.

The first stage is integrated in the interface of the instrument and consists of three membrane suspensions. A further part of this interface is a precisely manufactured tuning element (Shim), which allows the adjustment of the required height and angular position of the optics in the instrument. The second stage of the decoupling is realized directly by a kinematic recording of the optical components in the support structure.

At the beginning of the assembly process, the optical components and the support structure are precisely measured by 3-axis coordinate metrology. Furthermore, individual parts of the support structure are reworked in such a way that the optics are in their nominally correct position, resulting in defined, uniformly thin adhesive gaps.

The solid-state joints of the support structures are fully assembled before the optical components are glued into the instrument. Thus, there are no additional forces and moments due to a subsequent adjustment and fixation of the joints on the support structure.

In climate tests, temperature cycles, and vibration tests, the built-up breadboards show both a very good position stability and a very small deformation of the optical surfaces.

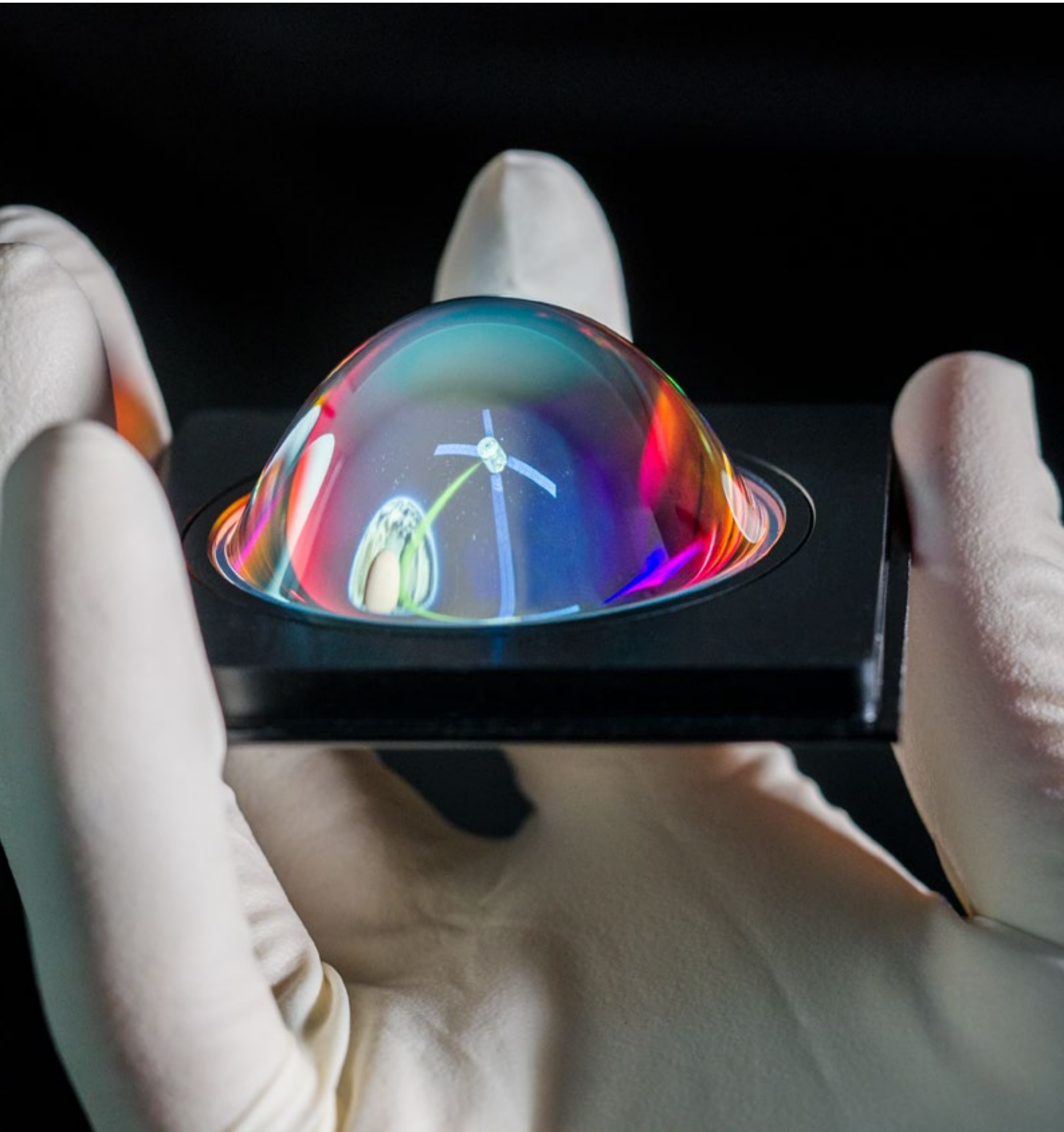
AUTHORS

Andreas Kamm
Thomas Peschel

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

Das Fraunhofer IOF ist weltweit führend in der Entwicklung innovativer Entspiegelungen sowie reflektiver Hochleistungsschichten. Zudem bietet das Fraunhofer IOF Lösungen für hochwertige Antireflexsysteme auf ebenen oder gekrümmten Glas- und Kunststoffoberflächen bis hin zur Entspiegelung von Saphir oder Diamant. Atomlagenabscheidung (ALD) als leistungsstarke Beschichtungstechnologie ermöglicht konformes Dünnschichtwachstum organischer oder auch hybrid organisch-anorganischer Beschichtungen auf nano-/mikrostrukturierten Substraten wie auch auf Freiformen und stark gekrümmten Flächen.

Das Fraunhofer IOF ist dank seiner einzigartigen Ausstattung in der Lage, extreme Anforderungen in Bezug auf Substrate, Gradienten, spektrale Eigenschaften und Umweltbedingungen zu erfüllen.

Die in 2018 in diesem Geschäftsfeld abgeschlossenen Projekte zeigen in den nachfolgenden Beiträgen eine große Bandbreite: Schichtdesign, stochastische Nanostrukturen, biofunktionale Oberflächen, hochbeständige Reflektorschichten sowie plasmaunterstützte ALD.

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

Fraunhofer IOF is a world leader in the development of innovative antireflective coatings and reflective high-performance coatings. In addition, Fraunhofer IOF offers solutions for high-quality antireflex systems on flat or curved glass and plastic surfaces, as well as antireflective coatings on sapphire or diamond. Atomic layer deposition (ALD) as a high-performance coating technology enables conformal thin-film growth of organic or hybrid organic-inorganic coatings on nano-/microstructured substrates as well as on freeforms and strongly curved surfaces.

Thanks to its unique equipment, Fraunhofer IOF is able to fulfill extreme requirements in terms of substrates, gradients, spectral properties, and environmental conditions.

In the following articles, the projects completed in 2018 in this business field represent a wide spectrum: layer design, stochastic nanostructures, biofunctional surfaces, highly stable reflector layers, and plasma enhanced ALD.

LEFT *Entspiegelung komplexer Substrate mittels Atomlagenabscheidung. | Antireflection coatings on complex substrates by atomic layer deposition.*



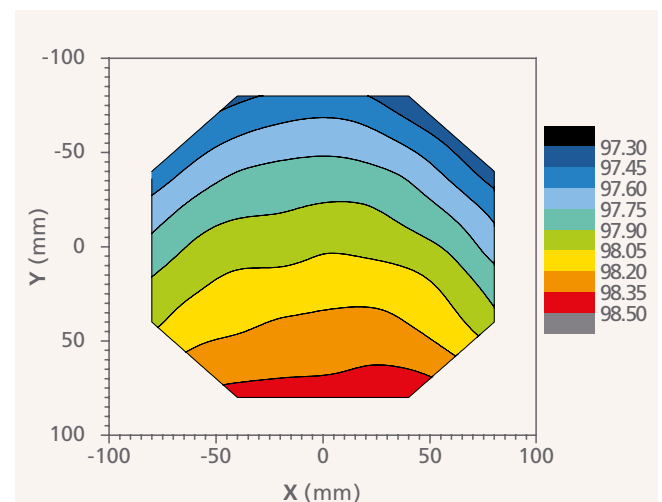
EIGENSCHAFTEN VON OXIDEN HERGESTELLT MITTELS NEUEM PEALD-SYSTEM

PROPERTIES OF OXIDES ON A NEW PEALD COATING SYSTEM

Die gleichmäßige und topographietreue Abscheidung dünner Schichten mit präziser Schichtdickenkontrolle ist essentiell für die Entwicklung optischer Komponenten mit einer komplexen Geometrie. Atomlagenabscheidung (ALD) ist eine Schlüsseltechnologie bei der Herstellung von Halbleiter-Komponenten, um den Anforderungen der Beschichtung bei hohen Aspektverhältnissen zu genügen. Diese Technologie findet vermehrt Interesse auch für optische Anwendungen. Dünne ALD-Schichten werden u. a. in Interferenzschichtsystemen (Abb. 1) und Beugungsgittern eingesetzt.

Die am Fraunhofer IOF neu installierte plasma-unterstützte ALD (PEALD) Anlage ermöglicht die Abscheidung von Oxiden und Nitriden auf Substraten mit einem Durchmesser von 330 mm und einer Höhe von 100 mm. Die großflächige Planar Triple Spiral Antenne (PTSA) der Anlage ist eine induktiv gekoppelte Plasmaquelle mit einem Durchmesser von 400 mm, die eine sehr hohe Gleichmäßigkeit der Schichtdicke gewährleistet. Zudem kann in diesem System eine Vorspannung (engl.: bias) an das Substrat angelegt werden, wodurch zusätzlich die mechanischen und optischen Schichteigenschaften gesteuert werden /1/. Die vorhandenen Prozesse für SiO_2 , Al_2O_3 und TiO_2 wurden bei einer Substrattemperatur von 100 °C bis 250 °C

The deposition of uniform and conformal thin films with a precise thickness control is essential for the development of optical components with a complex topography. Atomic Layer Deposition (ALD) is a key technology in the semiconductor industry for coating high aspect ratio nanostructures. This technology is also attracting increasing interest for optical applications. Thin ALD coatings are applied in interference multilayer systems (Fig. 1) and gratings.



2 **Schichtdicken-Mapping einer SiO_2 -ALD-Schicht mit geringer Schichtdickenabweichung von $\pm 0,6\%$ auf einer Fläche mit 200 mm Durchmesser.** | Thickness mapping of a SiO_2 ALD thin film with excellent non-uniformity of $\pm 0.6\%$ across a 200 mm diameter area.

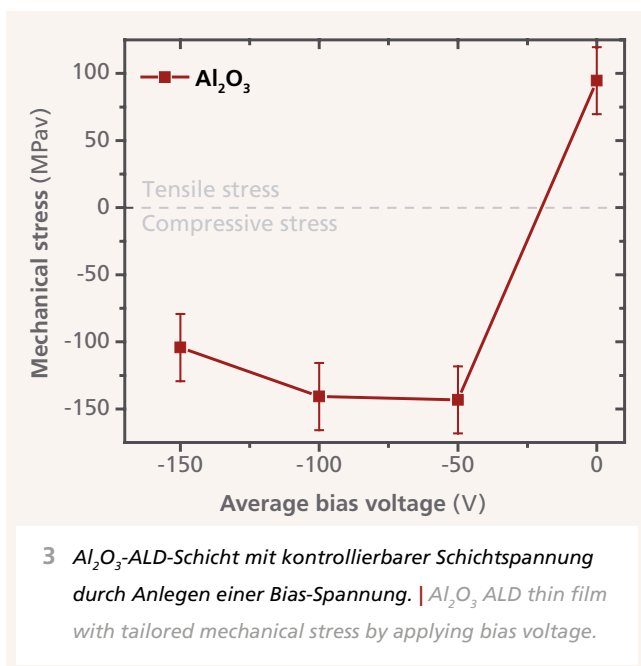
1 **ALD funktionalisierte Komponenten: Glas-Kuppel mit und ohne Entspiegelungsschichtsystem, Kugel- und Halbkugellinsen mit Schmalbandfilter.** | Various optical components functionized by ALD: glass domes with and without antireflection coatings, ball and half-ball lenses with narrow bandpass filter coating.

optimiert. Die Uniformität ($(d_{\max} - d_{\min}) / 2d_{\text{Mittelwert}}$) der Schichten erreicht sehr geringe Abweichungen von $\pm 0,3\%$ (Al_2O_3), $\pm 0,8\%$ (TiO_2) und $\pm 0,6\%$ (SiO_2) auf einer Fläche mit einem Durchmesser von 200 mm /2/, siehe Abbildung 2. Standard ALD- Al_2O_3 Schichten mit einer Schichtdicke von 200 nm zeigen Zugspannungen von etwa 97 MPa. Im Gegensatz dazu weisen Al_2O_3 Dünnschichten, bei denen während der Herstellung eine Bias-Spannung angelegt wurde, Druckspannungen zwischen 109 MPa und 144 MPa auf (Abb. 3).

Ziel ist die Entwicklung optischer Elemente, wie z. B. dichroitischer Spiegel und Schmalbandfilter, mit geringer Eigenspannung, um Rissbildungen und Schichtablösungen zu verhindern.

Literatur / References

- /1/ Faraz, T. et al.: ACS Appl. Mater. Interfaces, 10 (15) 13158-13180 (2018).
/2/ Gargouri, H. et al.: 4th International Conference on ALD Applications, 14-17 October 2018, Shenzhen, China.



The newly installed plasma enhanced ALD (PEALD) tool allows the deposition of oxides and nitrides on substrates with a diameter of up to 300 mm and a height up to 100 mm. The Planar Triple Spiral Antenna (PTSA) of the equipment is an inductively coupled plasma (ICP) source with a diameter of 400 mm. It enables high film thickness uniformity. In addition, a bias voltage can be applied to the substrate during the deposition to tailor the optical and mechanical properties of the coatings /1/.

The developed processes for SiO_2 , Al_2O_3 , and TiO_2 were optimized at a substrate temperature of 100 °C to 250 °C. The film thickness uniformity ($(d_{\max} - d_{\min}) / 2d_{\text{average}}$) achieved across a 200 mm diameter area is $\pm 0.3\%$ (Al_2O_3), $\pm 0.8\%$ (TiO_2), and $\pm 0.6\%$ (SiO_2), see Figure 2. Standard Al_2O_3 films with film thickness of 200 nm show 97 MPa tensile stress. In contrast, Al_2O_3 films show compressive film stress between 109 MPa and 144 MPa when a bias voltage was applied during deposition (Fig. 3).

The goal is the development of optical elements, such as dichroic mirrors and narrow bandpass filters, with low residual stresses to avoid crack formation and delamination.

AUTHORS

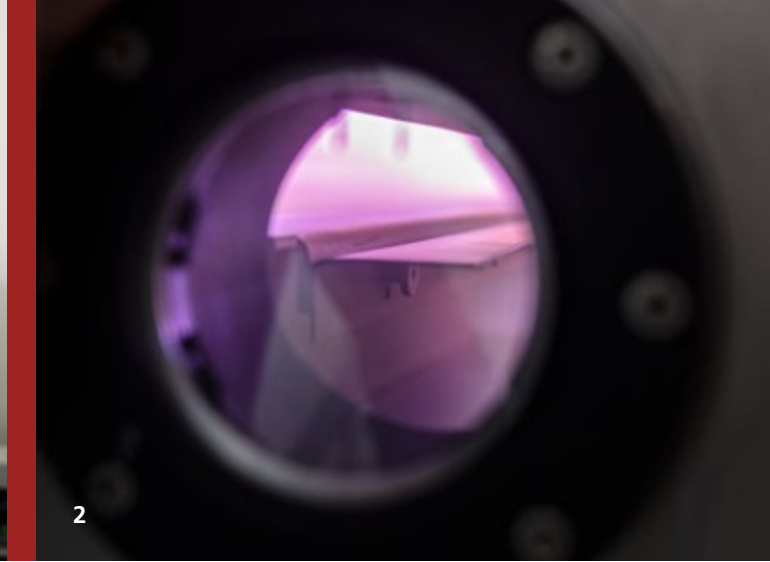
Kristin Pfeiffer
David Kästner
Vivek Beladiya
Adriana Szeghalmi

CONTACT

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



1



2

HOCHBESTÄNDIGE BESCHICHTUNGEN FÜR EINEN IR-SPEKTROGRAPH HIGHLY DURABLE COATINGS FOR AN IR-SPECTROGRAPH

An dem Very Large Telescope (VLT) wird mit dem Instrument CRIRES+ (CRYogenic InfraRed Echelle Spectrograph upgrade) ein IR-Spektrograph für die Erforschung von Exoplaneten in Betrieb genommen ^{1/}. Für dieses Instrument wurden am Fraunhofer IOF drei optische Filter hergestellt, die einen Wellenlängenbereich von 960 nm bis 5.300 nm abdecken. Des Weiteren wurden Spiegel durch Diamantdrehen, mehrere Polierschritte ^{1/} und eine Beschichtung hergestellt. Alle Beschichtungen (Filter- und Spiegelbeschichtungen) wurden mit einer Inline-Sputteranlage durchgeführt (Abb. 1).

Sowohl bei erdgebundenen Anwendungen als auch bei Welt- raumanwendungen kommt es vor der eigentlichen Anwendung zu einem längeren Zeitraum, in dem die beschichteten Spiegel transportiert, montiert und gelagert werden müssen. Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftreinheit können in diesen Zeitraum nur bedingt geregelt werden. Daher kann Wasserkondensation auf der Spiegeloberfläche auftreten, weshalb die abschließende Schicht der Spiegelbeschichtung eine hohe Beständigkeit gegenüber wässrigen Lösungen aufweisen muss. Zudem sollte die reflektierende Beschichtung eine geringe Druckspannung haben, um Delamination zu vermeiden.

Im Hinblick auf diese beiden Kriterien wurden Al_2O_3 -, SiO_2 - und Si_3N_4 -Schichten untersucht. In einer wässrigen (basischen)

At the Very Large Telescope (VLT), an IR-Spectrograph named CRIRES+ (CRYogenic InfraRed Echelle Spectrograph upgrade) will be commissioned for the investigation of exoplanets ^{1/}. For this instrument, three optical filters, covering a wavelength range from 960 nm to 5,300 nm, were produced at Fraunhofer IOF. Furthermore, mirrors were manufactured by diamond turning, several polishing steps ^{1/}, and the deposition of a reflective coating. These coatings (for filters and mirrors) have been manufactured by an inline sputtering system (Fig. 1).

In the case of ground- and space based applications, transport, assembly, and storage before applying the coated mirrors takes place over a long period. During this period, conditions such as temperature, humidity, and air pollution can only be controlled to a limited extent. Thus, condensation on the mirror's surfaces should be considered, whereby a high resistance to aqueous solutions is a requirement for the final layer of the mirror coating. In addition, the reflective coating should have a low compressive stress to avoid delamination.

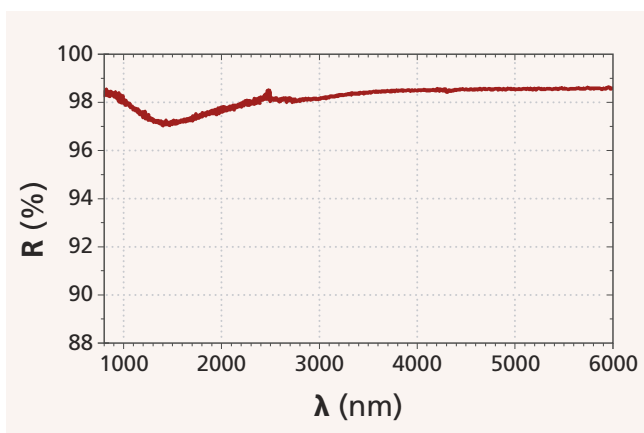
With regard to these two criteria, sputtered Al_2O_3 , SiO_2 , and Si_3N_4 layers were investigated. In an aqueous (basic) solution, all tested Si_3N_4 -layers were more durable than the SiO_2 -layers, and all tested SiO_2 -layers are more durable than the Al_2O_3 -layers. This finding shows the influence of the

1 *Inline Beschichtungsanlage für Magnetronspütern.* | *In-line coating system for magnetron sputtering.*

2 *Beschichtungsprozess.* | *Coating process.*

Lösung waren alle getesteten Si_3N_4 -Schichten beständiger als die SiO_2 -Schichten und alle getesteten SiO_2 -Schichten waren beständiger als die Al_2O_3 -Schichten. Dieser Befund zeigt den Einfluss der intrinsischen Materialeigenschaften. Die Druckspannung der gesputterten Schichten hängt stark von den Abscheidungsbedingungen ab. Eine der hochbeständigen Si_3N_4 -Schichten besitzt eine geringe Druckspannung /2/.

Über einen breiten Spektralbereich (VIS und SWIR) ist Ag das Metall mit dem höchsten Reflexionsvermögen. Um eine Abnahme dieses Reflexionsvermögens an Atmosphäre zu vermeiden, ist mindestens eine transparente Schutzschicht erforderlich. Als abschließende Schicht des geschützten Silbers wurde die Si_3N_4 -Schicht verwendet, die eine hohe Beständigkeit gegen wässrige Lösungen und eine geringe Druckspannung vereint. Somit konnte eine hochbeständige Spiegelbeschichtung für das CRIRES⁺-Instrument hergestellt werden /2/. Abbildung 3 zeigt das Reflexionsvermögen dieser Beschichtung.



3 Reflexionsvermögen des geschützten Silbers für den IR-Spektrograph (AOI: 6°). | Reflectivity of the protected silver for the IR spectrograph (AOI: 6°).

intrinsic properties of the materials. The compressive stress of the sputtered layers depends heavily on the deposition conditions. One of the highly durable Si_3N_4 layers offers a low compressive stress /2/.

In a broad spectral range (VIS and SWIR), Ag is the metal with the highest reflectivity. At ambient conditions, a transparent protective coating is required to avoid a decrease of the reflectivity. The type of Si_3N_4 -layer that offers a high resistance to aqueous solutions and a low compressive stress has been applied as a final layer of the silver coating. Thus, a highly durable mirror coating could be delivered for the CRIRES⁺-instrument /2/. Figure 3 shows the reflectivity of this coating.

References / Literatur

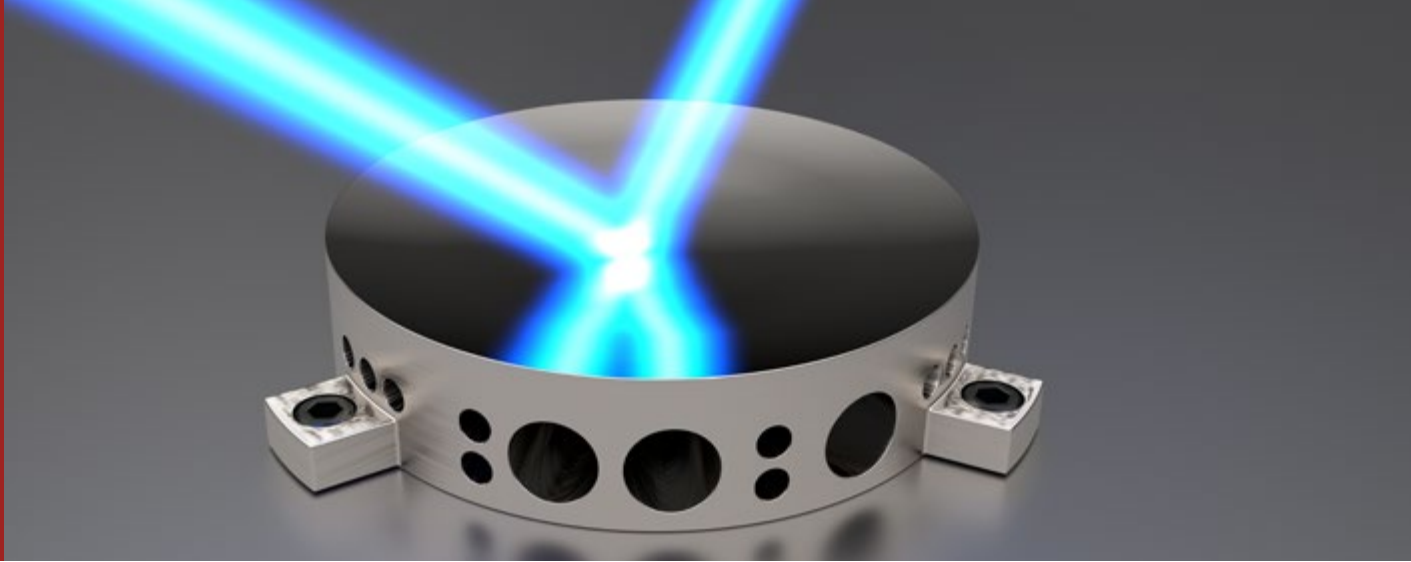
- /1/ J. Kinast, R. Schlegel, J. L. Lizon, R. Follert: Spiegel und Filter für die Suche nach neuen Planeten, Fraunhofer Jahresbericht 2017, S.: 26-27.
- /2/ S. Schwinde: Protected silver coatings for reflectors, conference presentation at the International Conference on Space Optics (ICSO) 2018 in Chania, Greece.

AUTHORS

Stefan Schwinde
Ralph Schlegel
Dieter Gäbler

CONTACT

Dr. Stefan Schwinde
Phone +49 3641 807-297
stefan.schwinde@iof.fraunhofer.de



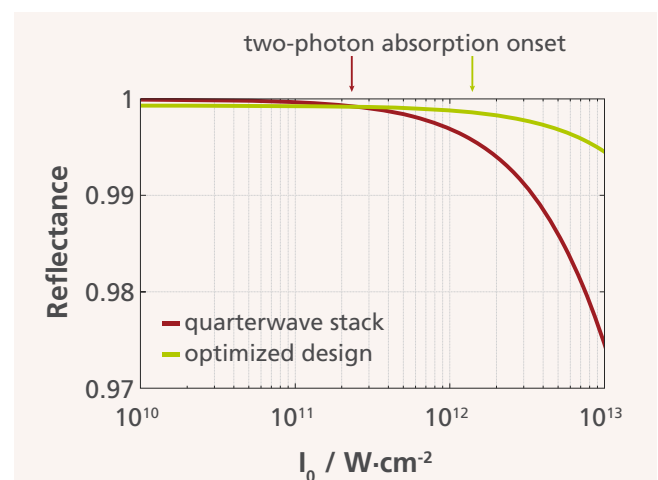
SCHICHTDESIGN MIT BERÜCKSICHTIGUNG VON $\chi^{(3)}$ - EFFEKTEN

COATING DESIGN INCLUDING $\chi^{(3)}$ EFFECTS

Das Design von dielektrischen Multilayerspiegeln für Anwendungen im Femtosekundenbereich (Pulslänge < 30 fs) ist nach wie vor eine Herausforderung, die mit kommerzieller Dünnschicht-Designsoftware nicht automatisiert vorgenommen werden kann. Zwar können Reflexionsvermögen und Dispersionsverhalten der Spiegel als Zielfunktion einer automatischen Designoptimierung vorgegeben werden. Die herkömmliche Optimierung erfolgt aber lediglich unter Berücksichtigung optisch linearer Effekte, d. h. durch Zweiphotonenabsorption hervorgerufene Verluste, wie sie bei hohen Lichtintensitäten typisch sind, werden bei der Designrechnung nicht berücksichtigt. Das führt zu unrealistischen Prognosen des zu erwartenden Reflexionsvermögens von Beschichtungen bei hohen Laserlichtintensitäten.

Im Rahmen des Projektes LaserFest /1/ strebt das Fraunhofer IOF die Überwindung dieser Restriktionen an. Durch Messungen der nichtlinearen Absorption sollen die nichtlinearen Absorptionskoeffizienten (bzw. allgemein die Suszeptibilitäten) quantifiziert und in die Designrechnung eingebracht werden. Dadurch wird eine realistische Schichtdesignoptimierung unter Berücksichtigung von Zweiphotonenprozessen prinzipiell möglich. Erste Projektergebnisse betreffen die Entwicklung eines Algorithmus für das Schichtdesign, der unter Annahme bekannter linearer und nichtlinearer Suszeptibilitäten dritter Ordnung (sog. $\chi^{(3)}$) eine realistische Voraussage über das von der eingehenden Lichtintensität abhängige Reflexionsvermögen sowie dessen Optimierung ermöglicht. Der Algorithmus ist zunächst für senkrechten Lichteinfall und monochromatische

The design of dielectric multilayer mirrors for femtosecond applications with pulse durations smaller than 30 fs is still a challenge that cannot be met by commercial coating design software in a straightforward manner. Although reflectance and dispersion of the mirrors can be defined as optimization targets, commercially available programs are restricted to calculations in the frames of linear optics. Hence, any losses caused by two-photon absorption, as typically observed at high light intensities, cannot be taken into account. This results in unrealistic predictions of the coating

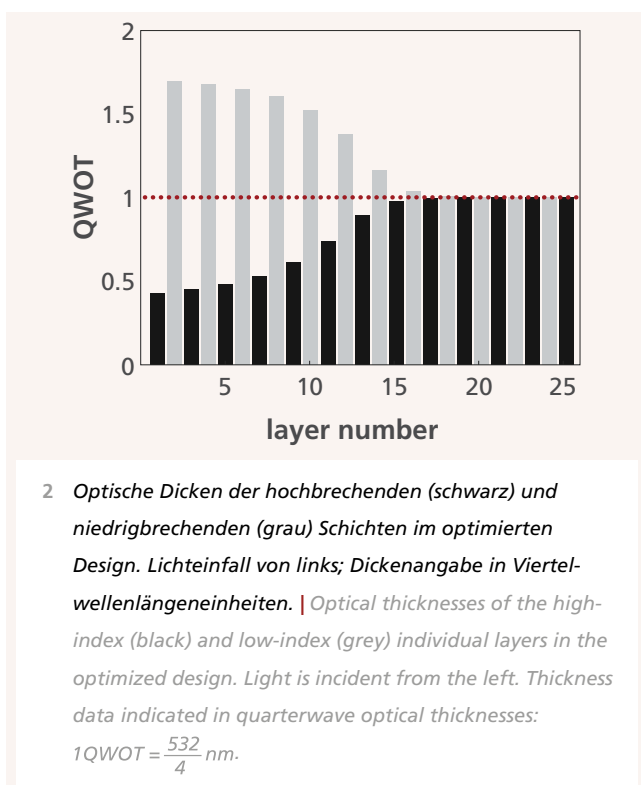


1 Berechnetes Reflexionsvermögen dielektrischer Spiegel in Abhängigkeit von der Einfallintensität I_0 . |
 Calculated reflectance of dielectric mirrors in dependence of the incident light intensity I_0 .

Laserstrahlung formuliert. Abbildung 1 zeigt die Intensitätsabhängigkeiten des berechneten Reflexionsvermögens eines Viertelwellenlängenstacks und eines für die Einfallintensität von 10^{13} W/cm^2 optimierten Designs für die Wellenlänge von 532 nm unter Annahme typischer optischer Konstanten. Beide Designs zeigen die charakteristische Abnahme des Reflexionsvermögens bei hohen Lichtintensitäten. Das optimierte Design ist dem traditionellen Viertelwellenlängenstack bei hohen Intensitäten, wie sie für Femtosekundenpulse typisch sind, aber klar überlegen. Die optischen Schichtdicken des optimierten Designs gehen aus Abbildung 2 hervor und unterscheiden sich deutlich von denen eines üblichen Viertelwellenlängenstacks /2/.

Literatur / References

- /1/ European Regional Development Fund (2016 FE 9045).
/2/ O. Stenzel, S. Wilbrandt, Appl. Opt. 57 (2018) 8640.



reflectance at high light intensities. The aim of Fraunhofer IOF's involvement in the LaserFest /1/ project is to improve this situation. Nonlinear absorption coefficients (or generally the susceptibilities) of selected coating materials shall be measured and included in the design calculations. That should result in an algorithm for realistic coating design including two-photon absorption processes.

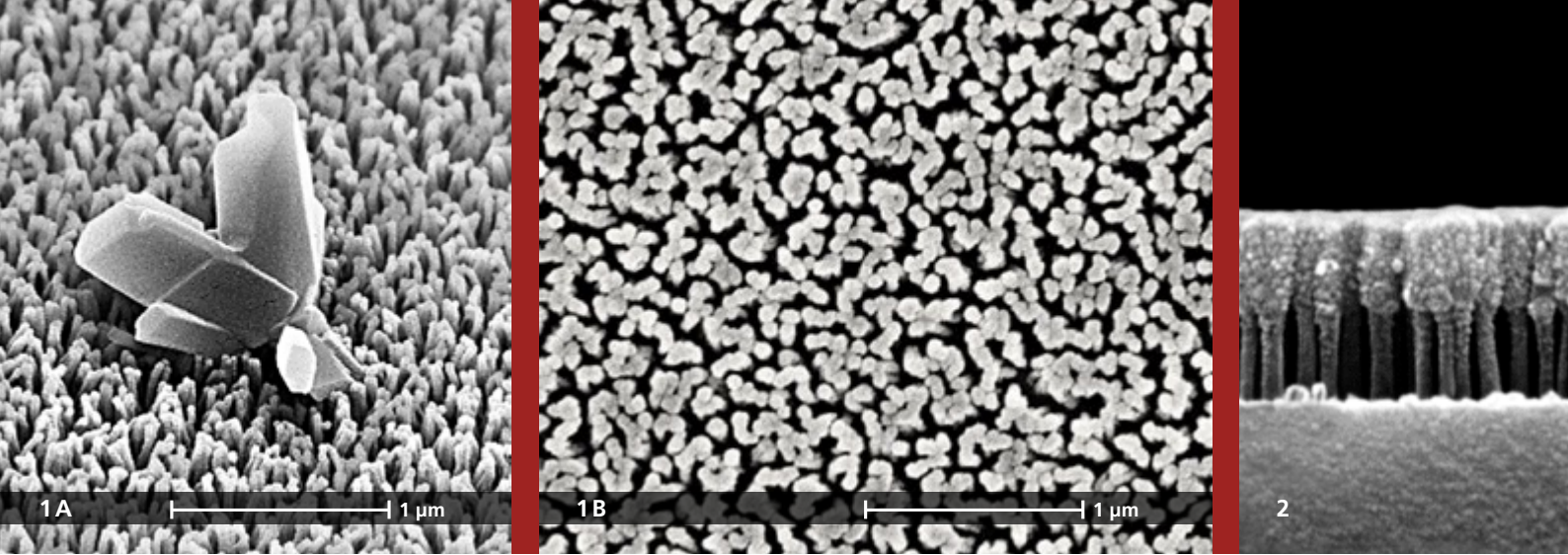
The first results include the development of an algorithm for coating design, which operates in terms of linear susceptibilities as well as third-order susceptibilities ($\chi^{(3)}$) and thus allows a realistic calculation and optimization of the intensity-dependent coating reflectance. At present, the algorithm is restricted to monochromatic light at normal incidence. Figure 1 shows the dependence of the reflectance on the light intensity for a typical quarterwave stack and an optimized design, where the highest reflectance is required for an incident light intensity of 10^{13} W/cm^2 . The target wavelength is 532 nm, and the calculation has been performed assuming typical optical constants. Both designs show the characteristic decrease in reflectance with increasing intensity, but the optimized design is definitely superior to the quarterwave stack in the high intensity regime, typical for femtosecond pulses. The optical layer thicknesses in the optimized design are visualized in Figure 2 and are clearly different from those in a typical quarterwave stack.

AUTHORS

Olaf Stenzel
Steffen Wilbrandt

CONTACT

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



HYBRIDMATERIALIEN FÜR DIE HERSTELLUNG STOCHASTISCHER NANOSTRUKTUREN HYBRID MATERIALS FOR THE PREPARATION OF STOCHASTIC NANOSTRUKTURES

Durch Ätzen im Niederdruckplasma erzeugte stochastische Nanostrukturen werden bereits seit einigen Jahren zur Entspiegelung von Kunststoffen eingesetzt. Mit dem Prozess AR-plas2® lässt sich eine breitbandige Antireflex (AR)-Funktion auch auf Glas realisieren, wenn vor dem Ätzen eine organische Schicht aufgebracht wird.

Zu diesem Zweck wurden Aufdampfprozesse für organische Materialien entwickelt. Besonders kleine organische Moleküle mit ausgeprägten konjugierten Bindungen und relativ hohem Schmelzpunkt (wie z. B. verschiedene Derivate des Purins und Pyrimidins) sind geeignet. Wesentlicher Schritt der Technologie ist die Überschichtung der organischen Struktur mit Siliziumdioxid.

Es konnte jetzt gezeigt werden, dass abschließende Plasmabehandlungen geeignet sind, chemische Bindungen im Organikmaterial zu spalten und neue Bindungen zwischen

Stochastic nanostructures, produced by low-pressure plasma etching, have been applied for antireflection (AR) coatings of polymer substrates for several years. Broadband AR-properties can also be achieved on glass if an organic layer is deposited by evaporation before etching.

Evaporation processes for organic materials have therefore been developed. Small organic molecules with multiple conjugated bonds such as derivatives of purines and pyrimidines are particularly suitable. An essential step of technology is the top-coating of generated structures with silica.

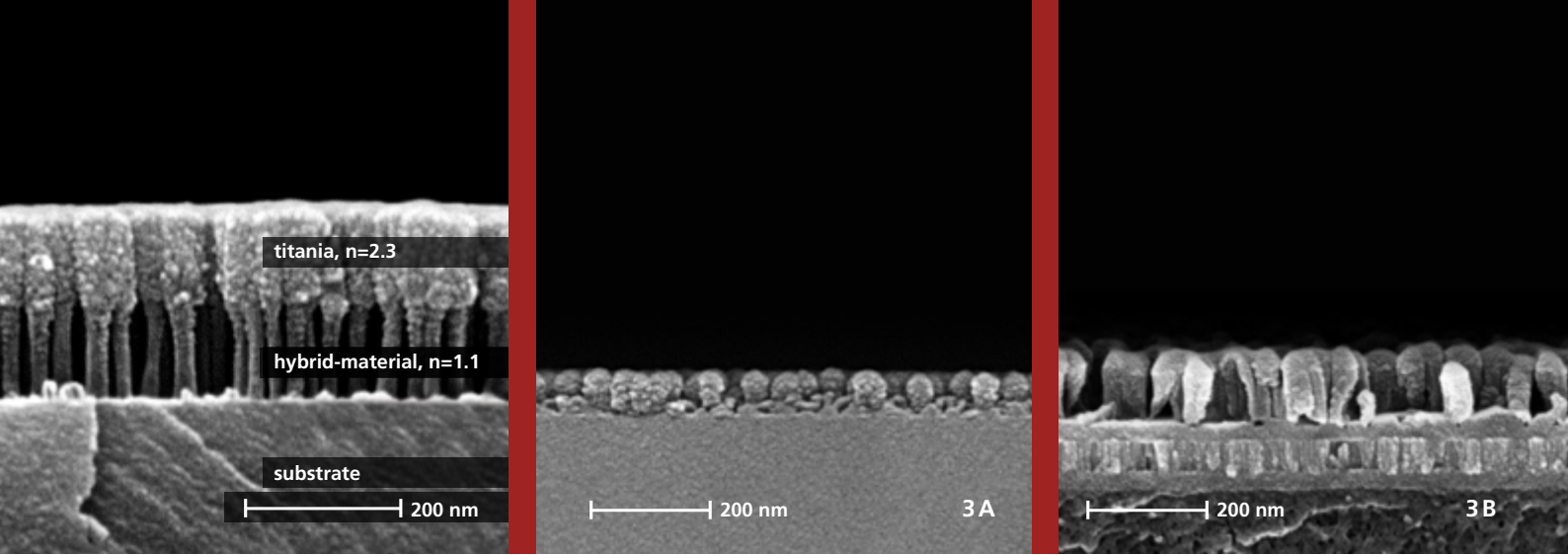
It has recently been shown that plasma treatments as an additional last step are able to create chemical bonds between the oxide and organic groups. Furthermore, a large part of the organic content can be decomposed and removed. As a result, nano-porous hybrid materials are

1 Organische Nanostrukturen: ungeschützte Schicht mit Kristalliten nach sechs Monaten Lagerzeit (A) und durch Siliziumdioxid stabilisierte Oberflächen (B). |

Nanostructured organic layers: unprotected, crystals are grown after six months storage (A) and the stabilized surface covered with silica (B).

2 Säulenförmiges Hybridmaterial kann mit Oxidschichten zu Interferenzschichtsystemen kombiniert werden. | Hybrid material pillars can be covered with oxide layers to obtain interference systems.

3 A: Besonders kleine und stabile Strukturen. B: Beispiel für AR-Schichtsystem AR-plas2®. | A: Particularly small and stable structures. B: Example for AR-coating AR-plas2®.



der Oxidschicht und dem organischen Material zu erzeugen. Auf diesem Weg kann ein großer Teil des Organikmaterials zersetzt und entfernt werden. Es entstehen nanoporöse Hybridmaterialien, die nur noch geringste organische Anteile enthalten und dadurch eine Reihe neuer Anwendungen eröffnen. So weisen die AR-Schichten jetzt eine verbesserte Feuchtestabilität auf. Einige organische Ausgangsstoffe, die in Feuchte zur Kristallisation neigen, werden erst durch eine solche Prozedur anwendbar (Abb. 1) /1/.

Nahezu organikfreie Schichten sind für Anwendungen im UV-Bereich auf Glas und Quarz geeignet /2/. Weiterhin kann es sinnvoll sein, nanoporöse Strukturen durch Übersichten von oben wieder zu schließen. Solche niedrigbrechenden Schichtlagen eignen sich zum Aufbau von Lambdaviertel-Systemen für dielektrische Spiegel und Filter (Abb. 2).

Oberflächen mit erhöhter mechanischer Beständigkeit werden erreicht, wenn Strukturen geringer Höhe aus dem Hybridmaterial zusätzlich mit einer weiteren Oxidschicht bedeckt werden. Solche kleinen Strukturen können zur hydrophoben oder hydrophilen Oberflächenfunktionalisierung eingesetzt werden (Abb. 3a).

Ein Patent, welches die Prozessführung zur Herstellung der neuen Hybridmaterialien beschreibt, wurde kürzlich erteilt /3/.

Literatur / References

- /1/ P. Munzert et al.: Color neutral antireflection coatings for strongly curved lenses using organic nanostructures as low-n template, Proc. SPIE 10691, <https://doi.org/10.1117/12.2311295>, (2018).
- /2/ U. Schulz et al.: Application of uracil for the preparation of low-index nanostructured layers, Opt. Mat. Exp. 8, 2182-2189 (2018).
- /3/ DE102016125197A1, Fraunhofer Society, 2018. 10 (15) 13158-13.

created which contain only traces of organic substances. This opens up a number of new applications. The AR-coatings then show in general a better stability in humid conditions. Some alternative organic precursors can be used which would tend to crystallize at higher humidity (Fig. 1) /1/.

It is now possible to produce AR-coatings on glass and quartz for the ultraviolet spectral range /2/. Additional high-index oxide layers can be applied to cover the structures and to construct quarter wave systems such as dielectric mirrors and filters (Fig. 2). Surfaces with higher mechanical resistance are obtainable by depositing silica layers on top of small structures (Fig. 3a). In addition, these stable small structures are useful to achieve hydrophobic or hydrophilic surface properties.

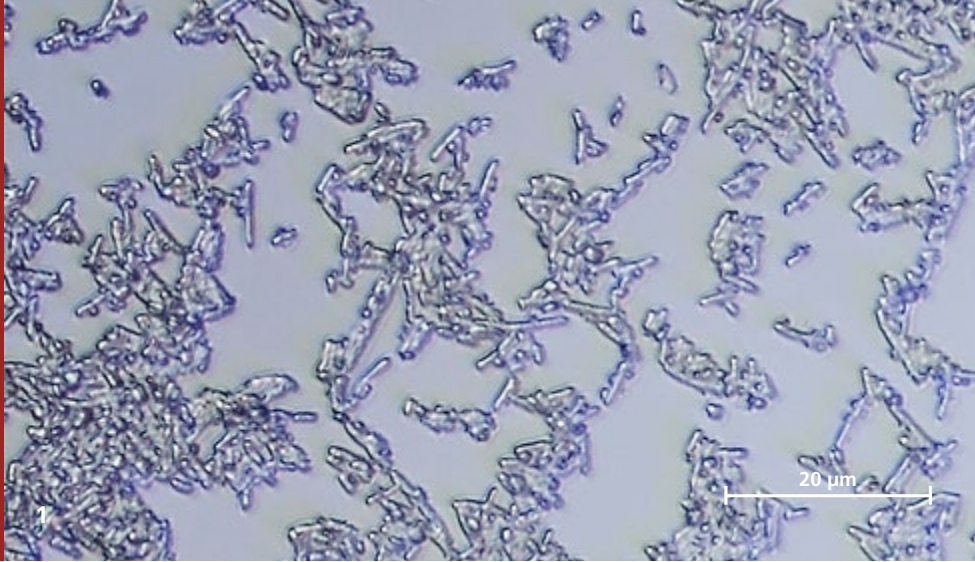
Recently, a patent which describes the advanced production route has been granted /3/.

AUTHORS

Ulrike Schulz
Peter Munzert
Friedrich Rickelt
Nancy Gratzke

CONTACT

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



BIOFUNKTIONALE OBERFLÄCHEN

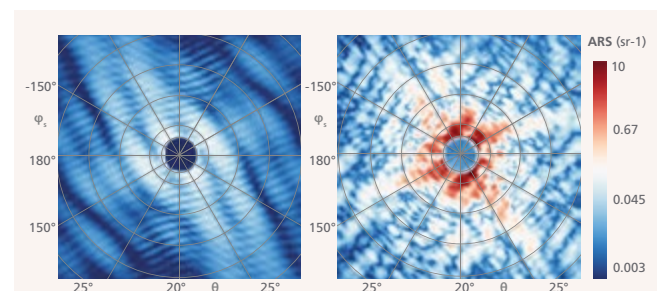
BIO-FUNCTIONAL SURFACES

Biologische Zellen reagieren äußerst sensitiv auf Kontakt mit anderen Zellen und Materialien. Die Material- und Oberflächeneigenschaften haben dabei einen entscheidenden Einfluss, wie gut zum Beispiel Gewebe an Implantate anwächst, aber auch wie schnell und stark sich Bakterien auf Oberflächen ansiedeln und Biofilme entstehen. Je nachdem, in welchem Bereich die Materialien eingesetzt werden, sind verschiedene Verhalten erwünscht oder sollen unterdrückt werden, da sie die Infektionsgefahr erhöhen (z. B. bei medizinischen Produkten) oder die Funktion beeinträchtigen (z. B. das Wachsen von Biofilmen an Sichtfenstern). Aufgrund der bedrohlichen Verbreitung multiresistenter Erreger sind bspw. inhärent bakterizide Oberflächen von immenser Bedeutung.

Durch eine definierte Strukturierung und chemische Funktionalisierung, wie dies auch am Fraunhofer IOF realisiert wird /1/, kann das Besiedlungsverhalten von Zellen auf Oberflächen gezielt beeinflusst werden. Jedoch sind die Zusammenhänge komplex und die Einflussfaktoren vielfältig. Ein umfassender Pool leistungsfähiger und aussagekräftiger Analysemethoden ist daher essentiell für die Entwicklung und Herstellung biofunktionaler Oberflächen. Durch die Kombination von Topografie-, Funktions- und Streulichtcharakterisierungen können am Fraunhofer IOF nicht nur die spezifischen Eigenschaften einer Oberfläche einzeln, sondern auch deren Korrelationen untereinander umfassend aufgeklärt werden. Zur Beschreibung der Oberflächentopografie wird dabei die Leistungsspektraldichtefunktion ermittelt, die Informationen über die vertikale und laterale Verteilung der Rauheitskomponenten enthält sowie die Verknüpfung von Rauheit, Benetzung

Biological cells react highly sensitively to other cells and materials. The material and surface properties decisively influence how well tissue grows around an implant for example, or how quickly and strongly bacteria adhere to surfaces and thus create biofilms. Depending on the application, different growth behavior affects the risk of infection (e.g. in medical products) or the functionality (e.g. the growth of biofilms on optical components). Due to the threatening spread of multi-resistant pathogens, inherently bactericidal surfaces are crucial.

Defined structuring and chemical functionalization, as realized at Fraunhofer IOF /1/, can have a specific impact on the colonization of cells on surfaces. However, the correlations are complex and possible influential factors are diverse. A comprehensive pool of efficient and powerful analysis methods is therefore essential for the development and manufacturing of bio-functional surfaces. By combining topographic, functional, and light scattering characterization methods at Fraunhofer IOF, the specific properties of a surface can be analyzed individually,



2 **Winkelaufgelöste Streulichtmessungen derselben Probe an Positionen mit unterschiedlicher Zellkonzentration.** | Angle-resolved light scattering measurement of the same sample at positions with different cell concentration.

1 **Lichtmikroskopische Aufnahme von E.coli-Bakterien auf Glasoberfläche.** | Light microscopic image of E.coli bacteria on glass.

und optischen Eigenschaften ermöglicht. Entgegen der üblichen Vorgehensweise können so gezielt die Auswirkungen unterschiedlicher Strukturkomponenten auf das Benetzungs- sowie Adhäsionsverhalten von Bakterien ausgewertet werden. Anhand erster Untersuchungen an abgestuft nanorauen, mikrorauen sowie auch kombiniert mikro- und nanorauen Oberflächen konnte ein signifikanter Einfluss bestimmter Strukturparameter auf Benetzung und Bakterienadhäsion gezeigt werden (Abb. 3). Zur Charakterisierung solcher Strukturen werden am Fraunhofer IOF neben mikroskopischen auch winkelaufgelöste Streulichtmethoden eingesetzt. Nun wurde ein neuer, innovativer Streulichtaufbau realisiert, mit dem darüber hinaus gezielt auch Bakterien und andere biologische Zellen detektiert und analysiert werden können /2/. In Kombination können auf diese Weise eine Oberfläche und deren Besiedlung simultan untersucht werden (Abb. 2).



and their correlations to each other comprehensively clarified. The power spectral density is determined to describe the topography of a surface. This function contains information on the vertical and lateral distribution of the roughness components and allows the connection of roughness, wetting, and optical properties. In contrast to the usual approach, this enables the influence of various structural components on the wetting and bacterial adhesion behavior to be selectively evaluated. The first investigations on various nano-rough, micro-rough, and combined nano- and micro-rough surfaces demonstrated a significant impact of certain structural parameters on wetting and bacterial colonization (Fig. 3). At Fraunhofer IOF, angle-resolved light scattering is used in combination for the characterization of such structures. A new innovative scatter-based system has now been realized that specifically allows the detection and analysis of bacteria and other biological cells /2/. Thus, a surface and its colonization by cells can be analyzed simultaneously (Fig. 2).

References / Literatur

- /1/ N. Felde, et al.: Wear-Resistant Nanostructured Sol-Gel Coatings for Functional Applications, Journal of Coating Science and Technology, 2016, 3, 100-108.
/2/ funded by the Leibniz Association as part of the research campus InfectoOptics.

AUTHORS

Anne-Sophie Munser
Luisa Coriand
Nadja Felde
Sven Schröder

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 und Auswerteverfahren sowie Systemlösungen. Das Fraunhofer IOF nutzt modernste optische und miniaturisierte bzw. mikrooptische Komponenten sowie Sende- und Empfangseinheiten, Projektionstechniken, Lichtquellen, Softwaretechnologien und Rechnerarchitekturen. Schwerpunkte sind hierbei Lösungen für 3D-Messsysteme für Anwendungen in der Produktion und Medizin, basierend auf Verfahren der Muster- und Streifenprojektion; Systeme zur Schicht- und Oberflächencharakterisierung (streulichtbasierte Messsysteme zur Rauheitsbestimmung und Mikro- und Nanostrukturvermessung); und ultrakompakte multi-kanalige mikrooptische Bilderfassungssysteme auf der Grundlage bio-inspirierter Ansätze (facetvision), welche für mobile Endgeräte oder Anwendungen im Automobilbereich genutzt werden können.

Viele der genannten Themen wurden 2018 bearbeitet und sind in den nachfolgenden Beiträgen dargestellt. Dazu zählen beispielsweise die miniaturisierte Sensorik für autonomes Fahren, In-Line 3D-Vermessung, multispektrale 3D-Vermessung, Oberflächencharakterisierung von Freiformen sowie Array-Mikroskope.

Fraunhofer IOF develops optical and optoelectronic measuring and sensor systems. The research includes novel measuring methods, sensor principles, and evaluation methods as well as system solutions. Fraunhofer IOF uses state-of-the-art optical and miniaturized or micro-optical components as well as transmitting and receiving units, projection techniques, light sources, software technologies, and computer architectures. The focus here is on solutions for 3D measuring systems for applications in production and medicine, based on methods of pattern and fringe projection. Furthermore, systems for layer and surface characterization (straylight-based measuring systems for roughness determination or micro and nanostructure measurement), as well as ultra-compact, multi-channel, micro-optical imaging systems based on bio-inspired approaches (facetvision), which can be used for mobile end devices or automotive applications, are at the center of Fraunhofer IOF's activities.

Many of the topics mentioned have been worked on in 2018 and are presented in the following articles, such as miniaturized sensors for autonomous driving, in-line 3D measurement, multispectral 3D measurement, surface characterization of freeforms, and array microscopes.

LEFT *Die Natur als Vorbild – Entwickelte miniaturisierte Array-Kameras basieren auf dem Prinzip der Facettenaugen von Insekten. | Nature as a role model – Developed miniaturized array cameras are based on the principle of the facet eyes of insects.*



MINIATURISIERTE SENSORIK FÜR AUTONOMES FAHREN MINIATURIZED SENSORS FOR AUTONOMOUS DRIVING

Die Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen hin zu vollständig autonom fahrenden Fahrzeugen ist ein aktueller Trend in der Automobilindustrie. Für den Fahrer bedeutet das eine Veränderung seiner Rolle vom aktiven Lenker hin zum passiven Systemüberwacher. Damit verbunden ist eine Reihe von neuartigen Fragestellungen aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion. Um zum Beispiel sicherzustellen, dass eine autonome Fahrweise vom Fahrer oder weiteren Insassen als komfortabel erlebt wird, muss der Fahrzeuginnenraum hochaufgelöst und dreidimensional erfasst werden.

Klassische Sensorsysteme können diese Aufgabenstellung oft nur begrenzt erfüllen. Gegenstand der Arbeiten im Verbundvorhaben COMFYDrive ist daher die Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen 3D-Multisensorsystems zur Fahrzeuginnenraumüberwachung. Dieses kombiniert erstmals die 3D-fähigen Einzelprinzipien der Array-Kamera, der Stereoskopie sowie der Musterprojektion.

Das System basiert auf zwei miniaturisierten Array-Kameras mit einem Gesichtsfeld von 70° (diagonal) und einer Blendenzahl von kleiner 3. Diese sind den natürlichen Facettenaugen der Insekten technisch nachempfunden. Das Mikroobjektiv besteht dabei aus zwei Freiformmikrolinsen-Arrays, welche auf einem lithografisch strukturierten Glassubstrat angeordnet sind. Zur Unterdrückung von optischem Übersprechen zwischen benachbarten Abbildungskanälen dient eine drei-

The ongoing development of driver assistance systems towards autonomous driving cars is a current trend in automotive industry. This changes the driver's task from active driving to passive monitoring of the system, and as a result, many new scientific questions arise in the field of human-machine interaction. For example, it has to be guaranteed that the style of the autonomous driving is comfortable for the driver and for all the passengers. Therefore, the interior of the car needs to be captured in all three dimensions with high resolution.

Conventional sensor systems are generally only able to fulfill this task to a limited extent. Consequently, the scope of the work within the joint project COMFYDrive is the development and investigation of a new 3D multi sensor system for monitoring the interior of an autonomous driving car. The system will combine for the first time three principles that are capable of the generation of three-dimensional information – namely the principles of the array camera, stereoscopy, and active pattern projection techniques.

The system is based on two miniaturized array cameras with a field of view of 70° (diagonal) and a f-number smaller than 3. Natural compound eyes of insects have been the archetype for the design of the array camera. The micro objective itself consists of two freeform micro lens arrays that are molded on a lithographically structured glass substrate.

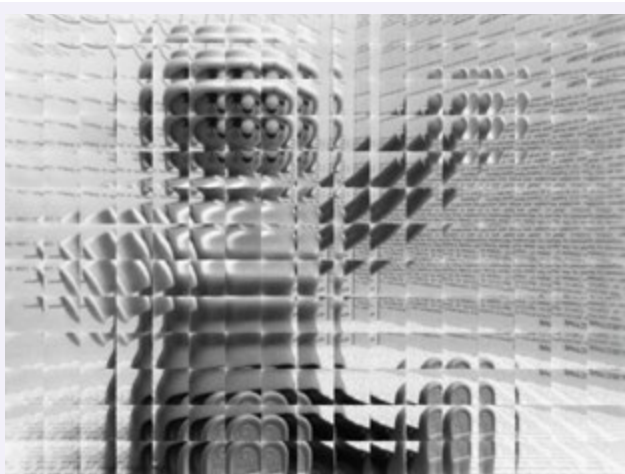
1 *Miniaturisierte Array-Kamera.* | *Miniaturized array camera.*

dimensionale Blendenstruktur, welche sich unmittelbar über dem CMOS-Bildsensor befindet. Die Fertigung der Freiformmikrolinsen-Arrays erfolgt durch eine Prozesskette, welche die Verfahren Ultrapräzisionsmikrozerspanung und Step- & Repeat UV-Mikroreplikation miteinander kombiniert. Auf diese Weise können doppelseitige Mikroobjektive kosteneffizient und in großen Stückzahlen im Wafermaßstab hergestellt werden.

Die Abbildungsoptik des Multisensors zeichnet sich durch eine extrem kleine Bauhöhe von weniger als 2 mm aus und ist damit hervorragend in den Fahrzeuginnenraum integrierbar. Das einzelne Kameramodul liefert 15 x 9 Einzelbilder, welche anschließend zu einem rekonstruierten Gesamtbild oder zu verzeichnungskorrigierten Kachelbildern verrechnet werden. Aus den gewonnenen Bildinformationen können anschließend durch nachgelagerte Bildverarbeitungsalgorithmen hochaufgelöste 3D-Informationen aus dem Fahrzeuginnenraum gewonnen werden. Diese sollen zunächst einen Rückschluss auf den Zustand der Fahrzeuginsassen in Abhängigkeit der jeweiligen Fahrsituation und zukünftig eine Rückkopplung auf die Fahrweise des autonom fahrenden Fahrzeugs erlauben.

In order to prevent optical cross talk of neighboring imaging channels, a three-dimensional aperture array is placed above a commercial CMOS imaging sensor. The manufacturing of the freeform micro lens arrays is carried out by the combination of an ultra-precision micro machining process and a step&repeat micro replication technique. This approach allows the cost-effective realization of a huge quantity of elements on a wafer level scale.

The imaging optics possesses a height of less than 2 mm and is therefore well suited for integration in the interior of a car. The single camera module generates 15 x 9 partial images that are subsequently transformed via image processing into a reconstructed image of the full scenery or into corrected tile images. Based on image data, three-dimensional point clouds can be generated in high resolution. First, this data should be used in order to collect information on the condition of the passengers with regard to the current driving situation. In the future, feedback on the driving style of the autonomous car will also be an option.



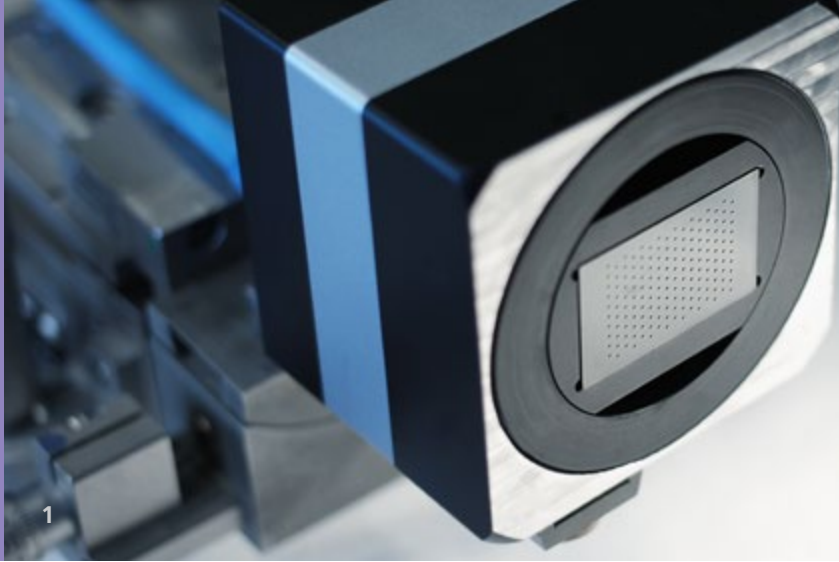
2 Kachelbilder zur Berechnung der 3D-Information. |
Tile images for the calculation of 3D-information.

AUTHORS

Jens Dunkel
Alexander Oberdörster
Christin Gassner
Andreas Reimann
Andreas Brückner

CONTACT

Dr. Robert Brüning
Phone +49 3641 807-360
robert.bruening@iof.fraunhofer.de



ARRAY-MIKROSKOP MIT SUB-MIKROMETER AUFLÖSUNG ARRAY MICROSCOPE WITH SUB-MICROMETER RESOLUTION

Die optische Abbildung kleiner Strukturen wird in nahezu allen technischen Disziplinen eingesetzt. Herkömmliche Mikroskope sind vor allem als Tischgeräte bekannt und liefern begrenzte, von der Objektivvergrößerung abhängige Bildfelder. Eine Erhöhung der abgebildeten Objektfläche kann nur durch sehr große und aufwändige optische Systeme und/oder durch das Scannen des Objekts erreicht werden. Demgegenüber gestattet ein neuartiger Ansatz der Miniaturisierung der Optik eine parallele Anordnung vieler Mikroskopobjektive in einem Array ^{1/}. In diesem Ansatz entspricht das abgebildete Objektfeld der Größe des Bildsensors, sodass eine Erweiterung ohne zusätzliche Scanschritte oder eine steigende Komplexität der Optik möglich ist. Entsprechende Systeme ^{1/} sind aber durch die Pixelgröße des Detektors und die erreichbare numerische Apertur begrenzt. Alternativ ermöglichen vergrößernde Array-Mikroskope die Auflösung kleiner Strukturen ^{2/}; sie bedingen jedoch zusätzliche Scanschritte, deren Anzahl proportional zum Quadrat der Vergrößerung ist.

Abbildung 1 zeigt ein Beispiel eines aus 160 identischen Einzelkanälen bestehenden 0.3 NA, 10x vergrößernden Array-Mikroskops. Die im Foto sichtbare Frontoptik ist nur etwa 10 mm vom 22.5 x 16.9 mm² großen Bildsensor entfernt, so dass das gesamte abbildende System vollständig in das Gehäuse einer kommerziellen Kamera integriert

Optical imaging of small structures is applied in almost all scientific and technical disciplines. Conventional microscopes, which are well-known tabletop devices, provide a limited field of view depending on the magnification of the objective. Increasing the respective field of view requires large, complex optical systems and/or scanning of the object. By contrast, a novel method using miniaturized objectives enables a parallel arrangement of multiple microscopes in one array ^{1/}. In such an approach, the field of view equals the size of the image sensor and larger areas can be accessed without increasing the optic's complexity and/or scanning. However, the numerical aperture, as well as the detector's pixel size, limit the resolution of respective systems. Alternatively, magnifying array microscopes enable the resolution of small objects ^{2/}, but necessitate a number of scanning steps that is proportional to the square of the magnification.

Figure 1 shows one example of a 0.3 NA, 10x magnification array microscope consisting of 160 identical channels. The distance between the front lens array, visible in the photo, and the image sensor is in the range of 10 mm only. Therefore, the whole imaging optics is integrated completely into a commercial camera housing. In addition, a two-band spectral filter enables fluorescence imaging. The optical system has been replicated on both sides of one wafer with high lateral and axial precision and ultimately

¹ *Im Gehäuse einer kommerziellen Kamera montiertes Array-Mikroskop. |
An array microscope inside of a commercial camera's housing.*

werden kann. Der ebenfalls integrierte Zwei-Band-Spektralfilter ermöglicht die Fluoreszenz-Bildgebung. Das abbildende optische System wird auf beide Seiten eines Wafers mit hoher lateraler und axialer Genauigkeit repliziert und erlaubt anschließend eine rein passive Integration des Gesamtsystems. Die Messdaten in Abbildung 2 belegen das hohe Auflösungsvermögen des Systems, in dem 1 μm breite Streifen (500 lp/mm in Abb. 2) deutlich voneinander getrennt abgebildet werden. Damit wird es ermöglicht, eine mikroskopische Bildaufnahme großer Flächen mit einem kleinen, tragbaren System zu erreichen.

Diese Arbeiten wurden von der Thüringer Aufbaubank im Vorhaben 2015 FE 9115 gefördert.

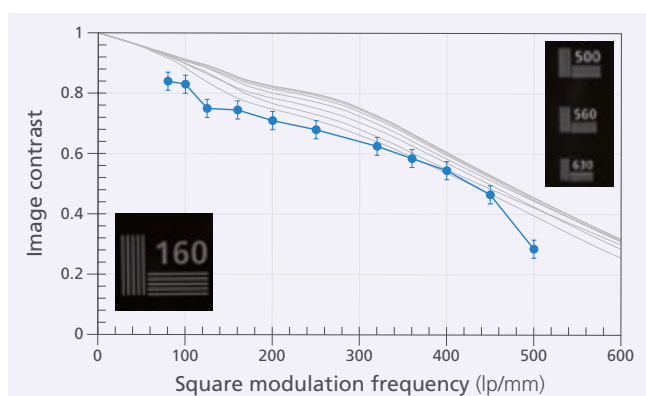
allows a purely passive integration of the overall system. The measured data shown in Figure 2 illustrates the contrast of the image, demonstrating clearly resolved 1 μm wide stripes (500 lp/mm). Further advancing this approach will enable microscopic imaging of large areas by means of a small, handheld system.

This project has been funded by the Thüringer Aufbaubank under contract 2015 FE 9115.

References / Literatur

/1/ R. Berlich, A. Brückner, R. Leitel et al.:
Proc. SPIE 9192 (2014) 91920E.

/2/ R. Berlich, T. Hermeyer, F. Wippermann et al.:
Microsystems Technology in Germany 2016,
ISSN 2191-7183 (2016) 48.



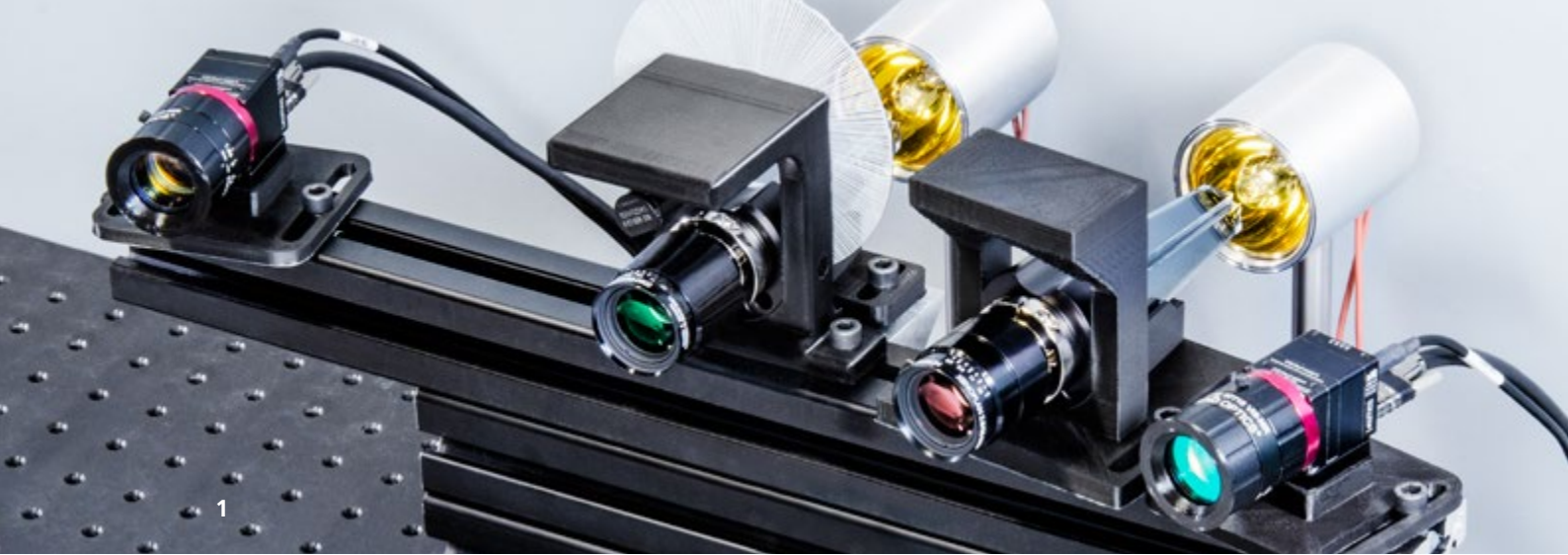
2 Gemessener Kontrast (blaue Kurve) der Abbildung eines Kanals für unterschiedliche Modulationsfrequenzen im Vergleich zum Design (graue Kurven); Beispiele sind eingefügt. | Measured imaging contrast vs. modulation frequency of a single channel (blue curve) compared to simulation (gray curves) with example images shown in the insets.

AUTHORS

Norbert Danz
Rene Berlich
Bernd Höfer
Peter Dannberg
Jens Dunkel

CONTACT

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



MULTISPEKTRALE 3D-ERFASSUNG MULTISPECTRAL 3D DETECTION

Die multispektrale Bildgebung ist eine leistungsstarke Technologie zur Ermittlung der spektralen Eigenschaften eines Objekts oder einer Szene. Moderne Multispektralkameras ermöglichen die orts aufgelöste Erfassung der emittierten bzw. reflektierten Strahlungsleistung in einem Dutzend bis zu mehreren hundert Wellenlängenbereichen. Ursprünglich für die Fernerkundung und Astronomie entwickelt, erschließen Multispektralkameras zunehmend neue Anwendungsgebiete. Sie eignen sich beispielsweise zur Analyse von wertvollen Kunst- und Kulturgegenständen, zur Qualitätskontrolle von Lebensmitteln oder zur Bestimmung des Gesundheitszustandes von Pflanzen.

Da die Form der Messobjekte einen wesentlichen Einfluss auf die ermittelten spektralen Eigenschaften hat, ist es vorteilhaft, Spektralinformationen mit dreidimensionalen Oberflächenmodellen zu kombinieren. Am Fraunhofer IOF wurde daher ein Sensor entwickelt (Abb. 1), der die gleichzeitige Erfassung dieser Eigenschaften bis zu 17-mal pro Sekunde erlaubt /1/. Das System besteht aus zwei Schnappschuss-Multispektralkameras mit 25 Spektralkanälen (600 bis 975 nm), einem am Fraunhofer IOF entwickelten breitbandigen Hochgeschwindigkeits-Projektor zur Beleuchtung des Messobjekts mit variierenden Mustern /2/ sowie einem weiteren Projektor zur homogenen Objektbeleuchtung. Der entwickelte Sensor bietet unter anderem eine vielversprechende nicht-invasive Möglichkeit zur Analyse, Klassifizierung und digitalen Bewahrung von Kunst- und Kulturgut. Die in Abbildung 2 gezeigten Ergebnisse der Vermessung eines historischen Reliefglobus aus dem Jahr 1885 verdeutlichen die detaillierte Erfassung der

Multispectral imaging is a powerful technology to determine the spectral properties of an object or scene. Modern multispectral cameras allow the spatially resolved acquisition of the emitted or reflected radiant power in a dozen to several hundred wave-length ranges. Originally developed for remote sensing and astronomy, multispectral cameras are increasingly opening up new fields of application. They are suitable, e. g., for the analysis of valuable art and cultural objects, for the quality control of foodstuffs, or for determining the state of health of plants.

As the shape of the measurement objects has a significant influence on the determined spectral properties, it is advantageous to combine spectral information with three-dimensional surface models. Fraunhofer IOF has therefore developed a sensor (Fig. 1) that allows the simultaneous acquisition of these properties up to 17 times per second /1/. The system consists of two multi-spectral snapshot cameras with 25 spectral channels (600 to 975 nm), a high-speed



2 **Multispektrale 3D-Vermessung eines historischen Reliefglobus.** | *Multispectral 3D measurement of a historical relief globe.*

1 **Multispektrale 3D-Sensoren.** | *Multispectral 3D sensors.*

geometrischen sowie spektralen Oberflächeneigenschaften, die Rückschlüsse auf die verwendeten Materialien zulassen. Beim Menschen ermöglichen multispektrale 3D-Modelle beispielsweise auch die vereinfachte Detektion von Venen unabhängig von Hautton, Dehydrierungsgrad, Fettgehalt oder Körperhaar, insbesondere im Spektralbereich zwischen 800 und 850 nm. Auf diese Weise lässt sich zuverlässig feststellen, welche Venen für eine Infusion geeignet sind. Abbildung 3 veranschaulicht dies anhand der Vermessung der linken Hand eines 26-jährigen Probanden.

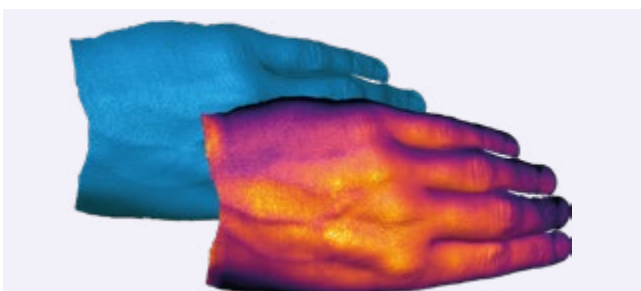
Die Bandbreite potenzieller Anwendungen des neuen Sensors reicht von der Phänotypisierung von Pflanzen über die Beobachtung des Heilungsverlaufs von Wunden bis hin zur Untersuchung des Eindringverhaltens von Licht in verschiedene Materialien. Damit werden vielfältige Möglichkeiten unter anderem für die Landwirtschaft, Medizin oder Wissenschaft eröffnet. Zukünftige Untersuchungen am Fraunhofer IOF haben die Optimierung der verwendeten Hardware, die weitere Erhöhung der Messgeschwindigkeit sowie die Ausdehnung auf weitere Spektralbereiche zum Ziel.

Literatur / References

- /1/ S. Heist et al.: Opt. Express 26(18), 23366–23379 (2018).
/2/ S. Heist et al.: Opt. Lasers Eng. 87, 90–96 (2016).

broadband projector developed at Fraunhofer IOF to illuminate the target with varying patterns /2/, and an additional projector that illuminates the object homogeneously. The developed sensor offers, among other things, a promising non-invasive possibility for the analysis, classification, and digital preservation of art and cultural assets. The results of the investigation of a historical relief globe from 1885 shown in Figure 2 illustrate the detailed acquisition of the geometric and spectral surface properties that allow conclusions to be drawn about the materials used. Moreover, multispectral 3D models enable the simplified detection of veins independent of skin tone, degree of dehydration, fat content, or body hair, particularly in the spectral range between 800 and 850 nm. In this way, it is possible to reliably determine which veins are suitable for infusion. Figure 3 illustrates this with the measurement of the left hand of a 26-year-old male subject.

The range of potential applications of the new sensor includes phenotyping plants, observing the healing process of wounds, and investigating the penetration of light into different materials. This opens up a variety of new opportunities for agriculture, medicine, or science. Future investigations at Fraunhofer IOF will aim to optimize the hardware used, to further increase the measurement speed, and to extend the sensor to other spectral ranges.



3 3D-Modell einer Hand ohne sowie mit im nahen Infrarot detektierter Textur. | 3D model of a human hand without and with texture detected in the near infrared.

AUTHORS

Stefan Heist
Chen Zhang
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

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



ORTSAUFGELOSTE OBERFLÄCHEN-CHARAKTERISIERUNG VON FREIFORMEN CHARACTERIZATION OF FREEFORM SURFACES

Freiformoptiken ermöglichen leistungsfähige und vielseitige optische Systeme mit extrem geringen Baugrößen. Eine Herausforderung stellt allerdings, aufgrund der hohen Anzahl an Freiheitsgraden und dem Einsatz von lokalen Prozessverfahren, die Fertigung der optischen Oberflächen dar. Eine prozessnahe, umfassende und gleichzeitig detailreiche Charakterisierung ist daher essentiell für eine hocheffiziente Fertigungsweise.

Im gleichen Maß, wie die Anforderungen an die Fertigungsverfahren beim Übergang von planen zu sphärischen, asphärischen und Freiformflächen zunehmen, steigen auch die Anforderungen an die Metrologie. Eine elegante Möglichkeit diesem Bedarf gerecht zu werden, stellen streulichtbasierte Messverfahren dar. Aufgrund des berührungslosen und schnellen Messprinzips können komplex geformte Oberflächen hinsichtlich Streulicht, Rauheit, Homogenität sowie lokalen Stör- und Defektstellen, wie beispielsweise Subsurface-damage oder Partikelverunreinigungen, umfassend und effizient charakterisiert werden /1/. Die hohe Robustheit der Streulichtmesstechnik gegenüber Vibrationen ermöglicht zudem einen fertigungsbegleitenden Einsatz /2/.

Innerhalb der letzten Jahre wurden daher die Streulichtmesssysteme des Fraunhofer IOF mit zahlreichen Freiheitsgraden erweitert und konsequent weiterentwickelt. So weisen die

Freeform optics enable highly efficient and extremely compact optical systems possible for a wide variety of applications. A challenge, however, is the fabrication of such surfaces because of the high number of degrees of freedom as well as the application of local fabrication and correction techniques. Therefore a process-oriented and comprehensive, but at the same time very detailed characterization, therefore becomes essential for a highly efficient manufacturing process.

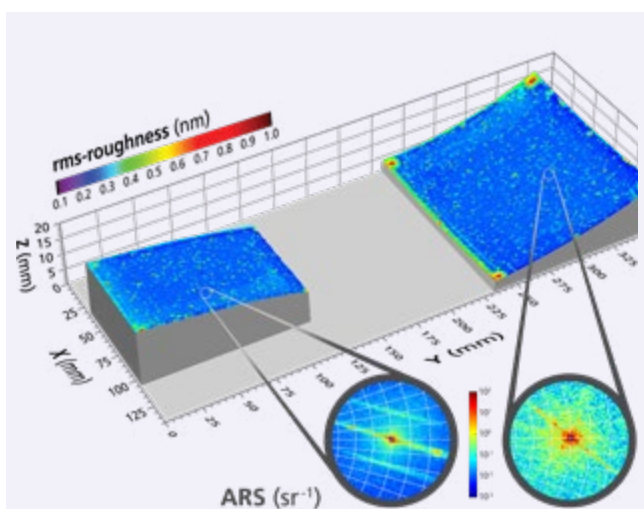
In the same way as the demands on the manufacturing processed increase when moving from plane to spherical, aspherical, and freeform surfaces, the requirements on the metrology become more challenging too. An elegant solution to solve this is give by light scattering measurements: The non-contact and fast measurement principle enables an efficient characterization of complex shaped surfaces with respect to scattering, roughness, homogeneity, as well as local impurities and defects, such as subsurface damage, particles, or contaminations /1/. The insensitivity to vibrations also allows light scattering metrology to be brought directly into the fabrication process /2/.

In recent years, the scatterometers of Fraunhofer IOF have been consistently improved and extended by several degrees

1 *Robotergestützte Streulichtcharakterisierung einer Freiformfläche. | Robot-assisted light scattering characterization of a freeform surface.*

aktuellen goniometerbasierten Systeme bis zu 15 frei konfigurierbare Achsen auf, die eine beliebige Ausrichtung der Probe und eine dazu frei gestaltbare Beleuchtung und Detektion im 3D-Raum ermöglichen. Somit ist es möglich, nicht nur einzelne optische Komponenten, sondern auch komplette Freiformsysteme hochsensitiv zu charakterisieren und beispielsweise den Einfluss von Störlichtquellen außerhalb des Sichtfeldes zu analysieren.

Einen alternativen Ansatz stellt die Kombination kompakter Streulichtsensoren mit einem interaktiven Roboter dar. Letztere realisiert eine freie Positionierung des Sensors bezüglich der Probe basierend auf CAD-Daten der Probenoberfläche. Eine Feinpositionierung erfolgt automatisiert anhand der Sensordaten. Dies ermöglicht, selbst große Probengeometrien vollständig hinsichtlich ihrer Oberflächenrauheit und Homogenität zu untersuchen. Darüber hinaus können lokale Politur- und Korrekturverfahren direkt im Fertigungsprozess überwacht werden.



2 *Rauheitskarte einer Freiformfläche basierend auf 3D-Streulichtdaten. | Roughness map of a freeform surface with underlying 3D scattering distributions.*

of freedom in order to support the characterization of freeform surfaces. For instance, the current goniometer based systems exhibit up to 15 freely configurable axes to control the orientation of the sample, the illumination, and detection directions in 3D space. Thus, it is possible to characterize not only single optical components, but also complete freeform optical systems. This for instance allows an analysis of the influence of light sources outside the field of view of an optical system.

An alternative approach is the combination of compact scattering sensors with interactive robots. The latter allow for a free positioning of the sensor with respect to the sample surface based on the CAD data of the sample. An automated fine positioning is enabled by use of the sensor data. It is thus possible to characterize even large sample geometries and determine area-covering maps of the surface roughness and homogeneity. Moreover, local polishing and correction steps can be directly monitored during the manufacturing of a freeform surface.

References / Literatur

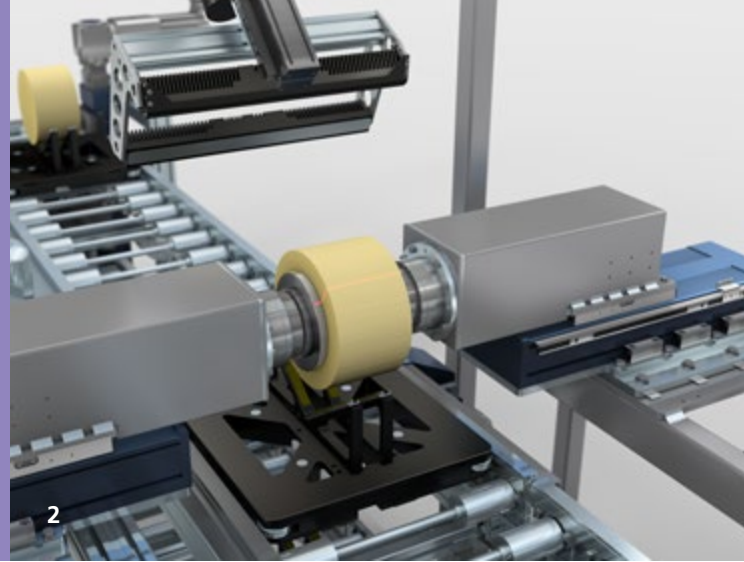
- /1/M. Hauptvogel et al.: Light scattering characterization of optical components for space applications, Proc. International Conference on Space Optics (2017).
- /2/M. Trost et al.: In situ and ex situ characterization of optical surfaces by light scattering techniques, Opt. Eng. 53 (2014).

AUTHORS

Marcus Trost
Tobias Herffurth
Sven Schröder

CONTACT

Dr. Marcus Trost
Phone +49 3641 807-242
marcus.trost@iof.fraunhofer.de



IN-LINE 3D-VERMESSUNG VON WABENKATALYSATOREN

IN-LINE 3D MEASUREMENT OF HONEYCOMB CATALYSTS

In vielen industriellen Produktionsbetrieben ist die 100 Prozentkontrolle der gefertigten Waren eine zwingende Forderung der Qualitätssicherung. Um dies auch bei hohen Produktionsraten gewährleisten zu können, sind speziell angepasste kundenspezifische Messsysteme notwendig. Für die Firma Johnson Matthey Catalysts GmbH wurde eine vollautomatische Messzelle zur optischen Inspektion von zylindrischen Wabenkatalysatoren entwickelt. Die keramischen vollaktiven Katalysatoren besitzen durch ihren speziellen Herstellungsprozess im Vergleich zu konventionellen Katalysatoren eine gesteigerte Effektivität, sie unterliegen jedoch größeren geometrischen Schwankungen. Eingesetzt werden sie zur Abgasreinigung bei PKWs, LKWs, Schiffen und in Kraftwerken. Durch die Vielzahl verschiedener Einsatzszenarien existiert eine entsprechend große Typenpalette mit Durchmessern von 140 mm bis 330 mm bei Längen von 100 mm bis 300 mm. Das gesamte Typenspektrum muss mit hohen Stückzahlen im Drei-Schichtbetrieb geprüft werden. Dabei muss die Anlage zum einen hohe Zuverlässigkeit gewähren und zum anderen durch Umrüstzeiten von wenigen Minuten flexibel auf die zunehmende On-demand-Fertigung reagieren. Der zweistufige Inspektionsvorgang beginnt mit der Rundumvermessung der Mantelfläche. Hierzu werden die Katalysatoren über eine speziell entworfene Mechanik aus der Förderstrecke ausgehoben und um die Zylinderachse rotiert. Parallel zur 3D-Vermessung wird die Mantelfläche mit einer hochauflösenden Kamera auf Risse ab einer Breite von 100 µm untersucht. Die eigens entworfene

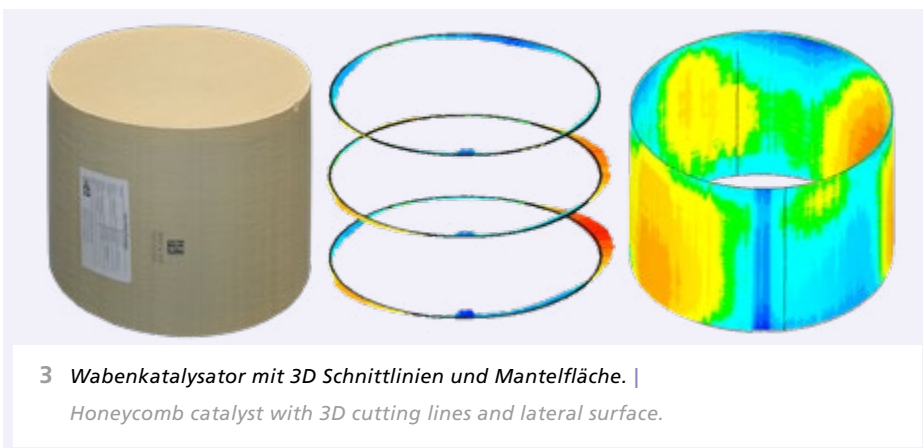
In many industrial production plants, 100 percent control of the manufactured goods is a mandatory requirement in the area of quality assurance. In order to be able to guarantee this even at high production rates, specially adapted customer-specific measuring systems are necessary. For Johnson Matthey Catalysts GmbH, a fully automatic measuring cell for the optical inspection of cylindrical honeycomb catalysts was developed. Due to their special manufacturing process, ceramic fully active catalysts are more effective than conventional catalysts but are subject to greater geometric fluctuations. They are used for exhaust gas purification in passenger cars, trucks, ships, and power plants. As a result of the large number of different application scenarios, there is a large range of types with diameters from 140 mm to 330 mm and lengths from 100 mm to 300 mm. The entire range of types must be tested in large quantities in a three-shift operation. On one hand, the system must guarantee high reliability, and, on the other, it must react flexibly to increasing on-demand production with changeover times of just a few minutes. The two-stage inspection process begins with the all-round measurement of the shell surface. The catalytic converters are lifted out of the conveyor section by a specially designed mechanical system and rotated around the cylinder axis. Parallel to the 3D measurement, the outer surface is examined with a high-resolution camera for cracks from 100 µm width. The specially designed reconstruction and

1 *Anlage zur In-line 3D-Vermessung.* | *Machine for in-line 3D measurement.*

2 *Mechanischer Aufbau des Inneren der Messzelle.* | *Mechanical construction of the measuring cell.*

Rekonstruktions- und Kalibrieralgorithmen erlauben die Berechnung einer Vielzahl von geometrischen Maßen wie verschiedenen Durchmessern, der Zylindrizität, Winkligkeit oder Tonnenform. Durch die vollflächige Vermessung können gleichzeitig auch lokale Verformungen, Defekte und Ausbrüche detektiert und interpretiert werden. Mit zwei 28 MPixel Kameras werden in der zweiten Inspektionsstufe die bis zu 50.000 Einzelkanäle auf Stegbrüche, Zellverschlüsse und Risse untersucht. Die Ergebnisse der 2D-Bildauswertung werden durch eine komplexe Klassifizierung in verschiedene Rissgruppen und Defektcluster unterschieden. Die Messzelle wurde in die Endbearbeitungslinie der Produktion integriert und zeichnet sich durch ein optimiertes Handling für eine hohe Taktrate aus. Die gewonnenen Messdaten werden an das Hauptsystem und das Manufacturing Execution System des Kunden zurückgemeldet und liefern die Basis zur Klassifizierung der Prüflinge für den anschließenden Sortierroboter. Die Messzelle und die angekoppelte Auswerteeinheit kommunizieren über industriell standardisierte Kommunikationsprotokolle der Automatisierungstechnik untereinander, aber auch mit der übergeordneten Endlinie. Die kundenspezifische vollautomatische Inspektionsanlage steht stellvertretend für den durch das Fraunhofer IOF koordinierten Prozess einer industrietauglichen Neuentwicklung ausgehend von einer Machbarkeitsstudie, über die Abstimmung der Schnittstellen, den Aufbau, die Inbetriebnahme bis hin zur finalen Systemoptimierung.

calibration algorithm allows the calculation of a multitude of geometric dimensions such as different diameters, cylindricity, angularity, or barrel shape. The full-surface measurement also allows local deformations, defects, and break-outs to be detected and interpreted simultaneously. In the second inspection stage, up to 50,000 individual channels are inspected for web breaks, cell closure, and cracks using two 28 MPixel cameras. The results of the 2D image evaluation are differentiated by a complex classification into different crack groups and defect clusters. The measuring cell was integrated into the production finishing line and is characterized by optimized handling for the highest possible cycle rate. The measured data obtained is fed back to the customer's main system and the Manufacturing Execution System and provides the basis for classifying the test specimens for the subsequent sorting robot. The measuring cell and the coupled evaluation unit communicate with each other and with the higher-level end line via industrially standardized communication protocols of the automation technology. The customer-specific, fully automatic inspection system represents the process coordinated by Fraunhofer IOF for a new development suitable for industrial use, starting with a feasibility study, through the coordination of the interfaces, assembly, commissioning, and up to the final system optimization.



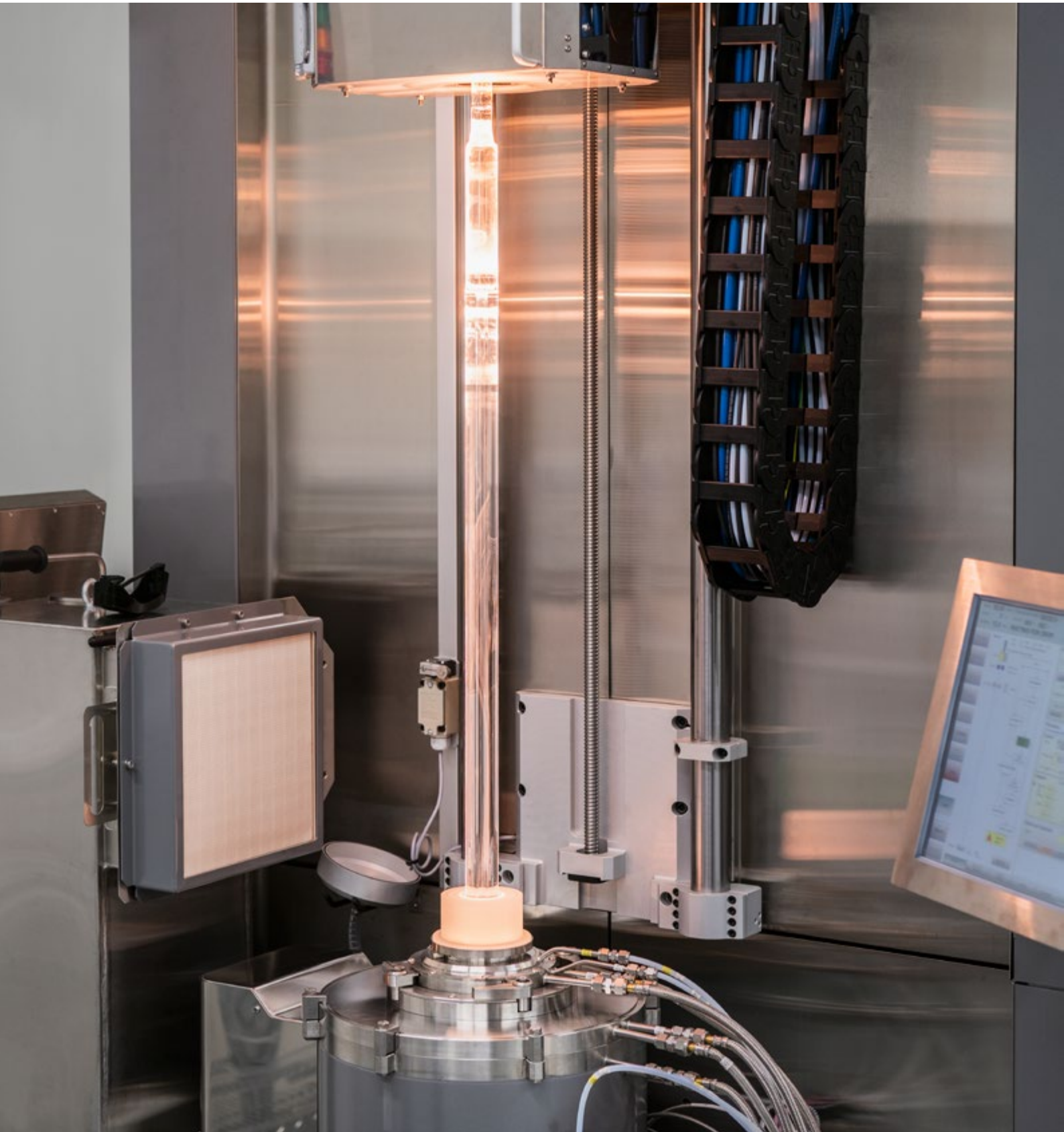
AUTHORS

Peter Lutzke
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

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

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



LASERTECHNIK

LASER TECHNOLOGY

Das Fraunhofer IOF beherrscht die Entwicklung neuester Festkörperlasersysteme. Schwerpunkt ist die Entwicklung von beugungsbegrenzten Faserlasersystemen mit Ausgangsleistungen im Multi-Kilowatt-Bereich (cw/pulse). Im Fasertechnologiezentrum am Fraunhofer IOF sind hierzu alle Kompetenzen gebündelt: von der Preformherstellung über das Faserziehen von aktiven und passiven Spezialfasern, die notwendige Aufbau- und Verbindungstechnik bis hin zur Systemintegration und -realisierung.

Die Erschließung neuer Wellenlängenbereiche unter Anwendung von Methoden der nichtlinearen Optik, die Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse bis zu Attosekunden-Pulsdauern sowie die Führung und Formung von Laserstrahlung höchster Leistung und Intensität sind weitere Themen. Zudem werden Prozesse und Prozesstechnologien der Laser-Mikro-Materialbearbeitung erforscht und entwickelt.

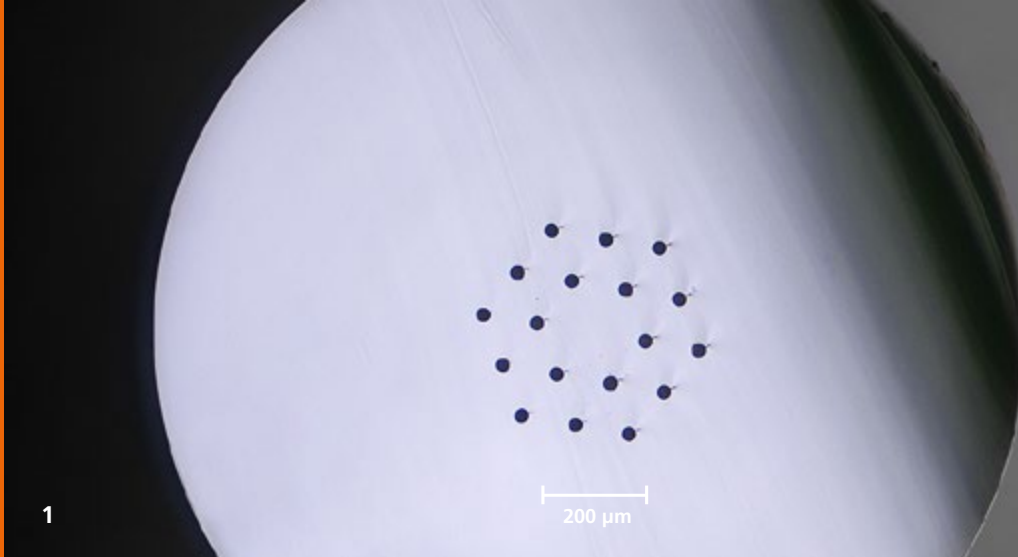
Das Fraunhofer IOF gehört in diesen Themenfeldern zu den forschungsstärksten Instituten mit globaler Sichtbarkeit und zahlreichen technologischen Alleinstellungsmerkmalen. In dem Geschäftsfeld Lasertechnik konnten in 2018 unter anderem die folgenden Themen erfolgreich bearbeitet werden: Spezialfasern, kohärent kombinierte Multikern-Faserlasersysteme sowie Laser-Nanostrukturierung in Silizium.

Fraunhofer IOF masters the development of the latest solid-state laser. The focus is on the development of diffraction-limited fiber laser systems with output powers in the multi-kilowatt range (cw/pulse). In the fiber technology center at Fraunhofer IOF, all competences are being combined: from preform production throughout fiber drawing of active and passive special fibers, necessary assembly and joining technologies to system integration and system realization.

The development of new wavelength ranges using methods of nonlinear optics, the generation of ultra-short light pulses up to attosecond pulse durations, as well as the guidance and shaping of laser radiation at the highest power and intensity, are further topics. In addition, processes and process technologies of laser micro-material processing are being explored and developed.

In these fields, Fraunhofer IOF is one of the most research-intensive institutes with global visibility and many technologically unique selling points. Amongst others, the following topics were successfully addressed in the laser technology business field in 2018: special optical fibers, coherently combined multi-core fiber laser system, as well as laser nanostructuring in silicon.

LEFT *Faserkompetenzzentrum - Neue Ziehanlage für Spezialfasern am Fraunhofer IOF. | Fiber competence center - New fiber-drawing plant at Fraunhofer IOF.*



OPTISCHE SPEZIALFASERN SPECIALITY OPTICAL FIBERS

Aus zahlreichen Bereichen der modernen Gesellschaft, wie Telekommunikation, industrieller Fertigungstechnik und Medizintechnik, sind Glasfasern als Hilfs- und Arbeitsmittel nicht mehr wegzudenken. Durch ihren Einsatz wurden bereits einige Anwendungsfelder revolutioniert, wie beispielsweise die Datenübertragung, die Bildgebung in endoskopischen Systemen und die Lasermaterialbearbeitung. Am Fraunhofer IOF wird bereits seit 2012 eine Prozesskette zur Herstellung von Spezialfasern aufgebaut. Dieses Jahr konnte diese Prozesskette mit der Fertigstellung des Faserkompetenzzentrums insbesondere durch die Inbetriebnahme des Faserziehturms komplettiert werden. Damit ist jetzt die Herstellung von laser-aktiv dotiertem Material, die Preformtechnologie und die Faserziehtechnologie am Fraunhofer IOF etabliert, sodass in-house Spezialfasern hergestellt werden können. Mit dem 16 m hohen Faserziehturm für Spezialfasern, bestehend aus zwei komplementären Ziehlinien, erweitern sich die zur Verfügung stehenden Optionen um präzise Druckkontrolle, Aufbringen optischer und mechanischer funktionaler Schichten sowie die Extrusion von Thermoplasten um die erzeugten Fasern.

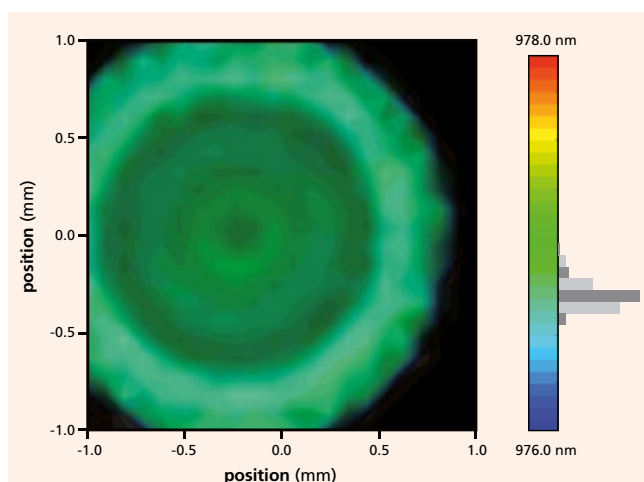
Ausgehend von grundlagenorientierten Untersuchungen im Bereich der Glaschemie zur Brechzahlanpassung von dotiertem Quarzglas /1/ konnten Stufenindexfasern mit präziser Kontrolle der Brechzahlverteilung /2/ realisiert werden. Das Verständnis zur weiteren Leistungsskalierung von Faserlasern zu Ausgangsleistungen über 5 kW konnte durch neuartige Faser-Bragg-Gitter, die durch den polymer-basierten Fasermantel geschrieben werden, erweitert werden /3/. Für die Verstärkung am unteren Rande des Verstärkungsspektrums von Yb wurde

In many areas of modern society, such as telecommunications, industrial manufacturing technology, and medical technology, it is hard to imagine life without glass fibers and their enabling technologies. Their use has already revolutionized several fields of application, such as data transmission in telecommunication, imaging in endoscopic systems, and laser material processing. Fraunhofer IOF has been developing a process chain for the production of speciality fibers since 2012. This year, this process chain was finalized with the completion of the fiber competence center, in particular with the commissioning of the fiber drawing tower. This means that the fabrication of laser-doped materials, preform technology, and fiber drawing technology is now established, thus speciality fibers can be made in-house. With the 16 m high fiber drawing tower for speciality fibers, consisting of two complementary drawing lines, the available options are extended by precise pressure control, the application of optical and mechanical functional layers, and the extrusion of thermoplastics with the produced fibers.

Based on basic research in the field of glass chemistry for the refractive index adjustment of doped quartz glass /1/, step-index fibers with precise control of the refractive index distribution /2/ could be realized. The understanding of further scaling of fiber lasers to output powers above 5 kW could be extended by novel fiber Bragg gratings written through the polymer-based fiber cladding /3/. For short wavelengths, a special fiber was developed that has a higher laser-active doped ring around the central, also actively doped fiber core, with the refractive index of the

1 *Mikroskop-Aufnahme einer mikrostrukturierten Faser. | Microscope image of a microstructured fiber.*

eine Spezialfaser entwickelt, die einen höherdotierten laseraktiven Ring um den zentralen, ebenfalls aktiv dotierten Faserkern besitzt, wobei der Brechungsindex des Rings an den des umliegenden Materials angepasst ist (Abb. 2). Neben der Leistungskalierung von Einkernfasern wird auch die Technologie zur Herstellung von Multikernfasern aufgebaut. Die in diesem Jahr neu in Betrieb genommene Infrastruktur eröffnet zudem die Möglichkeit zur Herstellung mikrostrukturierter Fasern. Gegenstand aktueller Untersuchungen sind Large-Pitch Fasern (Abb. 1), die für die Leistungskalierung von Ultrakurzpuls-Lasersystemen essentiell sind. Diese Spezialfasern erfordern eine Brechzahlgenauigkeit und -homogenität im Bereich deutlich unter 10^{-4} . Um diese hohen Anforderungen realisieren zu können und ein auf Wellenlängenskala homogenes Material zu erzeugen, ist am Fraunhofer IOF ein Nanostrukturierungsprozess des aktiv dotierten Materials etabliert worden. Zukünftig wird die Bandbreite der Spezialfasern erweitert werden, z. B. um Hohlkernfasern für Anwendungen in der Sensorik, dem Leistungstransport sowie das Zukunftsfeld Quantentechnologien zu adressieren.



2 Mikro-Fluoreszenzspektroskopie-Aufnahme einer ringdotierten Spezialfaser. | Micro-spectroscopic image of a ring doped speciality fiber.

ring adapted to that of the surrounding material (Fig. 2). In addition to the performance scaling of single core fibers, the technology for the production of multicore fibers is also being developed. The new infrastructure put into operation this year also opens the possibility of producing microstructured fibers. Current investigations focus on large-pitch fibers (Fig. 1), which are essential for the power scaling of ultra-short pulsed laser systems. These special fibers require a refractive index accuracy and homogeneity in the range of significantly less than 10^{-4} . In order to realize these high requirements and produce a homogeneous material on a wavelength scale, a nanostructuring process of the actively doped material has been established at Fraunhofer IOF. In the future, the range of speciality fibers will be expanded, e.g. to address hollow core fibers for applications in sensor technology, power transport, and the future field of quantum technologies.

We acknowledge the following funding: BMBF (13N13652, 03WKCV02D); State of Thuringia 2015-0020; State of Thuringia supported by EU programs EFRE and ESF (2015FOR0015, 2015FOR0017, 13030-715, 2011FGR0104, 2015FGR0107, 2015FGR0108, B715-11011, B715-11005).

References / Literatur

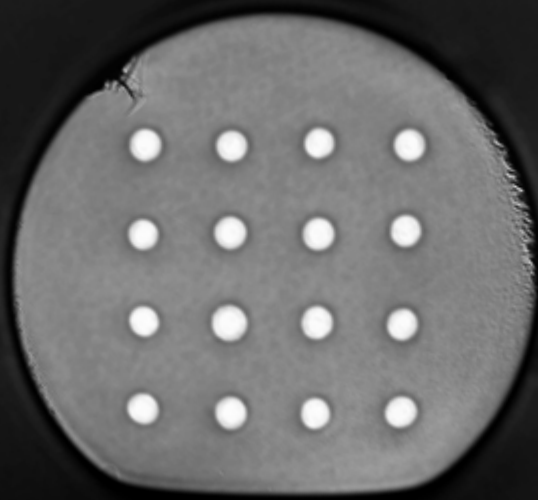
- /1/ S. Kuhn et al.: Opt. Mater. Express 8, 1328-1340 (2018).
- /2/ F. Beier et al.: Opt. Lett. 43, 1291-1294 (2018).
- /3/ F. Möller et al.: Laser Congress 2018 (ASSL, LAC), AM2A.3.

AUTHORS

Johannes Nold
Thomas Schreiber
Nicoletta Haarlamert

CONTACT

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



KOHÄRENT KOMBINIERTE LASERSYSTEME BASIEREND AUF MULTIKERNFASERN COHERENTLY COMBINED MULTICORE FIBER LASER SYSTEMS

Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Ultrakurzpulsfasern ermöglicht es, immer neue Anwendungen im Bereich von Industrie und Forschung zu erschließen. Durch die kohärente Kombination von mehreren Laserverstärkern konnten in den letzten Jahren vorhandene physikalische Limitierungen überwunden und die bisher leistungsstärksten Ultrakurzpulsfasersysteme realisiert werden. Allerdings geht mit der Parallelisierung der Verstärkerarchitektur auch eine Erhöhung der Komplexität und Kosten entsprechender Systeme einher, die wiederum eine effektive Grenze der maximalen Leistungsfähigkeit setzt.

Um diese Verknüpfung zu durchbrechen, ist eine neue, integrierte Verstärkerarchitektur erforderlich ^{/1/}. Diese basiert auf Multikernfasern, in welcher viele Verstärkungschanäle in einem einzelnen Element vereinigt werden. Damit ist auch die Verwendung einer einzelnen Laserdiode zur Erzeugung der optischen Besetzungsinversion möglich. Die Strahlauftteilung und Strahlkombination sowie die Phasenstabilisierung werden aus kompakten und vorzugsweise monolithischen Bauteilen gebildet. Zusätzlich wird ein neuartiger Phasenstabilisierungsalgorithmus ^{/2/} verwendet, welcher Phasenabweichungen zwischen den einzelnen Strahlen auch bei einer entsprechend hohen Kanalzahl bestimmen und minimieren kann. Die Anzahl der diskreten Komponenten ist damit grundsätzlich unabhängig von der Anzahl der parallelen Verstärkungschanäle und

Continuous performance improvements of femtosecond fiber laser systems have allowed new applications in industry and science to open up. Through the coherent combination of multiple laser amplifiers, physical performance limitations could be overcome and the most powerful femtosecond fiber laser systems to date could be realized. However, parallelization of the amplifier architecture leads to an increase in complexity and cost, which again sets an effective boundary for the maximum performance.

To decouple performance and complexity, a new integrated amplifier architecture is required ^{/1/}. It is based on multicore fibers, which contain multiple channels in a single element. This setup also allows a single laser diode to be used to generate optical inversion. The beam-splitting and -combination as well as the phase stabilization are realized with compact and preferably monolithic components. In addition, a novel phase stabilization algorithm ^{/2/} is used, which can determine and minimize phase deviations between the beams even at high channel counts. Hence, the number of discrete components is basically independent of the number of parallel amplifier channels and opens up a high scaling potential.

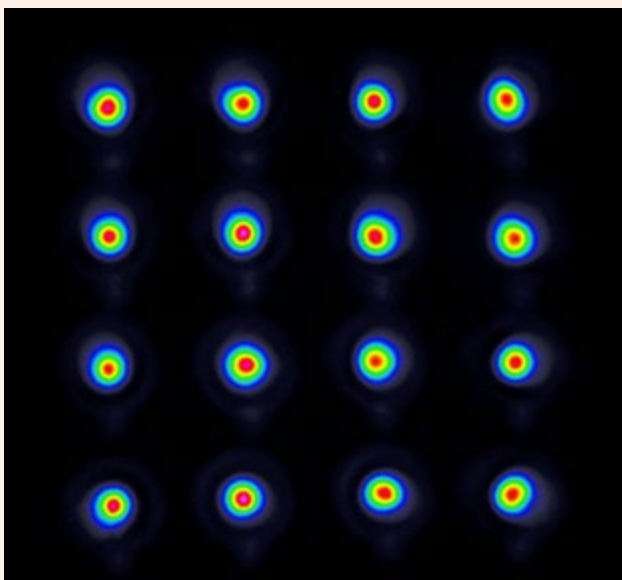
A first prototype based on this laser architecture was realized using an in-house designed step-index fiber with 4x4

¹ *Multikernfaser mit 16 Stufenindexkernen für die Verstärkung.* |
Multicore fiber with 16 step-index cores for amplification.

eröffnet damit ein hohes Skalierungspotenzial.

Es wurde ein erster Prototyp eines solchen Laserverstärkers basierend auf einer selbst designten Stufenindexfaser mit 4x4 Verstärkerkanälen in rechteckiger Anordnung realisiert, welche mit einem neuartigen und kosteneffizienten Produktionsprozess hergestellt wurde. Die Kombination von Picosekunden- sowie von zeitlich gestreckten Femtosekundenpulsen konnte mit einer Kombinationseffizienz von jeweils 80 % erfolgreich realisiert werden und bestätigt damit die Umsetzbarkeit dieser Technologie.

Durch Weiterentwicklung dieser Technologie wird sich die Möglichkeit bieten, mit Faserlasertechnologie auch in den Bereich der Hochenergielasersysteme vorzustoßen, ohne die spezifischen Vorteile der optischen Fasern aufzugeben.



2 Ausgangsstrahlung aus der Faser nach dem Verstärkungsprozess. | Output emitted by the fiber after the amplification process.

cores in rectangular orientation. A novel and cost-effective production process was employed. A combination of picosecond and stretched femtosecond pulses was achieved with a combination efficiency of 80 %, demonstrating the viability of this concept.

Further development of this technology will offer the possibility to move fiber laser technology to the high pulse energy regime without sacrificing the intrinsic advantages of optical fibers.

References / Literatur

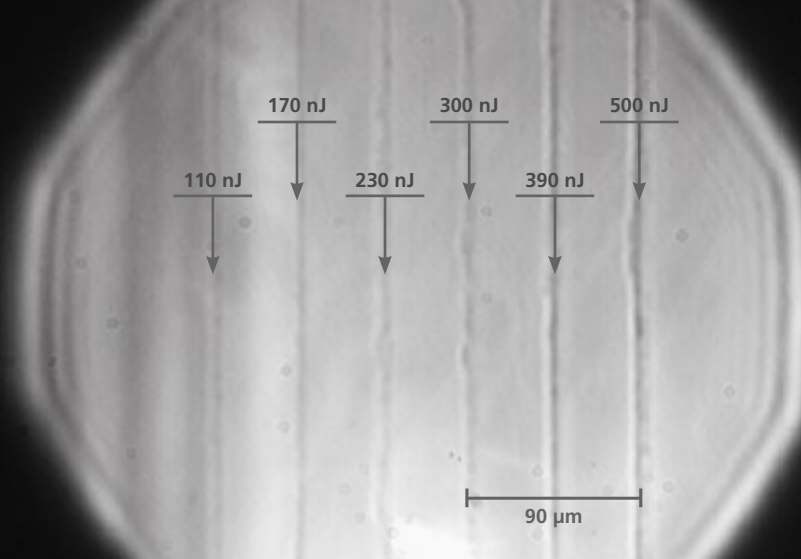
- /1/ A. Klenke, M. Müller, H. Stark, F. Stutzki, C. Hupel, T. Schreiber, A. Tünnermann, J. Limpert: Coherently combined 16-channel multicore fiber laser system, *Opt. Lett.* 43, (2018).
- /2/ A. Klenke, M. Müller, H. Stark, A. Tünnermann, J. Limpert: Sequential phase locking scheme for a filled aperture intensity coherent combination of beam arrays, *Opt. Express* 26, (2018).

AUTHORS

Arno Klenke
Andreas Tünnermann
Jens Limpert

CONTACT

Prof. Dr. Jens Limpert
Phone +49 3641 9-47811
jens.limpert@uni-jena.de



VOLUMENSTRUKTURIERUNG VON SILIZIUM FÜR OPTISCHE ANWENDUNGEN LASER-WRITTEN INTEGRATED OPTICS DEEP INSIDE SILICON

Die Integration von Photonik und Mikroelektronik auf einem Chip ist eines der wichtigsten Ziele der heutigen Kommunikationsindustrie. Die größten Vorteile liegen in der deutlich erhöhten Verarbeitungsgeschwindigkeit und Bandbreite. Bei der Realisierung erhöhter Packungsdichten stellen 3D integrierte optische Strukturen eine Grundvoraussetzung des zukünftigen Chipdesigns dar.

Für die Realisierung komplexer optischer Elemente in Silizium ist die Ultrakurzpulsbearbeitung einer der vielversprechendsten Ansätze. In der Glasbearbeitung ist das direkte Laserschreiben eine etablierte Methode zur Herstellung einer Vielzahl unterschiedlicher optischer Elemente wie Wellenleiter, Bragg-Gitter oder Phasenplatten. Bei Silizium hat sich allerdings in den letzten zwei Jahrzehnten herausgestellt, dass eine direkte Übertragung dieser Technik durch den hohen Brechungsindex (3,5) und die verstärkt nichtlinearen Wechselwirkungen nicht möglich ist.

2018 konnte am Leistungszentrum Photonik die In-Volumenmodifikation von einkristallinem Silizium ohne Beschädigung der Oberflächen durch Verwendung von ps Laserpulsen bei 1552 nm Wellenlänge demonstriert werden. Im Gegensatz zur Bearbeitung von Glas ist hier die Verwendung von Mehrfachpulsen bei Pulsenergien weniger Nanojoule der Schlüssel. Dies erlaubte erstmals die Erzeugung stark lokalisierter Modifikationen in einkristallinem Silizium /1/.

The combination of photonics and microelectronics on a single chip is one of the prime goals in the communication industry today. The most important advantages lie in increased processing speed and bandwidth provided by light. In order to realize integrated optical pathways at high density, 3D stacked waveguides embedded within the volume of silicon are the key element for future chip design.

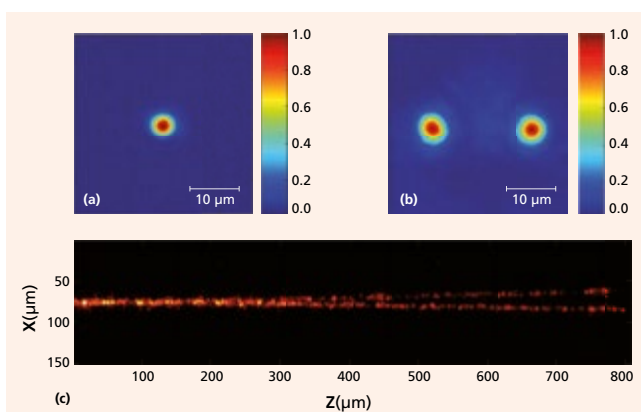
The fabrication of complex optical elements inside silicon with ultrashort pulse processing is one of the most promising approaches. Nowadays, direct laser writing inside glasses and other dielectrics is a reliable method for producing different optical elements such as waveguides, Bragg gratings, or phase plates. However, different studies within the last two decades have shown that for silicon, the high refractive index (3.5) and the pronounced nonlinear interaction with intense laser pulses prevented a simple transfer of the direct laser writing technique.

In 2018, it was possible to demonstrate in-volume processing of single crystalline silicon without damaging the sample surfaces by using ps laser pulses at a wavelength of 1552 nm. In contrast to the processing of glasses, intense multi-pulse machining at a pulse energy of only a few nanojoules was the key here. As a consequence, this approach allowed to generate highly confined modifications deep inside single crystalline silicon for the first time /1/.

1 *Induzierte Modifikationen bei verschiedenen Pulsenergien.* |
Induced modifications written with different pulse energies.

Durch Verwendung angepasster Schreibparameter konnten Wellenleiterstrukturen mit 800 fs Pulsen bei Repetitionsraten im Bereich von 30 bis 400 kHz eingeschrieben werden (Abb. 1, /2/). Die zugehörigen Nahfeldmessungen zeigten stark lokalisierte grundmodige Wellenleiter. Abhängig von der Pulsenergie konnten Modenfelddurchmesser von 3 bis 5 μm beobachtet werden, sowie Verluste von 5 dB/mm. Zur Verdeutlichung des 3D-Potenzials wurde ein vergrabener Y-Splitter mit den gleichen Parametern hergestellt, welcher eine Teilrate von genau 50:50 aufwies (Abb. 2). Berechnungen der dauerhaft induzierten Brechzahländerung liefern einen Bereich von 10^{-4} bis 10^{-3} . Die Ursache für diese Brechzahländerung könnte die Umwandlung von einkristallinem Silizium in die polykristalline Phase oder dauerhaft induzierte Spannungsfelder sein. Hierzu werden in Zukunft detaillierte Materialanalysen durchgeführt.

By using adapted writing parameters, extended waveguiding structures were directly inscribed by using 800 fs pulses at repetition rates in the range of 30 to 400 kHz (Fig. 1, /2/). The corresponding near field measurements revealed highly localized single mode waveguiding. Depending on the applied pulse energy, mode field diameters ranging from 3 to 5 μm were exhibited, and the associated losses were around 5 dB/mm. In order to demonstrate the 3D writing capabilities, a buried Y-splitter was fabricated using similar processing conditions, with an exact splitting ratio of 50:50 (Fig. 2). Calculations of the permanently induced refractive index change range from 10^{-4} to 10^{-3} . Material analysis will enable us to explain this positive refractive index change in the near future. A transition from single crystalline silicon to polycrystalline phases as well as permanently induced strain fields could be responsible for the measured characteristics.



2 AY-Splitter: Normierte Nahfeldaufnahme am Ein- (a) und Ausgang (b). (c) Streulicht entlang Y-Splitter (logarithmische Intensität). | *Characterization of Y-splitter: Normalized near-field distribution at entrance (a) and outlet (b). (c) Scattered light distribution along Y-splitter (logarithmic intensity).*

References / Literatur

- /1/ H. Kämmer et al.: In-volume structuring of silicon using picosecond laser pulses, *Applied Physics A* 124(4), 302 (2018).
/2/ G. Matthäus et al.: Inscription of silicon waveguides using picosecond pulses, *Optics Express* 26(18), 24089–24097 (2018).

AUTHORS

Helena Kämmer
Gabor Matthäus
Maxime Chambonneau
Stefan Nolte

CONTACT

Prof. Dr. Stefan Nolte
Phone +49 3641 9-47820
stefan.nolte@uni-jena.de



FRAUNHOFER IOF – PHOTONIK WEITERDENKEN

FRAUNHOFER IOF – BOOSTING PHOTONICS

Die Forschung und Anwendung von Licht – die Photonik – ist eine der Schlüsseltechnologien für die nächsten Jahrzehnte. Mit ihr wird man die Suche nach Lösungen für viele Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft entscheidend voranbringen können. Die Photonik wird der Medizin neue Einblicke und Therapiemöglichkeiten eröffnen, die Interaktion von Menschen und Maschinen intuitiv und sicher gestalten und die Entwicklung von Systemen ermöglichen, die es uns erlauben, mehr über die Umwelt und das Universum zu erfahren.

Um die Forschung auf diesem Weg zu unterstützen, engagiert sich das Fraunhofer IOF mit einer Reihe von strategischen Projekten, Zentren, Initiativen und Graduiertenschulen. Sie alle verfolgen das Ziel, Rahmenbedingungen zu schaffen, die es der grundlegenden und anwendungsorientierten Forschung ermöglichen, gemeinsame Vorhaben und Ideen schneller und effizienter in Anwendungen zu überführen. Auch die Förderung und Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses zu herausragenden Persönlichkeiten ihres

The research and application of light – the photonics – is one of the key technologies for the next decades. Photonics will decisively advance the search for solutions to many current and future challenges. By providing new technical opportunities, photonics will provide medicine with new insights and therapies, make human and machine interaction intuitive and secure, and enable the development of systems that allow us to learn more about the environment and the universe.

In order to support and develop research along this path, the Fraunhofer IOF is involved in a series of strategic projects, graduate schools, research centers, and initiatives. They all create new conditions that allow fundamental and application-oriented research to work more closely together and transfer joint projects and ideas into applications faster and more efficiently. The promotion and training of young scientists is another very important focus of these projects. On the following pages, the projects and their development status are presented in detail.



Arbeitsgebiets ist ein weiterer, ganz wesentlicher Schwerpunkt der Projektarbeit des Fraunhofer IOF. Die Projekte und ihr Entwicklungsstand werden auf den folgenden Seiten im Einzelnen präsentiert.

INHALT

- Seite 78: **Advanced Photon Sources**
- Seite 80: **QUILT – Quantum Imaging Solutions**
- Seite 82: **Wissenschaftspreis für Freiformoptiken**
- Seite 84: **fo⁺ – Freeform Optics Plus**
- Seite 86: **TOF – Maßgeschneiderte optische Fasern**
- Seite 88: **Go beyond 4.0**
- Seite 90: **Max Planck School of Photonics**
- Seite 92: **Die Allianz 3Dsensation**
- Seite 94: **Leistungszentrum Photonik**
- Seite 96: **Photonics Days 2018**
- Seite 98: **Das Institut in Zahlen**
- Seite 100: **Fraunhofer-Verbund Light & Surface**
- Seite 104: **Fraunhofer-Gesellschaft**
- Seite 106: **Namen, Daten und Ereignisse**

CONTENT

- Page 78: **Advanced Photon Sources**
- Page 80: **QUILT – Quantum Imaging Solutions**
- Page 82: **Research Award for Freeform Optics**
- Page 84: **fo⁺ – Freeform Optics Plus**
- Page 86: **TOF – tailored optical fibers**
- Page 88: **Go beyond 4.0**
- Page 90: **Max Planck School of Photonics**
- Page 92: **The alliance 3Dsensation**
- Page 94: **Center of Excellence in Photonics**
- Page 96: **Photonics Days 2018**
- Page 98: **The institute in figures**
- Page 100: **Fraunhofer Group Light & Surfaces**
- Page 104: **The Fraunhofer-Gesellschaft**
- Page 106: **Names, data, activities**

TOP *Photonik-Standort Jena – Blick auf den Beutenberg Campus und das Fraunhofer IOF. | Photonik melting pot Jena – View of the Beutenberg Campus and the Fraunhofer IOF.*



ADVANCED PHOTON SOURCES CLUSTER OF EXCELLENCE

Mit dem Fraunhofer Cluster of Excellence »ADVANCED PHOTON SOURCES« startete die Fraunhofer-Gesellschaft am 2. Mai 2018 in Aachen ein hochambitioniertes Vorhaben. Das Ziel, das unter der Federführung der Fraunhofer-Institute IOF und ILT stehenden Projektes, ist die internationale Technologieführerschaft bei Lasersystemen, die mit ultrakurzen Pulsen (UKP) höchste Leistungen erreichen. Gemeinsam mit zahlreichen Verbundpartnern werden Einsatzpotenziale erforscht: »Wir treten mit zwölf Instituten an, um eine neue Lasergeneration für Industrie und Forschung zu entwickeln. Geplant ist eine disruptive Technik, auf deren Basis die Anwendungsbereiche für Lasertechnik deutlich erweitert werden – von der Skalierung ultrapräziser Fertigungsverfahren bis zur Erschließung neuer Pulsdauer- und Wellenlängenbereiche für die Forschung«, so Prof. Reinhart Poprawe, Leiter des Clusters und Direktor des Fraunhofer ILT.

Dafür haben sich die »ADVANCED PHOTON SOURCES«-Partner zum Ziel gesetzt, die mittlere Leistung der UKP-Quellen an den Fraunhofer-Instituten ILT und IOF bis in den 10 kW-Bereich zu erhöhen. Mit einem Budget von 10 Millionen Euro für die ersten drei Jahre sollen Strahlquellen für Anwendungen in den Bereichen Produktion, Bildgebung und neuartige Materialien entwickelt und erprobt werden. Im Bereich der Wissenschaft werden die Strahlquellen beitragen, Fragestellungen in der Grundlagenforschung zu beantworten.

Das Fraunhofer Cluster steht allen Fraunhofer-Instituten offen – derzeit sind zwölf Institute an diesem Vorhaben beteiligt. Die Applikationsentwicklung zusammen mit den Fraunhofer-Instituten FEP, IAF, IIS, IKTS, IMWS, ISE, ISIT, ITWM, IWM und IWS zielt darauf ab, neue Prozesse zu untersuchen. Weiterhin soll der Cluster ermöglichen, bereits bekannte Methoden und Prozesse auf Demonstratorebene zu industriell relevanten Verfahren zu bringen. Beispiele reichen von der Mikrostrukturierung und Oberflächenfunktionalisierung von Solarzellen, ultraharten Keramiken und Batteriekomponenten bis hin zum Schneiden von Gläsern und Leichtbau-Materialien oder der 3D-Bildgebung durch tomographische Methoden.

On May 2nd 2018 in Aachen, the Fraunhofer-Gesellschaft launched a highly ambitious undertaking: the Fraunhofer Cluster of Excellence "ADVANCED PHOTON SOURCES". The cluster, which is led by the Fraunhofer Institutes ILT and IOF, aims to achieve international technological leadership in laser systems that reach maximum performance with ultrashort pulses (USP), as well as to research their potential applications – all in cooperation with Fraunhofer partners. "With twelve institutes, we are stepping up to the challenge of developing a new laser generation and demonstrating applications for industry and research. Together we target the development of a disruptive technology that will help expand the applications for laser technology significantly – from the scaling of ultraprecise manufacturing processes to the development of new pulse duration and wavelength ranges for research", said Prof. Reinhart Poprawe, the director of the cluster and the Fraunhofer ILT.

To achieve this, the partners of the cluster have set themselves the goal of increasing the average power of the USP sources at the Fraunhofer Institutes ILT and IOF up to the 10 kW range. With a budget of about 10 million euros for the first three years, the partners will develop and test beam sources for applications in the fields of production, imaging or novel materials. Furthermore, the beam sources will help to answer basic research questions.

The Fraunhofer Cluster is open to all Fraunhofer Institutes. Currently, twelve partners form the consortium: beside Fraunhofer ILT and IOF, the Fraunhofer Institutes FEP, IAF, IIS, IKTS, IMWS, ISE, ISIT, ITWM, IWM, and IWS. The consortium aims to develop applications, investigate new processes, and facilitate industrially relevant throughputs of well-known methods and processes on a demonstrator scale. Examples range from microstructuring and surface functionalization of solar cells, ultra-hard ceramics, and battery components to the cutting of glass and lightweight materials or 3D imaging with tomographic methods.

LEFT *Kohärent kombinierter UKP-Faserlaser der kW-Klasse. |*
Coherently combined USP fiber lasers of the kW class.



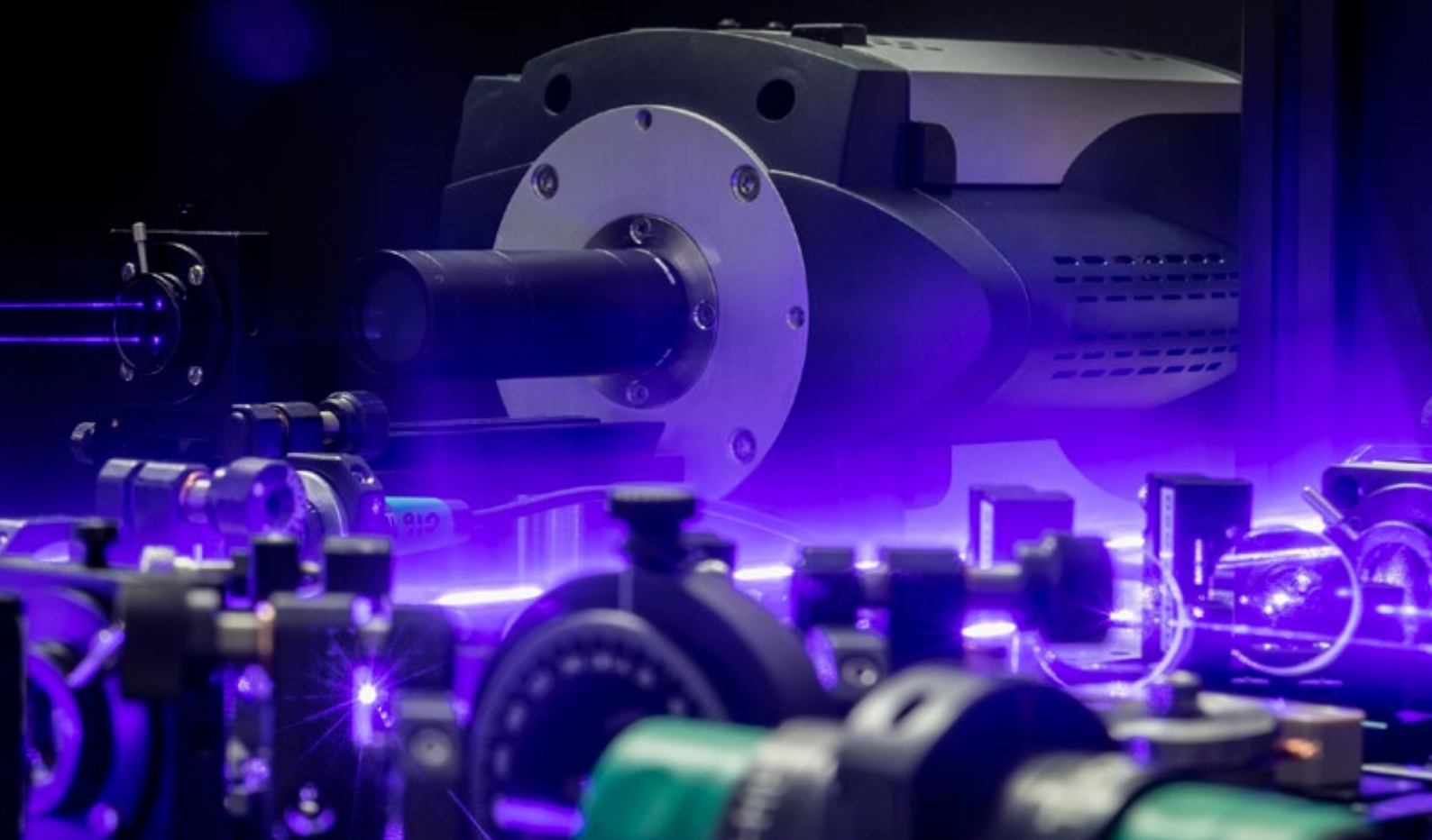
QUILT – QUANTUM METHODS FOR ADVANCED IMAGING SOLUTIONS

Das Fraunhofer-Leitprojekt »Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions« (QUILT) hat sich zum Ziel gesetzt, bahnbrechende Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Quantentechnologie in innovative Komponenten und Systeme sowie lösungsorientierte Funktionsdemonstratoren umzusetzen. Dabei fokussiert sich QUILT insbesondere auf das Themengebiet des Quantum-Imagings, bei dem nichtklassische Zustände von Licht genutzt werden können, um neue Abbildungsmodalitäten umzusetzen und neue Spektralbereiche zu erschließen. Möglich werden diese Entwicklungen durch die Bündelung des Know-hows der Fraunhofer-Institute IOF, IPM, IMS, IOSB, ILT und ITWM sowie der Expertise führender quantentechnologischer Einrichtungen, wie dem österreichischen Institut für Quantenoptik und Quanteninformation in Wien und dem Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen.

Nicht zuletzt durch die Etablierung einer dedizierten Herbstschule konnte sich das QUILT Konsortium als Dreh- und Angelpunkt einer nunmehr eigenständigen Quantenimaging-Community etablieren. Die Veranstaltung war die

The aim of the Fraunhofer Lighthouse project “Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions” (QUILT) is to transfer groundbreaking fundamental research in the field of optical quantum technologies to innovative components and systems as well as application-oriented demonstrators. In this endeavor, QUILT focuses especially on the topic of quantum imaging, in which non-classical states of light are used to realize new imaging modalities and to access new spectral ranges. These developments are enabled by the synergetic collaboration of the Fraunhofer Institutes IOF, IPM, IMS, IOSB, ILT, and ITWM along with leading science experts in quantum-science research institutions such as the Austrian Institute for Quantum Optics and Quantum Information and the Max Planck Institute for the Science of Light.

Not least thanks to hosting a specialized autumn school, the QUILT consortium managed to establish itself as the central hub for what is now an engaging and active quantum imaging community. The event was the first of its kind, being exclusively dedicated to quantum imaging, and was set up with the precise goal of bringing together the



europaweit erste exklusive Quanten-Imaging-Konferenz und hatte den Anspruch, die besten Grundlagenforscher zusammenzubringen, um grundlegende wissenschaftliche Fragen konzentriert anzugehen und gemeinsam zu lösen.

Auch am Fraunhofer IOF konnte in diesem Jahr im Rahmen des QUILT Projekts ein erstes »Quanten-Bild« mit einem kompakten Aufbau erreicht werden (imaging with undetected photons), in dem die mit dem Objekt interagierenden Photonen niemals detektiert wurden. In Zukunft soll dieser Aufbau als UV-Mikroskop mit VIS-Detektion verschränkte Photonen nutzbar machen.

best basic research experts in the field to jointly discuss and resolve pressing research questions.

Significant progress within the project could also be made at Fraunhofer IOF: A first "quantum-image", using undetected photons for the object-interaction, could be obtained in a setup which will ultimately realize a UV-microscope benefitting from the efficient detection of the pair-wise corresponding VIS bi-photons.



TOP *Quantenbildgebung basierend auf verschränkten Photonenpaaren. | Quantum imaging based on entangled photon pairs.*



WISSENSCHAFTSPREIS FÜR FREIFORMOPTIKEN RESEARCH AWARD FOR FREEFORM OPTICS

Optische Freiformsysteme ermöglichen neuartige Anwendungen in der modernen Optik, wie in Bereichen Beleuchtung, Luftfahrt und biomedizinischen Sensorik: zum Beispiel als Infrarotoptik für Rettungskräfte, als Spezialoptik für Weltraumteleskope oder als Fahrerassistenzsysteme. Sie bieten wesentliche Vorteile, wie eine ausgezeichnete optische Performance bei extrem kompakter und leichter Bauweise.

Im Rahmen des Innovativen Regionalen Wachstumskernprojekts »fo+« unter der Leitung von Dr. Ramona Eberhardt wurden innovative optische Freiformsysteme realisiert. Das Projekt wurde von 2014 bis 2016 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Jeder der beteiligten zehn Partner, u. a. Jena-Optronik GmbH, JENOPTIK Optical Systems GmbH, asphericon GmbH und das Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena, brachte seine Expertise ein, so dass die vielfältigen Fähigkeiten des Teams letztlich die gesamte Prozesskette freiformoptischer Systeme abdecken.

Anhand von Demonstratoren zeigte das Team das Potenzial der Freiform. Eine Verwertung der Forschungsergebnisse erfolgte unmittelbar und mit bemerkenswertem Erfolg in Form des in enger Kooperation mit DLR und NASA entwickelten »Earth Sensing Imaging Spectrometer« (DESIS), welches im August 2018 auf der ISS montiert wurde. Über das Thüringer Photoniknetzwerk OptoNet e.V. werden nun zudem Workshops und Programme für Mitarbeitende interessierter Firmen angeboten. Das Team arbeitete an der internationalen ISO-Norm mit, welche Definitionen, Maße und Toleranzen verbindlich regelt.

Für die Weiterentwicklung der Technologieplattform und für den gesamtheitlichen Bildungsansatz wurde das »fo+«-Team im Rahmen der Fraunhofer-Jahrestagung 2018 in Berlin mit dem mit 50.000 Euro dotierten Wissenschaftspreis »Forschung im Verbund« 2018 des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft ausgezeichnet. Die Jury lobt unter anderem die wirtschaftlichen Auswirkungen sowie die Neuheit des wissenschaftlich-methodologischen Ansatzes, als auch den Wissensfortschritt.

Optical freeform systems enable novel applications in modern optics such as in areas of lighting, aerospace, and biomedical sensor technology, for example as infrared optics for rescue teams, as special optics for space telescopes, or as driver assistance systems. They offer significant advantages, such as excellent optical performance in an extremely compact and lightweight design.

The innovative regional growth core project *fo+*, under the direction of Dr. Ramona Eberhardt, realized innovative optical freeform systems. Each partner involved, namely Jena-Optronik GmbH, JENOPTIK Optical Systems GmbH, asphericon GmbH, and the Institute of Applied Physics of the Friedrich-Schiller-Universität Jena, contributed their expertise, so that the diverse capabilities of the team ultimately cover the entire process chain of freeform optical systems.

Demonstrators have proved the potential of the freeform successfully. Results of the research were immediately used with remarkable success in the form of the "Earth Sensing Imaging Spectrometer" (DESIS), developed in close cooperation with DLR and NASA, which was assembled on the ISS in August 2018. The Thuringian photonics network OptoNet e.V. now also offers workshops and programs for employees of interested companies. Furthermore, the team worked on the international ISO standard, which regulates definitions, dimensions, and tolerances. It has set standards in international comparison.

For the further development of freeform technology and the holistic approach to education, the *fo+*-team was honored with the € 50,000 science prize "Research in Collaborative" 2018 of the Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft in the framework of the Fraunhofer Annual Conference 2018 in Berlin. Among other things, the jury praised the economic impact as well as the novelty of the scientific-methodological approach.

LEFT Dr. Ramona Eberhardt (dritte von links) und ihre Projektpartner. |
Dr. Ramona Eberhardt (third from left) and her project partners.



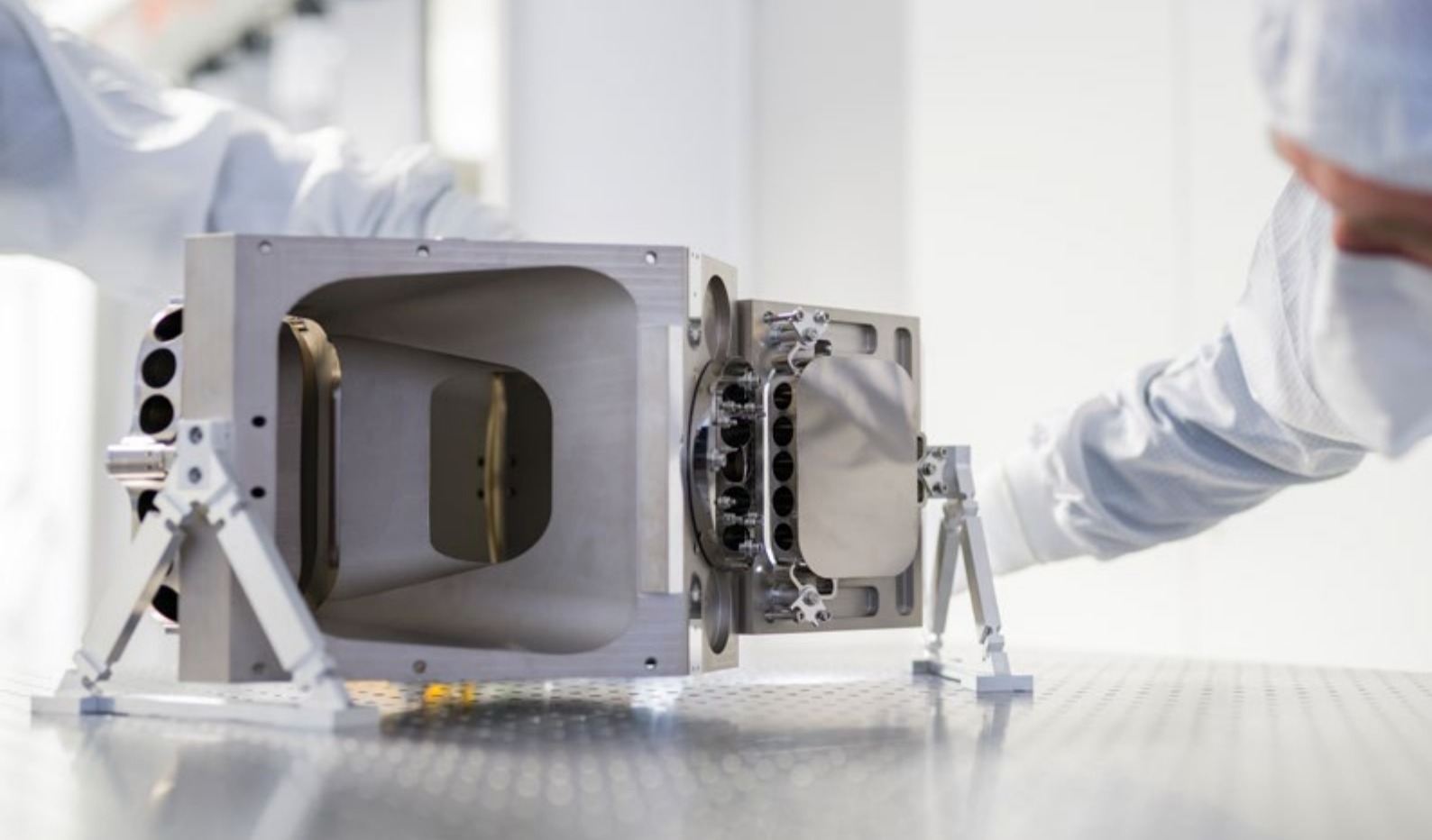
FREEFORM OPTICS PLUS READY FOR THE NEXT LEVEL

Der regionale Wachstumskern *fo** (freeform optics plus) wurde von 2014 bis 2016 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in einer ersten Forschungsphase gefördert. Die Allianz entwickelte die Basis für den Einsatz von Freiformoptiken entlang einer ganzheitlichen Technologieplattform mit den Komponenten: Design, Material, Bearbeitung, Beschichtung, Strukturierung und Systeme. Die innovative Prozesskette wurde durch Demonstratoren auf Komponenten- und Systemebene validiert und konzentrierte sich auf Anwendungen im infraroten Spektralbereich.

Im August 2018 hat eine neue, ebenfalls vom BMBF geförderte Forschungsperiode begonnen. Neun Photonik-Unternehmen und zwei Forschungsinstitute haben ihre Zusammenarbeit im regionalen Wachstumskern mit Unterstützung zweier assoziierter Partner intensiviert, zur Entwicklung und Vermarktung optischer Freiformsysteme für einen erweiterten Spektralbereich (VIS-NIR). Sie sollen mit verlässlichen Parametern bereit für die Serienproduktion sein und einen breiteren Anwendungsbereich ermöglichen.

The regional growth core *fo** (freeform optics plus) was funded from 2014 to 2016 by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in a first research period. The alliance developed the basis for the use of freeform optical systems along an innovative technology platform with the components: design, materials, processing, coating, structuring, and systems. The holistic process chain was validated by demonstrators at component- and system level, focussing on applications in the infrared spectral range.

In August 2018, a new research period started, also sponsored by the BMBF. Nine leading Photonics companies and two prestigious research institutes have intensified their cooperation in the regional growth core *fo** with the support of two associated partners in order to develop and market freeform optical systems for extended wavelength ranges (VIS-NIR). The new to be developed systems should be ready for production with reliable parameters and should therefore be suitable for broader applications, including laser materials processing, machine vision, and automotive sensing.



Die neuen Freiformsysteme sollen neue Möglichkeiten für die Lasermaterialbearbeitung, Machine Vision und Automotive Sensing eröffnen.

Im Rahmen des über drei Jahre finanzierten zweiten Projektteils wird die etablierte Technologieplattform »Freiformoptik« für Anwendungen im sichtbaren Spektralbereich sowie im Hinblick auf Replikations-, Segmentierungs-, Referenzierungs- und Messtechnikmethoden erweitert. Das Fraunhofer IOF ist in allen Bereichen der Plattform maßgeblich an der Technologieentwicklung beteiligt.

Wir danken dem BMBF für die Finanzierung (FKZ 03WKCK1B und 03WKCX1B) im Rahmen der Initiative »Unternehmen Region – Innovative Regionale Wachstumskerne«.

In the frame of the three-year funded project, the technology platform "freeform optics" will be expanded for applications in the visible spectral range as well as for replication, segmentation, referencing, and metrology methods. The Fraunhofer IOF is decisively involved in technology development of each platform area.

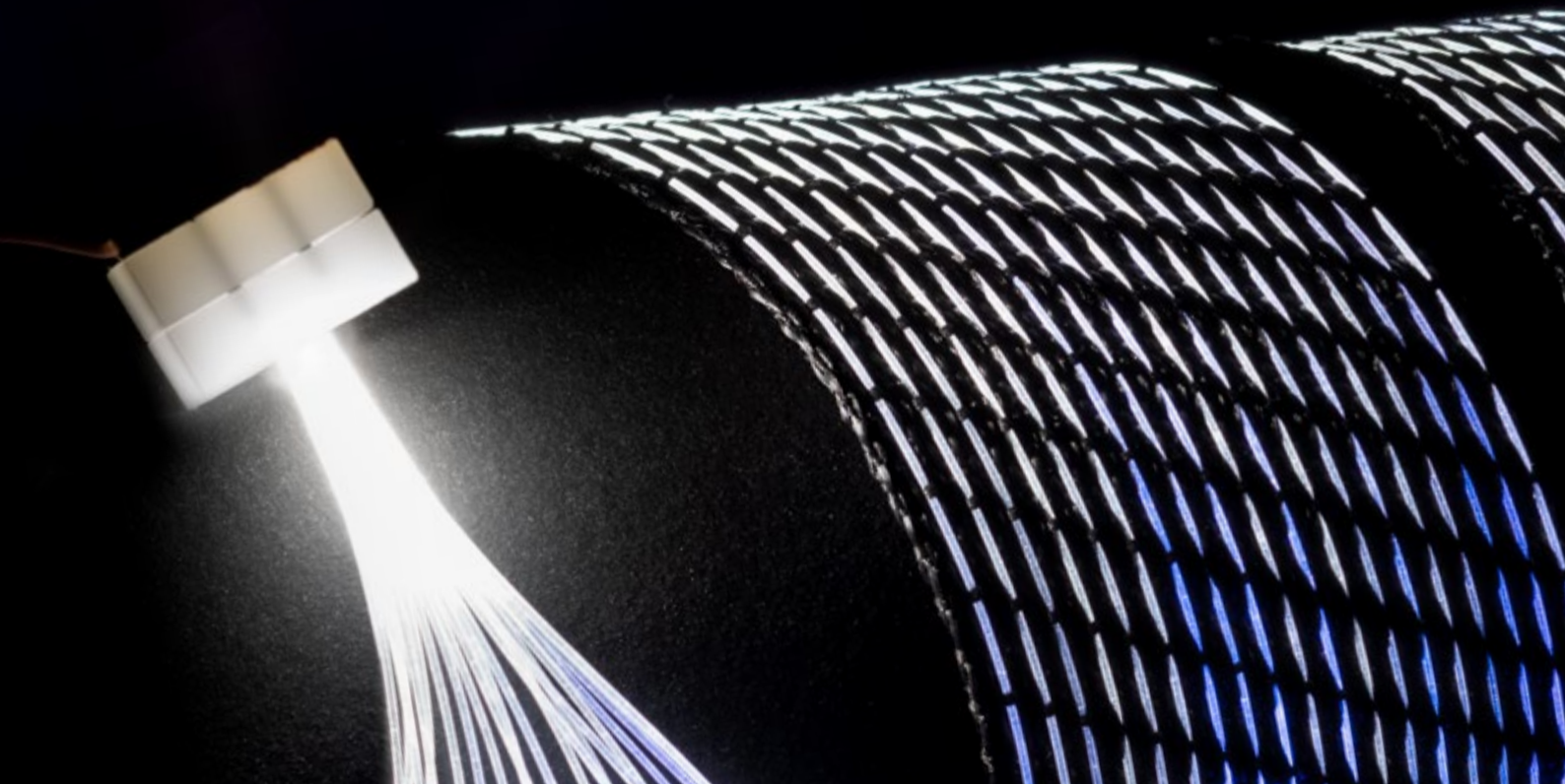
Funding (grant no. 03WKCK1B and 03WKCX1B) within the framework "Unternehmen Region – Innovative Regional Growth Core" of the BMBF is gratefully acknowledged.

www.fo-plus.de



LEFT *Ultrapräzise Bearbeitungsmaschine für Freiformoptiken. |
Ultra-precise processing machine for freeform optics.*

TOP *Justage eines freiformoptischen Systems. |
Adjustment of a freeform optical system.*



MAßGESCHNEIDERTE OPTISCHE FASERN TAILORED OPTICAL FIBERS

Seit Januar 2017 wird der regionale Wachstumskern TOF (tailored optical fibers) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Das Bündnis aus 18 Unternehmen und drei Forschungseinrichtungen des Thüringer Photonik-Sektors entwickelt die Grundlagen für die Nutzung maßgeschneiderter optischer Fasern und Fasersysteme entlang einer innovativen Technologieplattform mit den Komponenten: Materialien, Faserpreform/-ziehen, Beschichtung, Strukturierung und Systemintegration. Die Validierung der Prozesskette erfolgt an Demonstratoren auf Komponenten- und Systemebene mit dem Schwerpunkt auf Anwendungen in den Bereichen Beleuchtung, Lasermaterialbearbeitung, Textilherstellung, Medizintechnik und Sensorik.

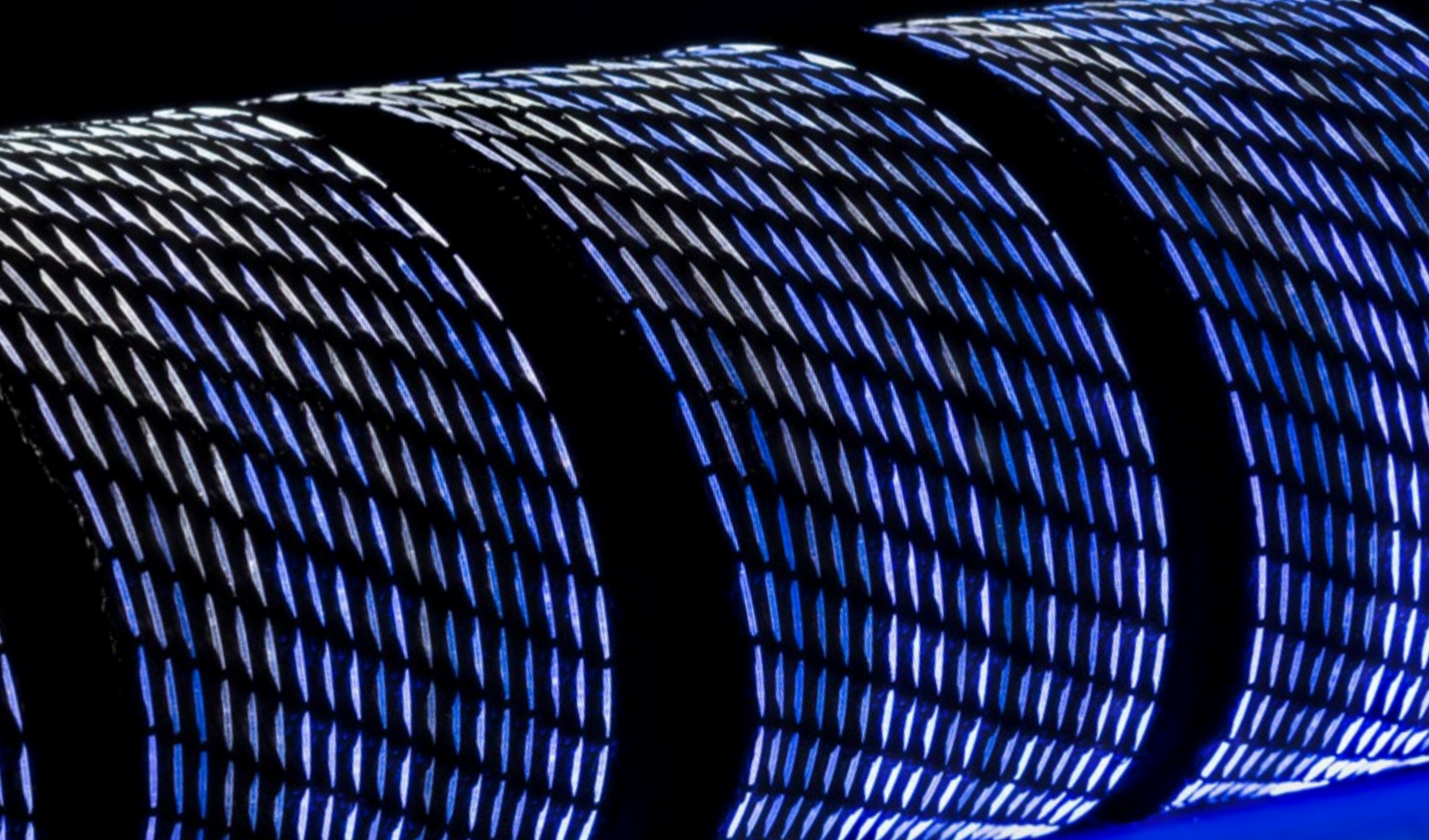
Das Fraunhofer IOF engagiert sich in allen vier der über drei Jahre geförderten Verbundprojekten des Wachstumskerns und beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Entwicklung von:

- neuen Präparationsmethoden zum Entmanteln und Cleaven von Fasern mit speziellen mechanischen Eigenschaften und anorganischen Beschichtungen auf Basis optischer, berührungsloser Technologien.

Funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), the regional growth core TOF (tailored optical fibers) started in January 2017 for a three-year R&D period. The alliance of eighteen companies and three research facilities of the Thuringian photonic sector develops the basis for the use of tailored optical fibers and fiber systems along an innovative technology platform with the components: materials, fiber preform / drawing, coating, structuring, and system integration. The process chain will be validated by demonstrators at component- and system level, focussing on applications in the fields of lighting, laser materials processing, textile manufacturing, as well as medical- and sensor technologies.

The Fraunhofer IOF is involved in all four funded joint projects of the growth core and is essentially concerned with the development of:

- new preparation methods for stripping and cleaving fibers with special mechanical properties and inorganic coatings based on optical, non-contact technologies



- Fasern mit nanostrukturierten Kernen und Fasern mit Luftmantel über Stacking-Technologien inkl. deren Endflächenkonfektionierung.
- kontaminationsfreien, präzisen, CO₂-laserbasierten Verfahren zum zwischenschichtfreien Fügen bzw. Löten einzelner oder gebündelter Faserkomponenten.
- effizienten, stabilen Strukturierungs- sowie Aufbau- und Verbindungstechnologien für hochminiaturisierte Fasersensorsysteme.
- Integrationsmethoden für lichtabstrahlende Fasern in flächig leuchtende, textile Gewebe und Techniken zur Integration von Lichtquellen über passive optische Fasern.

Wir danken dem BMBF für die Finanzierung (FKZ 03WKCV01B, 03WKCV02D, -V03B und -V04C) im Rahmen der Initiative »Unternehmen Region – Innovative Regionale Wachstumskerne«.

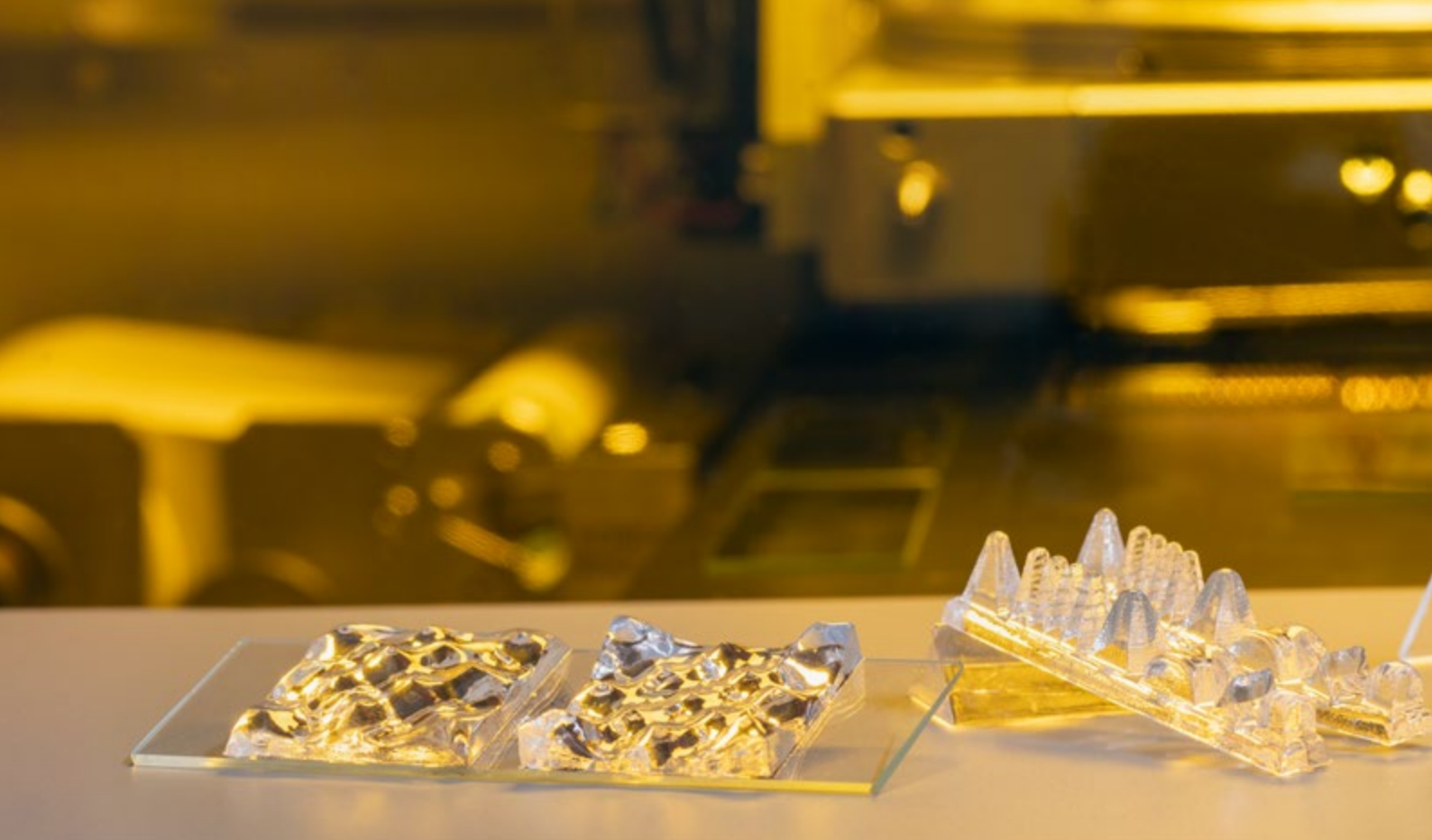
- fibers with nanostructured cores and fibers with air-clad by stacking technologies including assembly at the end-faces
- contamination-free, accurate, CO₂ laser-based methods for e. g. interlayer-free joining and soldering, respectively, of individual or bundled fiber components
- efficient and stable structuring, assembling, and joining technologies for highly miniaturized fiber sensor systems
- integration methods of light-emitting fibers into planar luminous textile fabrics and techniques for the integration of light sources via passive optical fibers.

Funding (grant no. 03WKCV01B, 03WKCV02D, 03WKCV03B, and 03WKCV04C) within the framework "Unternehmen Region – Innovative Regional Growth Core" of the BMBF is gratefully acknowledged.

www.tailored-optical-fibers.net



TOP *Flächig leuchtendes Bandgewebe aus optischen Fasern. |*
Areal luminous textile fabrics based on optical fibers



GO BEYOND 4.0 INDIVIDUALITY WITHIN MASS PRODUCTION

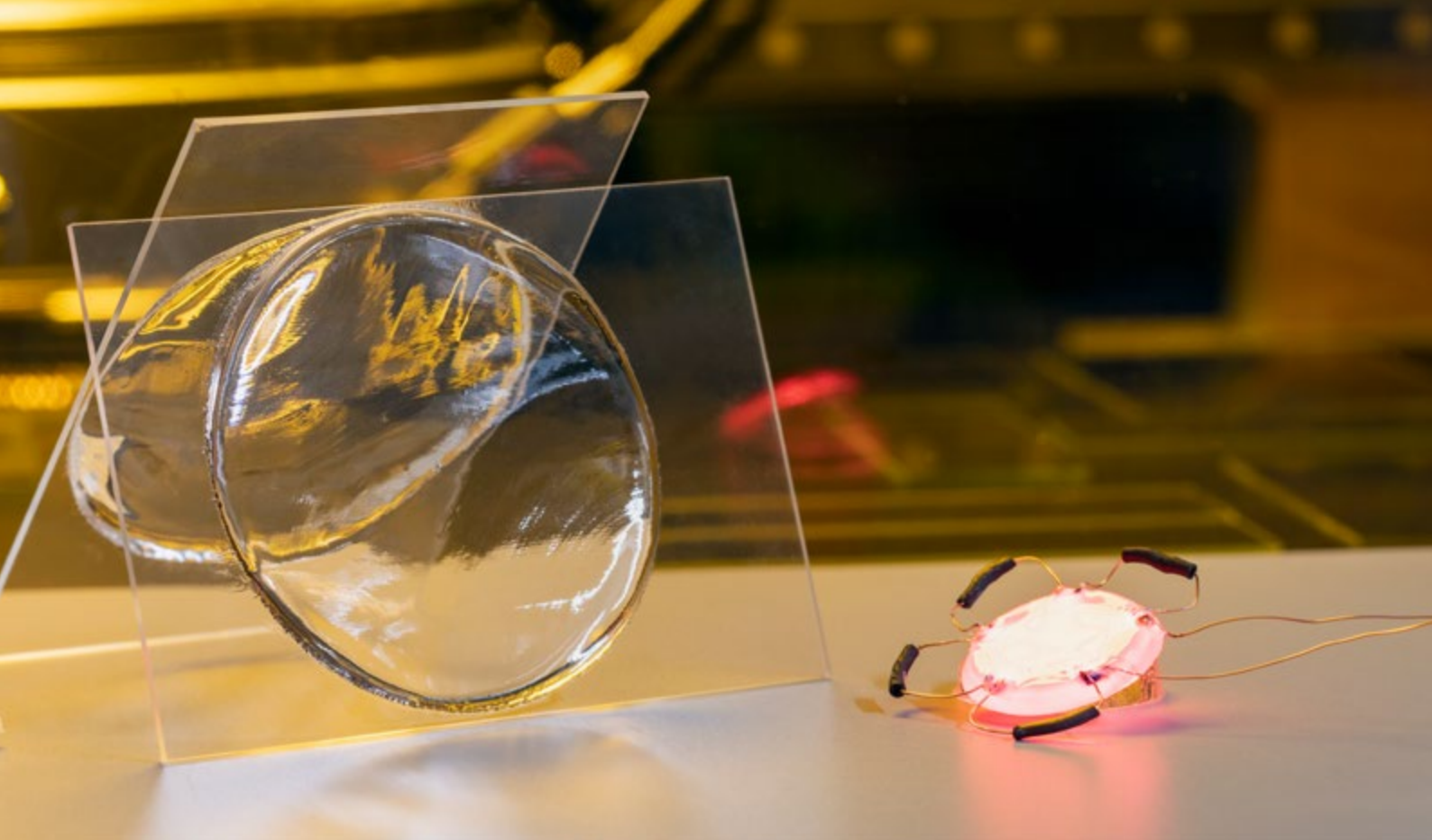
Das Fraunhofer-Leitprojekt zur individualisierten Massenfertigung, »Go Beyond 4.0«, widmet sich der Einbindung von digitalen Druck- und Laserverfahren in bestehende, zunehmend vernetzte Fertigungsumgebungen, um die Individualisierung von Produkten in der Massenproduktion zu ermöglichen. Hierdurch sollen Serienprodukte sowohl ressourcenschonend als auch kosteneffizient bis hin zum Unikat individuell gestaltet werden können.

Die sechs Fraunhofer-Institute ENAS (Projektkoordination), IFAM, ILT, ISC, IWU sowie IOF bündeln hierzu ihre komplementären Kompetenzen und stellen sich den Herausforderungen dieser neu zu erforschenden und zu entwickelnden Strategien. Es sollen traditionelle Fertigungsmethoden mit Zukunftstechnologien und digitalen Produktionsverfahren verknüpft werden, um den Bedarfen nach neuen und individuelleren Produktionskonzepten in Zukunftsmärkten, wie sie beispielsweise vom Automobilbau, der Luftfahrt und Beleuchtungsindustrie geäußert werden, gerecht zu werden.

The Fraunhofer lighthouse project on customization within mass production settings, "Go Beyond 4.0", is devoted to the integration of digital print and laser processes within existing and increasingly interconnected production environments to produce unique items rather than identical copies.

The six Fraunhofer Institutes ENAS (project coordination), IFAM, ILT, ISC, IWU as well as the IOF, pool their complementary competences to address the challenges associated with new strategies, which are to be studied and developed. Traditional means of production and technologies of the future shall be combined to meet the demands for new and individualized concepts of production. Such demands are being increasingly articulated by branches such as automotive, aerospace, and the illumination sector.

The scientists involved devise new strategies and process innovations within the domain of production of the aforementioned sectors – material adding (print) as well

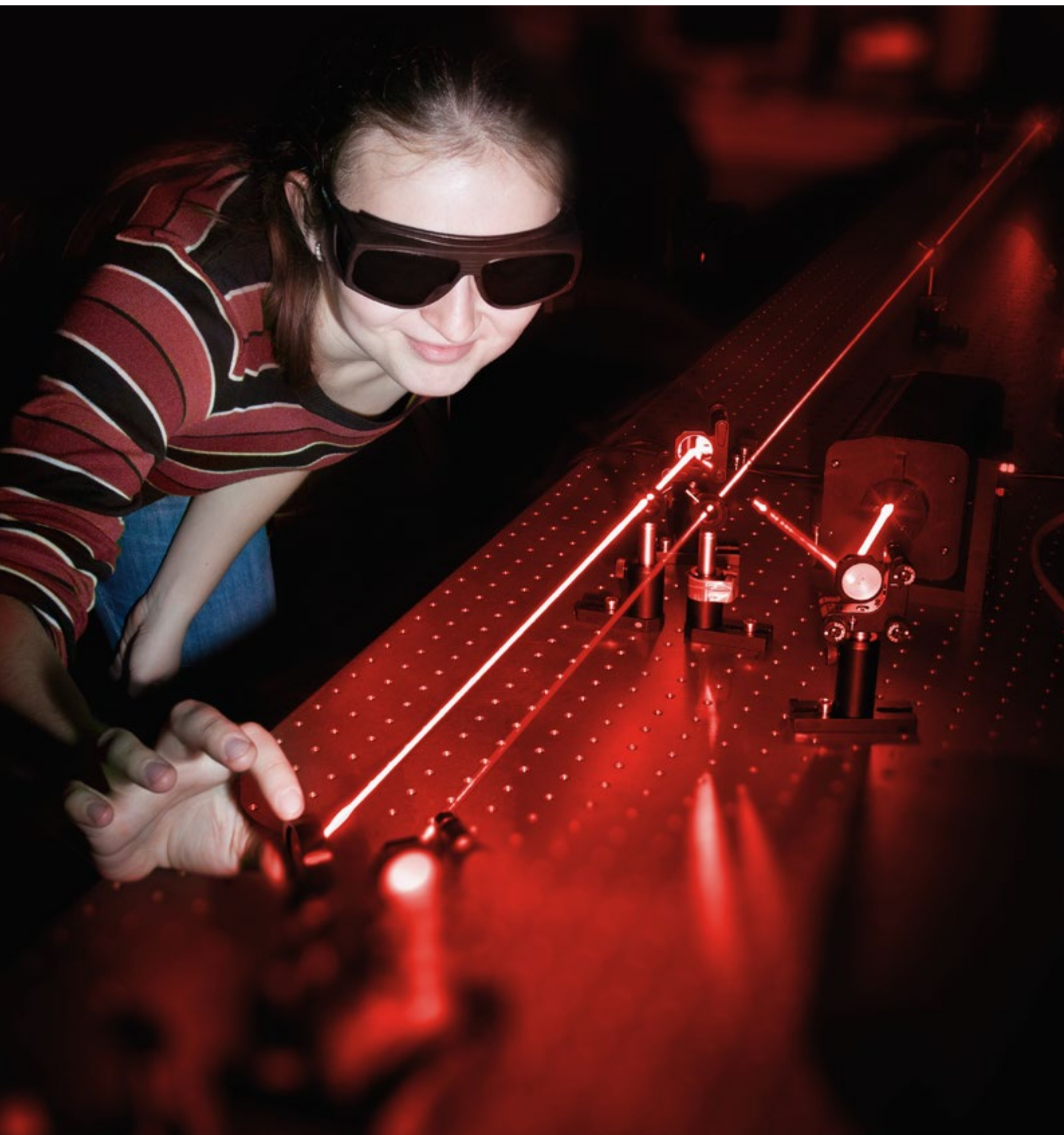


Die Forscherinnen und Forscher entwickeln daher neue Strategien und Prozessinnovationen in den Fertigungsdomänen der drei zuvor genannten Industrien – so werden etwa materialauftragende (Druck) und materialabtragende (Laser) Digitalmodule je nach Bedarf in bestehende Prozessketten integriert. Konkret wird dabei jeweils ein Demonstrator je Domäne anvisiert: Smart Door, Smart Wing und Smart Luminaire.

as material ablating (laser) digital modules are being integrated according to the specific demands of existing process chains. The consortium develops tangible demonstrators for each of these domains: Smart Door, Smart Wing, und Smart Luminaire.



MAX
PLANCK
SCHOOL
of
photonics



MAX PLANCK SCHOOL OF PHOTONICS

Neue Wege in der Graduiertenausbildung in Deutschland gehen und mit Eliteuniversitäten wie Harvard um international herausragende Doktorandenanwärter konkurrieren – die bundesweite Initiative der Max Planck Schools hat sich hohe Ziele gesetzt. Die Max Planck School of Photonics vereinigt die renommiertesten Photonik-Forschenden der deutschen Universitäten und der vier großen außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Gleichzeitig knüpft sie durch den Sprecher des Projekts, Prof. Andreas Tünnermann, und die Ansiedlung der Koordinierungsstelle an der Friedrich-Schiller-Universität an die Vorteile des traditionellen Optikstandorts Jena an. Durch die komplementäre Expertise und Ausrichtung der Forschungspartner Max-Planck, Fraunhofer-Gesellschaft, Leibniz-Gemeinschaft und Helmholtz-Gemeinschaft sowie der beteiligten Universitäten Aachen, Erlangen, Göttingen, Hamburg, Jena, Karlsruhe und München, deckt das Promotionsprogramm unterschiedlichste Forschungsfelder der Photonik ab. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer erhalten so einen umfassenden Einblick in die Welt des Lichts.

Das forschungsnahе Promotionsprogramm der Max Planck School of Photonics, mit einem Masterabschluss als Zwischenqualifikation, steht bereits Bachelor-Absolventen offen. Die ersten 20 Masterstudierenden beginnen ihr Studium im Herbst 2019. Auch Masterabsolventen können sich bewerben und starten direkt in die Forschungsphase zur Erlangung des PhD. Insgesamt sollen in der Pilotphase circa 150 exzellente Promovierende für eine Karriere in der Wissenschaft und Wirtschaft ausgebildet werden. In einem mehrstufigen Auswahlverfahren werden die Bewerberinnen und Bewerber hinsichtlich Qualifikation, Motivation und fachlicher Exzellenz selektiert.

Bis zum Start bereiten die am Programm beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das Forschungs- und Lehrprogramm vor. Neben Tagungen und Workshops wird eine Plattform für digitales Lernen eingerichtet, über die Studierende von den unterschiedlichen Standorten aus an Weiterbildungs- und Auffrischkursen teilnehmen und ihr Netzwerk intensivieren können.

Leading German graduate education in new ways and competing with elite universities like Harvard for internationally outstanding doctoral candidates – the federal initiative of Max Planck Schools is certainly aiming high. The Max Planck School of Photonics brings together the most renowned scientists in field of photonics from universities all over Germany, as well as the four large independent research societies. The connection to the advantages of the traditional optics location Jena is supported by the involvement of Prof. Andreas Tünnermann as speaker, and the coordination office located at the Friedrich Schiller University. Thanks to the complementary expertise and interests of the research partners Max Planck Society, Fraunhofer Society, Leibniz Association, and Helmholtz Association as well as the partner universities in Aachen, Erlangen, Göttingen, Hamburg, Jena, Karlsruhe, and Munich, the PhD program covers the most diverse research areas of photonics. Therefore, the students are able to gain an extensive insight into the world of light.

The PhD program at Max Planck School of Photonics, with a Master's degree as an intermediate qualification, is open to students with a Bachelor's degree. The first 20 master students will begin their studies in late 2019. Those who already have a Master's degree can apply to begin the research phase straight away to gain their PhD. Altogether, about 150 excellent doctoral candidates will be trained for a career in science and industry. Until the program starts, the scientists and universities involved are preparing the research and educational program. Besides conferences and workshops, a platform is being established to offer digital learning, exchange, and networking opportunities. Through this platform, students from different locations can connect to participate in qualification or refresher courses and intensify their network.

LEFT *Max Planck School of Photonic wird exzellentes Bildungsprogramm für die deutsche Photonikbranche. | Max Planck School of Photonic will become an excellent educational program for the German photonics industry.*



3Dsensation

Mensch · Maschine · Umwelt · ZUKUNFT



DIE ALLIANZ 3DSENSATION

THE ALLIANCE 3DSENSATION

Die Allianz 3Dsensation stellt sich der Herausforderung, Durchbruchinnovationen in den Bereichen Datenerfassung, -verarbeitung und -wiedergabe für die Mensch-Maschine-Interaktion zu entwickeln und wird dabei mit insgesamt 45 Mio. Euro aus dem Förderprogramm Zwanzig20 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

Derzeitige technische Lösungen ermöglichen zwar (teil-) autonomes Interagieren der Maschinen mit ihrer Umgebung und dem Menschen, dieses ist jedoch auf spezifische Bedingungen beschränkt. Hinsichtlich der Aufnahme und Interpretation von komplexen Szenarien liegen die technischen Systeme gegenwärtig weit hinter den Fähigkeiten des Menschen zurück. Die Vision von 3Dsensation umfasst kognitive Systeme, welche den Menschen in seinen Lebens- und Arbeitswelten als echte Assistenten und Partner unterstützen.

Aktuell widmen sich über 90 Partner aus Natur- und Technikwissenschaften, Arbeits- und Kreativwissenschaften, Kognitions- und Neurowissenschaften sowie Rechts- und Sozialwissenschaften der Umsetzung der im Jahr 2013 definierten Strategie-Roadmap. Dabei fokussiert 3Dsensation die Aktivitäten auf die Bereiche Kommunikation und Transfer, Qualifizierung und Nachwuchsförderung, Organisation und Vernetzung sowie Technologie und Applikation für die Märkte Produktion, Life Sciences, Mobilität und Sicherheit.

www.3d-sensation.de

The alliance 3Dsensation aims to fundamentally redefine data entry, data processing, and data reporting for human-machine interaction by developing cognitive systems, which mindfully support and assist humans in work and life. The alliance is participating in the government funding program Zwanzig20 of the Federal Ministry of Education and Research with a total of 45 million euros.

Even though current technical solutions enable (semi-) autonomous interaction of machines with their environment and humans, it is restricted to specific conditions. With regard to the recording and interpretation of complex scenarios, the skills of the technical systems are presently far behind human capabilities. The vision of 3Dsensation includes cognitive systems, which support humans in their living and working world as real assistants and partners.

Around 90 partners from natural and social sciences, ergonomics, neuroscience, and law are currently working on the strategic roadmap that was defined in 2013. 3Dsensation focusses on communication and transfer, qualification and promotion of junior researchers, organisation and networking, as well as on technology and its application in the production, life sciences, mobility, and security markets.

LEFT *Das Ziel vor Augen – Die Forschungsallianz 3Dsensation vereinfacht die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine mit optischen Technologien erheblich. |*

The 3Dsensation consortium is intended to considerably simplify the cooperation of humans and machines with optical technologies.



LEISTUNGSZENTRUM PHOTONIK CENTER OF EXCELLENCE IN PHOTONICS

Das »Leistungszentrum Photonik« ist die gemeinsame Transferplattform des Fraunhofer IOF und des Instituts für Angewandte Physik IAP der Friedrich-Schiller-Universität Jena sowie der assoziierten Partner, dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien IPHT und dem Helmholtz-Institut Jena HIJ. Es verknüpft die herausragenden und komplementären Kompetenzen der Partner in den Bereichen Lasertechnologie, Freiformoptik, Mikro- und Nanooptik, optische Sensorik und Quantentechnologie. Es fördert die einrichtungsübergreifende Entwicklung innovativer Lösungen mit Licht – von der ersten Idee über die grundlagenorientierte und anwendungsbezogene Forschung bis hin zur Integration in das finale Produkt.

Zur Umsetzung dieser Ziele entwickelt das Leistungszentrum Photonik vielfältige Maßnahmen, wie die Einrichtung und Koordination der Fraunhofer-Graduiertenschule für Angewandte Photonik, die Förderung innovativer Projektideen sowie die Entwicklung regionaler und internationaler Kooperationen. Zusätzlich unterstützt das Leistungszentrum die Partner bei der Umsetzung gemeinsamer, einrichtungsübergreifender Forschungsprojekte und Exzellenzvorhaben, wie der Max Planck School of Photonik.

The “Center of Excellence in Photonics” is the joint transfer platform of the Fraunhofer IOF and the Institute of Applied Physics IAP of the Friedrich Schiller University Jena as well as the associated partners, the Leibniz Institute of Photonic Technologies IPHT and the Helmholtz Institute Jena HIJ. It combines the outstanding and complementary competences of the partners in the fields of laser technology, freeform optics, micro and nano optics, optical sensors, and quantum technology. It supports the inter-institutional development of innovative solutions with light – from the initial idea through fundamental and applied research towards the integration into the final product.

To realize these goals, the Center of Excellence in Photonics has developed a variety of initiatives, such as the establishment and coordination of the Fraunhofer Graduate School of Applied Photonics, the promotion of innovative project ideas, and the strengthening of regional and international cooperation. In addition, the center supports partners in the implementation of inter-institutional research projects and their joint participation in excellence initiatives, such as the Max Planck School of Photonics. Two and a half years after its founding, an external expert panel



we love photonics

Zweieinhalb Jahre nach seiner Gründung wurde das Leistungszentrum Photonik durch ein externes Gutachtergremium von Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft evaluiert. Die positive Wirkung auf die Vernetzung der Partner sowie der Erfolg der entwickelten Formate bewirkte die Befürwortung der Weiterführung und den Ausbau des Leistungszentrums in die zweite Phase.

Zukünftig wird das Leistungszentrum die Weiterentwicklung zum nationalen Transferzentrum für die Photonik anstreben, um die Umsetzung von innovativen Lösungen mit Licht in der Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft nachhaltig zu stärken. Mit dem »Digital Innovation Hub Photonics« wird das Leistungszentrum zugleich eine dynamische Innovationsplattform zur Unterstützung von Gründern und Start-Ups etablieren und gemeinsam Schlüsseltechnologien und Kernkomponenten der Photonik entwickeln.

www.leistungszentrum-photonik.de



of representatives from science and industry evaluated the Center of Excellence in Photonics. Its positive effect on the networking of the partners as well as the success of developed joint projects and initiatives enabled the continuation and expansion of the center into a second phase.

In the future, the joint initiative will seek a further development into a National Photonics Transfer Center to strengthen the implementation of innovative solutions with light in business, science, and society. With the "Digital Innovation Hub Photonics", the center will also establish a dynamic innovation platform to support founders and start-ups, and jointly develop key technologies and core components for photonics.

LEFT *CGH-Laser-Projektor des Leistungszentrums als Geschenk an das Rochester Museum and Science Center in den USA. |*

CGH Laser Projector of the Center of Excellence as a gift for the Rochester Museum and Science Center in the USA.

TOP *Projektion macht das Prinzip additiver Farbmischung erlebbar. |*

Projection to illustrate the principle of additive color mixing.



PHOTONICS
DAYS 2018



APPLIED
PHOTONICS
AWARD

Applied Photonics Award 2018

PHOTONICS DAYS 2018

Unter dem Motto »SPOTS.ON photonics!« fanden vom 17. bis 20. September in Jena die Photonics Days 2018 statt, zu denen vier Tage lang insgesamt 400 nationale und internationale Teilnehmer in der Saalestadt zusammenkamen. Das viertägige Branchentreffen setzte die Tradition der Jenaer Optikgespräche in größerem Rahmen fort. Es war das erste Branchentreffen seiner Art und zugleich der Startschuss für ein Networking-Format, welches zukünftig im Zweijahresrhythmus stattfinden soll. Das Programm umfasste u. a. die Mitgliederversammlung der Forschungsallianz »3Dsensation« und den internationalen Workshop »Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms«.

Ein intensiver Austausch in verschiedenen Themenworkshops ergänzte die Keynote-Vorträge über aktuelle Themen wie Quantentechnologien oder die Metrologie in der Mikrolithografie. Viel Aufmerksamkeit fand auch der Vortrag von Jenoptik-Chef Dr. Stefan Traeger über seinen Strategiewechsel hin zu mehr Vorlaufforschung. Eines der Highlights war die feierliche Verleihung des Applied Photonics Award. Der mit insgesamt 11.250 Euro dotierte Nachwuchspreis des Fraunhofer IOF würdigt herausragende Abschlussarbeiten auf dem Gebiet der angewandten Optik. Wolfgang Tiefensee, Thüringer Minister für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft, verlieh den Preis vor rund 100 geladenen Gästen im Jenaer Volksbad. Die Bandbreite der prämierten Themen erstreckte sich von Zwei-Photonen-Polymerisation über Elektronenmikroskopie bis hin zu 3D-Formvermessung.

»Ein Ort, an dem Ideen zu Innovationen werden« – so beschrieb Minister Tiefensee in seiner Festrede den Standort Jena. Die Erfolge bei der Entwicklung des Wissenschafts- und Industriestandortes sind offensichtlich. Eine entscheidende Basis dafür dürfte die Entwicklung hochqualifizierten Nachwuchses sein. Um diese weiter voranzutreiben, werden mit dem »Applied Photonics Award« auch in Zukunft jährlich die besten Abschlussarbeiten mit Bezug zur angewandten Photonik ausgezeichnet.

With the title "SPOTS.ON photonics!", 2018's Photonics Days on September 17-19th attracted 400 national and international participants. The four-day industry get-together is a continuation of the tradition of the "Jenaer Optikgespräche" on a larger scale. It was the first of its kind and at the same time the starting point for a brand-new format that will take place biannually. Among other points, the program included the general meeting of the 3Dsensation research alliance and the international workshop "Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms".

Intensive exchange in the different thematic workshops were supplemented with keynote-presentations about cutting-edge topics like quantum technologies or metrology in microlithography. The speech by Jenoptik director, Dr. Stefan Traeger, about his change in strategy towards more preliminary research attracted particular attention. One of the highlights was the Applied Photonics Award ceremony. The young talent award comes with an € 11,250 prize and honors outstanding theses that have special relevance for applied optics. In front of about 100 invited guests, Thuringian State minister for Economic Affairs, Science and Digital Society, Wolfgang Tiefensee, conferred the prizes at the Volksbad Jena. The award-winning topics ranged from two-photon-polymerization to electron microscopy and 3D shape measurement systems.

"A place where ideas turn into innovations" – Thuringian minister Tiefensee's characterization of Jena during his speech is strengthened by the success in development of the research and industrial location. An important foundation for this is the education of highly qualified young talents. To promote this in the future, every year's best theses from the field of applied photonics will be awarded with the Applied Photonics Award.

LEFT *Minister Wolfgang Tiefensee bei der Verleihung des Applied Photonics Award. | Minister Wolfgang Tiefensee at the presentation of the Applied Photonics Award.*

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

THE INSTITUTE IN FIGURES

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2018 ist gegenüber dem Vorjahr um 9 % gestiegen, wobei die Aufwendungen für Personal um 6 % stiegen, die Sachausgaben um 12 %. Basis ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag erreichte über 13,7 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten 11,8 Millionen Euro.

Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2018 wurden insgesamt 5,7 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

Personal

Die Zahl der Mitarbeiter des Fraunhofer IOF ist im Jahr 2018 um 7 % gestiegen. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Ernst-Abbe-Hochschule Jena.

Operating budget

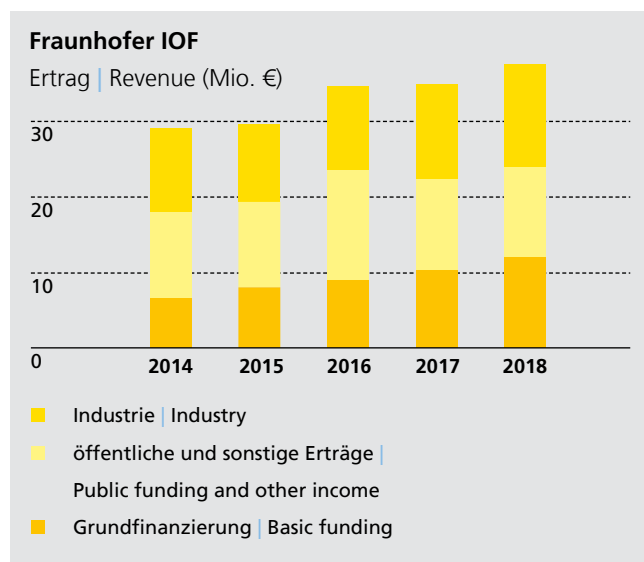
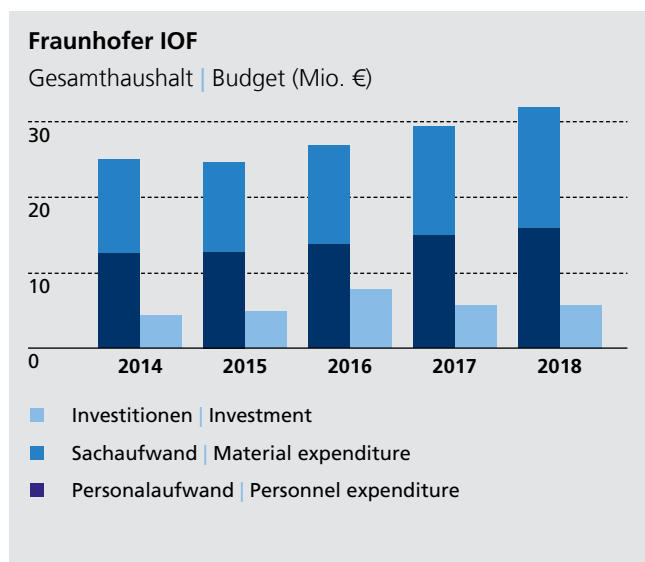
Compared with the previous year the operating budget increased in 2018 by 9 %, with expenditures for staff grow by 6 % and material costs grow by 12 %. The basis is still the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached more than 13.7 million euros. The received public funding reached 11.8 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 5.7 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2018.

Staff

The number of employees of the Fraunhofer IOF increased by 7 % in 2018. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher education, in particular the Friedrich Schiller University Jena and the Ernst-Abbe University Jena.



Das IAP 2018 in Zahlen

Die Mitarbeiter des Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (IAP) konnten für 2018 Drittmittel in Höhe von 9,5 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2018 9 Professoren, 30 wissenschaftliche und 17 technische Mitarbeiter sowie 107 Doktoranden und 60 Studenten.

Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

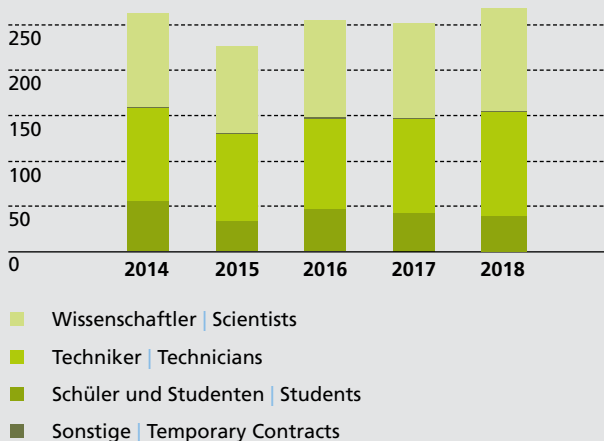
The IAP in figures 2018

Employees of the Institute of Applied Physics of the Friedrich Schiller University Jena (IAP) acquired external funds worth 9.5 million euros in 2018 (see table). A total staff of 9 professors, 30 research assistants, 17 technical assistants, 107 doctoral candidates, and 60 students were working at IAP in 2018.

The majority of completed theses are listed in the attachment.

Fraunhofer IOF

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



IAP

Drittmiteleinahmen IAP 2018 |

Contract research revenue IAP 2018

Fördergeber Contracts with	Zuwendung Funds T€
BMBF	2.460
DFG	1.697
EU	1.100
Thüringen Thuringia	723
Stiftungen Foundations	388
Industrie Industry	3.167



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

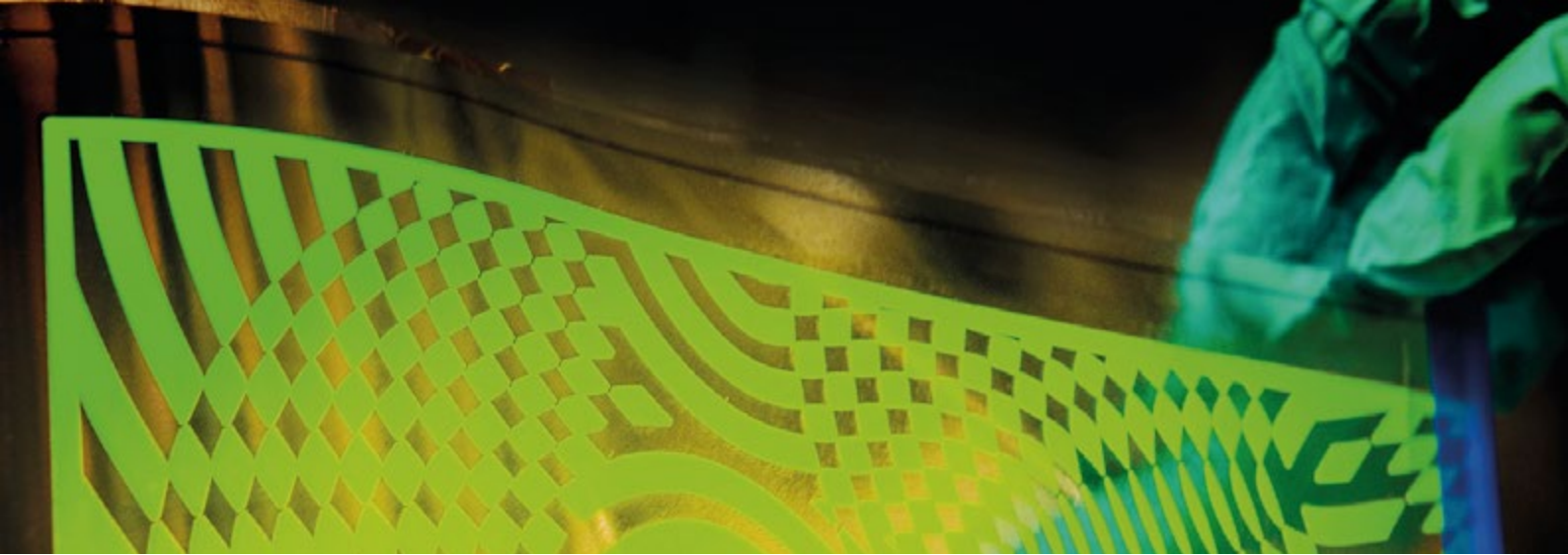
Six Fraunhofer Institutes cooperate in the Fraunhofer Group Light & Surfaces. Coordinated competences allow quick and flexible alignment of research work on the requirements of different fields of application to answer actual and future challenges, especially in the fields of energy, environment, production, 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

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

Business Fields

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



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

Kontakt

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

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

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

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 bearbeitet die Themen Vakuumbeschichtung, Oberflächenbearbeitung und -behandlung mit Elektronen und Plasmen und organische Elektronik. Grundlage der Arbeiten sind die Kernkompetenzen Elektronenstrahltechnologie, Sputtern und plasmaaktivierte sowie PECVD-Hochratebeschichtung, Technologien für organische Elektronik

- Optical systems and instrumentation
- Tooling and mold making

Contact

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

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

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

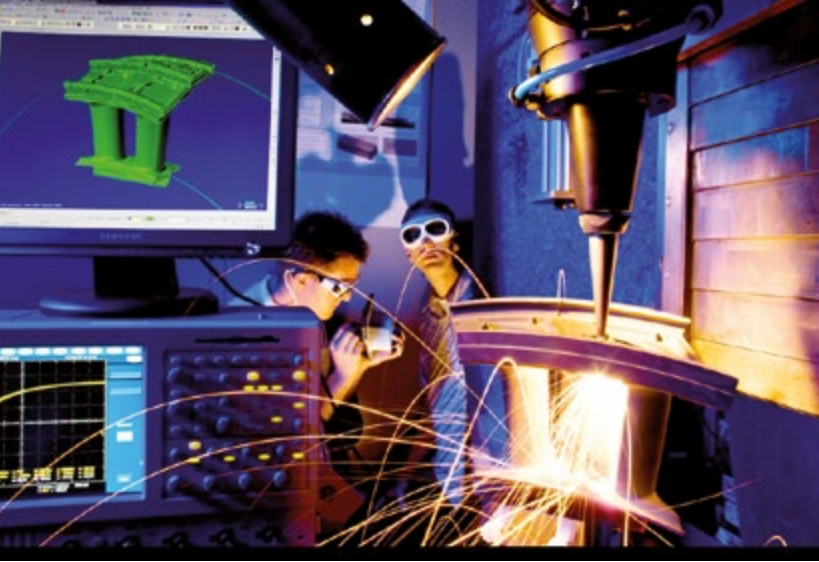
Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF

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 optoelectrical 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.com

Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP

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



und IC-/ Systemdesign. Es bietet ein breites Spektrum an Forschungs-, Entwicklungs- und Pilotfertigungsmöglichkeiten, insbesondere zur Behandlung, Sterilisation, Strukturierung und Veredelung von Oberflächen an. Außerdem werden OLED-Mikrodisplays, Sensoren, optische Filter und flexible OLED-Beleuchtung entwickelt. Unsere Technologien und Prozesse finden Anwendung im Maschinenbau, in 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-Institut für Lasertechnik ILT ein gefragter FuE-Partner der Industrie für die Entwicklung innovativer Laserstrahlquellen, Laserverfahren und Lasersysteme. Unsere Technologiefelder umfassen Laser und Optik, Lasermesstechnik, Medizintechnik und Biophotonik sowie Lasermaterialbearbeitung. Hierzu zählen u. a. das Schneiden, Abtragen, Bohren, Schweißen und Löten sowie die Oberflächenbearbeitung, die Mikrofertigung und das Rapid Manufacturing. Übergreifend befasst sich das Fraunhofer ILT mit Laseranlagentechnik, Prozessüberwachung und -regelung, Modellierung sowie der gesamten Systemtechnik.

www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Das Fraunhofer IST bündelt als industrienahes FuE-Dienstleistungszentrum Kompetenzen auf den Gebieten Schichtherstellung, Schichtanwendung, Schichtcharakterisierung und Oberflächenanalyse. Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure arbeiten daran, Oberflächen der verschiedensten Grundmaterialien neue oder verbesserte Funktionen zu verleihen, um auf diesem Wege innovative, marktgerechte Produkte zu schaffen. Das Institut ist in folgenden Geschäftsfeldern tätig: Maschinen

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

www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT

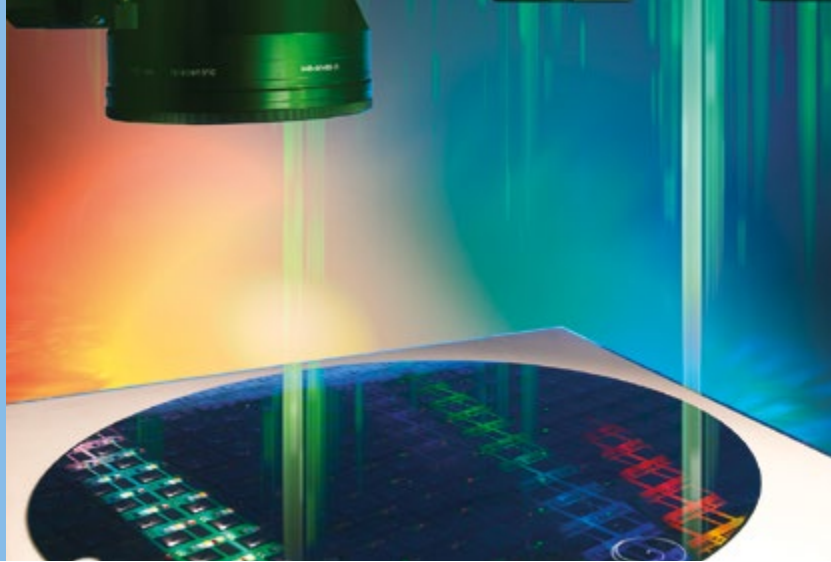
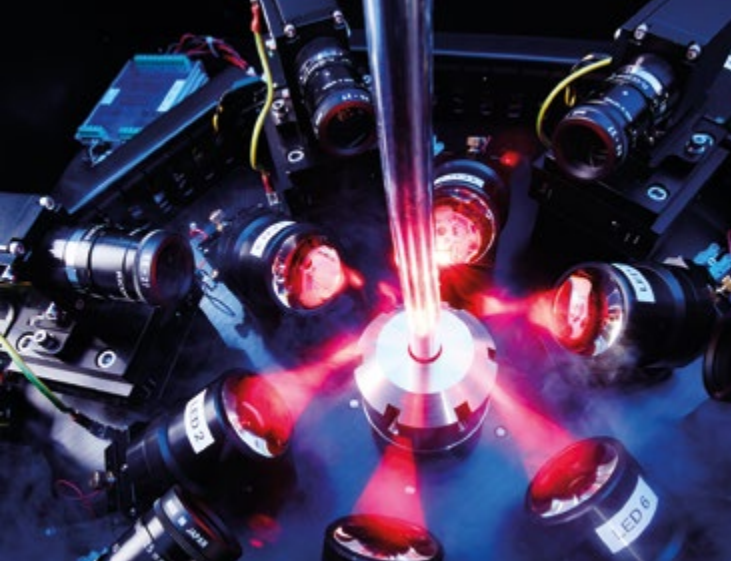
With more than 400 patents since 1985 the Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT develops innovative laser beam sources, laser technologies, and laser systems for its partners from the industry. Our technology areas cover the following topics: laser and optics, medical technology and biophotonics,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

www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST

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

www.ist.fraunhofer.de



und Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrt, Werkzeuge, Energie, Glas und Fassade, Optik, Information und Kommunikation, Mensch und Umwelt.

www.ist.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik 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 Formerkennung, der Gas- und Prozesstechnologie sowie im Bereich Funktionelle Materialien und Systeme.

www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Licht und Schicht: Das Fraunhofer IWS wirkt überall dort, wo Laser- auf Oberflächentechnik trifft. Wenn es darum geht, unterschiedliche Materialien Lage um Lage aufzutragen, zu fügen, zu trennen, zu funktionalisieren oder zu analysieren, kommt das Dresdner Institut ins Spiel. Von der Entwicklung neuer Verfahren über die Integration in die Fertigung bis hin zur anwendungsorientierten Unterstützung reicht das Angebot – alles aus einer Hand. Das Fraunhofer IWS stellt sich den Herausforderungen der Digitalisierung. Der Fokus liegt auf der Forschung und Entwicklung von Lösungen für »Industrie 4.0«.

www.iws.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM

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

www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS

Light and layer: Fraunhofer IWS works wherever lasers and surface technology meet. The Dresden institute comes into play if the task is to deposit different materials layer by layer, to join, cut, functionalize or analyze. Services range from developing new techniques via integration into manufacturing, up to user-oriented support – in single-source responsibility. The Fraunhofer IWS is meeting the challenges of digitization with a focus on researching and developing solutions for "Industry 4.0".

www.iws.fraunhofer.de

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

RESEARCH OF PRACTICAL UTILITY

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 72 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 26 600 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2,5 Milliarden Euro. Davon fallen mehr als 2,1 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen. Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und

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 72 institutes and research units. The majority of the more than 26,600 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of more than 2.5 billion euros. Of this sum, more than 2.1 billion euros is generated through contract research. Around 70 percent of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. Around 30 percent is contributed by the German federal and state governments in the form of base funding, enabling the institutes to work ahead on solutions to problems that will not become acutely relevant to industry and society until five or ten years from now.

International collaborations with excellent research partners and innovative companies around the world ensure direct access to regions of the greatest importance to present and future scientific progress and economic development. With its clearly defined mission of application-oriented research and its focus on key technologies of relevance to the future, the Fraunhofer-Gesellschaft plays a prominent role in the German and European innovation process. Applied research has a knock-on effect that extends beyond the direct benefits perceived by the customer: Through their research and development work, the Fraunhofer Institutes help to reinforce the competitive strength of the economy in their local region, and throughout Germany and Europe. They do so by promoting innovation, strengthening the technological base, improving the acceptance of new

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

technologies, and helping to train the urgently needed future generation of scientists and engineers.

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



Internationale Kooperationen I International Cooperations

Australia

Scisense Consulting Pty Ltd, Sydney, Prof. Gregory Forbes
MQ Photonics Research Centre, Macquarie University, Sydney,
Prof. Rich Mildren

Austria

IQOQI - Institute for Quantum Optics and Quantum Information Vienna, Prof. Anton Zeilinger

Brazil

University of Porto Alegre, Prof. Flavio Horowitz

Czech Republic

Brno University of Technology, Prof. Miloslav Ohlídal

Israel

Weizmann Institut, Prof. Avishay Gal Yam, Dr. Sagi Ben-Ami

Italy

University „LA Sapienza“ Rom, Prof. Francesco Michelotti

People's Republic of China

Tongji University, Shanghai, Prof. Xinbin Cheng

Russia

Space Research Institute Moscow, Prof. Alexander Yascovich

Switzerland

EPFL Lausanne, Prof. Hans-Peter Herzig, Dr. Thoralf Scharf

The Netherlands

ESA, Dr. Bernd Harnisch, Dr. Benedikt Guldemann

United States of America

QED Technologies, Rochester, Dr. Andrew Kulawiec
University of North Carolina at Charlotte, Charlotte,
Prof. Chris Evans

Messebeteiligungen I Fairs Participations

Consumer Electronics Show CES

9.-12.1.2018, Las Vegas, USA

SPIE Photonics West

30.1.-1.2.2018, San Francisco, USA

GPEC Polizeiausrüstung

20.-22.2.2018, Frankfurt/M., Germany

analytica

10.-13.4.2018, München, Germany

Hannover Messe, "Research&Technology"

23.-27.4.2018, Hannover, Germany

Control

24.-27.4.2018, Stuttgart, Germany

ILA Berlin

25.-29.4.2018, Berlin, Germany

OPTATEC

15.-17.5.2018, Frankfurt/M., Germany

LEFT Elevator Pitch während der Photonics Days 2018 –

Publikum entscheidet über Forschungsvorhaben. |

Elevator pitch during the Photonics Days 2018 –

audience decides on upcoming research projects.



International Conference on Space Optics ICOSO
9.-12.10.2018, Chania, Greece

VISION
6.-8.11.2018, Stuttgart, Germany

International Security Expo
28.-29.11.2018, London, UK

Aus- und Weiterbildung | Education and further training

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

Comprehensive activities of Fraunhofer IOF in the field of education and further training range from professional training

of laboratory technicians and industrial mechanics over the supervision of interns, graduates and postgraduates, giving lectures and seminars at the Jena universities up to the organization of workshops and international scientific conferences.

Vorlesungen | Lectures

Dr.-Ing. Erik Beckert
Optikmontage
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Norbert Kaiser
Beschichtungstechnik
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Gunther Notni
Systemtechnik und Systemtheorie der Bildverarbeitung
Qualitätsmanagement
Bildverarbeitung für die Qualitätssicherung
Aufnahme und Verarbeitung von 3D Daten
Technische Universität Ilmenau

TOP Photonics Days 2018 – Dr. Stefan Traeger spricht über die Herausforderungen der Branche. |
Photonics Days 2018 – Dr. Stefan Traeger talks about the challenges of the photonic industry.

Prof. Dr. Andreas Tünnermann/ Dr. habil. Olaf Stenzel
Thin Film Optics
Structure of matter
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann/ Dr. Adriana Szeghalmi
Analytical Instrumentation
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Adriana Szeghalmi
Vakuum und Dünnschichtphysik
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann/ Prof. Dr. Stefan Nolte
Atome und Moleküle II
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Stefan Nolte
Lasers in Medicine
Ultrafast optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Jens Limpert/ Prof. Dr. Stefan Nolte
Laser Physics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Jens Limpert
Grundlagen der Laserphysik
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Robert Brunner
Grundlagen Optik
Mikrooptik, Mikroskopie
Spektrale Sensorik, Geometrische Optik
Optische Instrumente, Optical Instrumentation
Digitale Projektion
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Herbert Gross
Lens design I, II
Design and correction of optical systems
Imaging and aberration theory
Physical Optics, Medical Photonics
Mathematical Methods in Physics
Optical Engineering
Optical Metrology and Sensing
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Thomas Pertsch
Quantum optics

Computational photonics
Computational Physics I
Fundamentals of modern optics
Introduction to nanooptics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Uwe Detlef Zeitner
Micro- and Nano-Technology
Introduction to Optical Modeling
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Conferences – Workshops – Events

Tag der Physik, »Optik – mehr als Licht«
16.3.2018, Physikalisch-Astronomische Fakultät der FSU Jena,
Germany

SID Meeting Display Applications
17.–18.4.2018, Jena, Germany

OptoNet International Summer School „Advanced Lens Design“
18.–22.6.2018, Jena, Germany

2nd Scientific Conference of the Leibniz ScienceCampus InfectoOptics
5.–6.9.2018, Jena, Germany

QUILT Herbstschule 2018
9.–12.9.2018, Bad Honnef, Germany

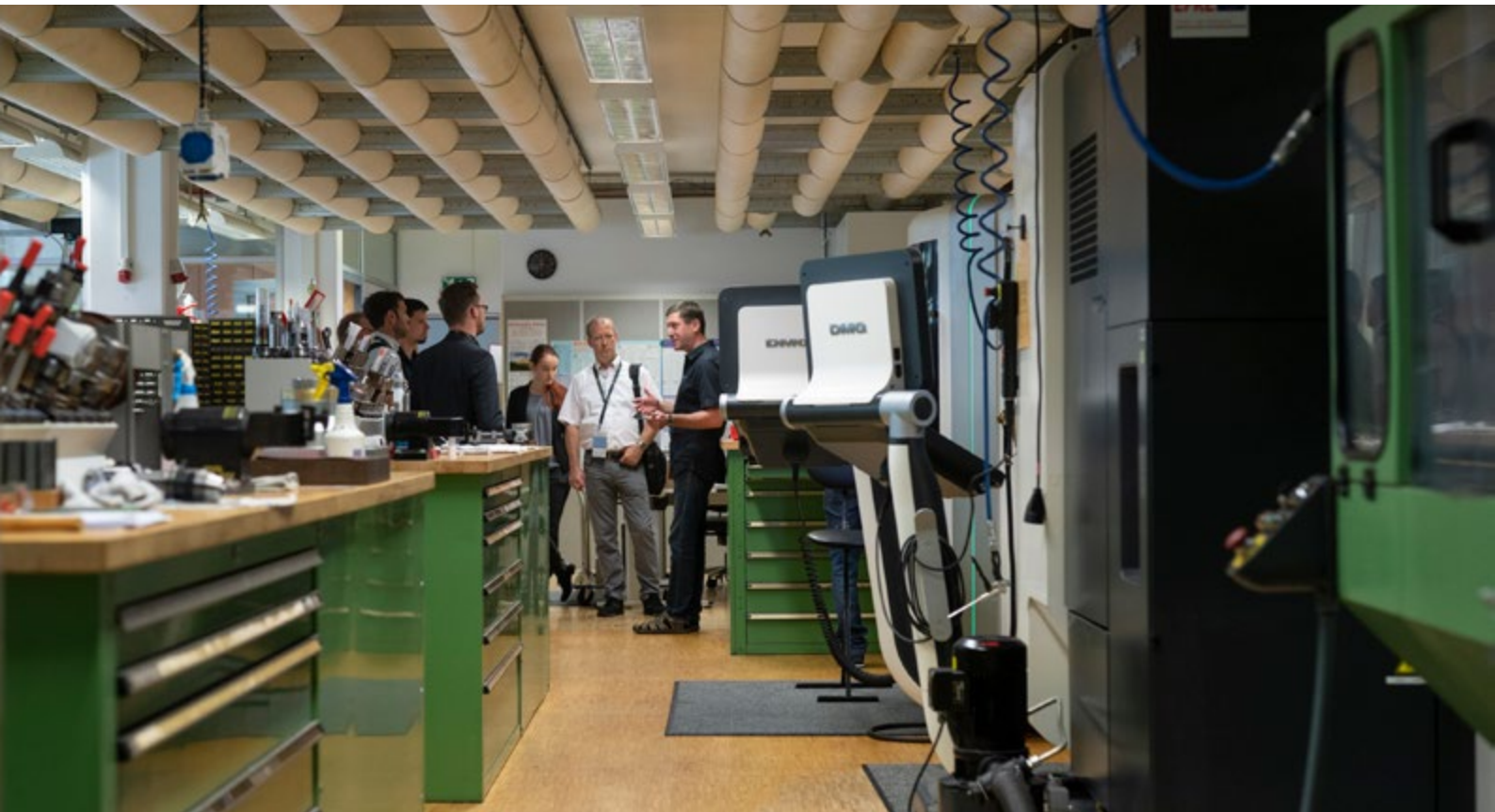
MINT-Festival
11.–13.9.2018, Jena, Germany

Photonics Days
17.–20.9.2018, Jena, Germany

3Dsensation – Mitgliederversammlung mit Abendveranstaltung
17.–18.9.2018, Jena, Germany

OptoNet-Workshop „Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms“
19.–20.9.2018, Jena, Germany

Wachstums kern TOF – Session „Tailored Optical Fibers“
22.11.2018, Jena, Germany



Preise | Prizes

Wissenschaftspreis »Forschung im Verbund« des Stifterverbands für die Deutsche Wissenschaft 2018
Ramona Eberhardt

Kaiser-Friedrich-Forschungspreis 2018
Andreas Tünnermann

Lothar-Späth-Award 2018
Andreas Tünnermann

Carl Zeiss Award for Young Researchers 2018
Fabian Stutzki

Hugo-Geiger-Preis 2018
Astrid Bingel

Nachwuchspreis Applied Photonics Award 2018
Stefan Heist

HANS PULKER AWARD for the best paper at ICCG12 2018
Olaf Stenzel, Steffen Wilbrandt

Nachwuchspreis der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik DGaO 2018
Stefan Heist

Ehrenurkunde für die besten Auszubildenden der FhG
Alita Tribus

Bachelorarbeiten | Bachelor Theses

Berny Birkle
Möglichkeiten der Bewertung von mobilen 3D-Sensoren
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Nico Döll
Theoretisches Konzept eines chromatisch-konfokalen Liniensensors mit Hyperspektralkamera
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Albrecht Schilling
Entwicklung eines Fokusspiegels zur 90° Strahlumlenkung
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

TOP *Photonics Days 2018 – Teilnehmer erhalten einen Einblick in die Möglichkeiten der Feinmechanischen Werkstatt. | Photonics Days 2018 – Participants get an insight into the technical possibilities of the precision engineering workshop.*

Sina Fischer

Mikrowellenplasmabehandlungen von organisch-anorganischen Hybridschichten

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Christoph Freitag

Simulation von Computational-Ghost-Imaging - Anwendung für 3D-Messungen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Julia Limpächer

Mikro-Absorptionsspektroskopie an Yb-dotierten Glasfaser-Preformen

Technische Hochschule Wildau

Daniel Linke

Entwicklung und Realisierung eines benutzerfreundlichen Justagekonzeptes für ein mehrachsiges Streulichtmesssystem

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Tina Seifert

Ausbildung und Klimastabilität von Nanostrukturen aus organischen Materialien

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Henrik Voigt

Nutzen und Auswirkungen von Feedbackschleifen auf den agilen Softwareentwicklungsprozess am Beispiel einer GUI-Entwicklung in der deklarativen Programmiersprache Qt QML

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Masterarbeiten | Master Theses

Pooya Aminjavaheri

Physical and chemical characterization of printable functional material for semiconductor applications

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Gloria Becker

Herstellung und Charakterisierung funktionaler Nano- und Mikrostrukturen zur Untersuchung der Adhäsionseigenschaften

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Changlong Chen

Parametrized PSF for model based system engineering

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Shinde Durvesh Pravin

Refractive diffractive hybrid diffusers for array projection

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Pius Eshun

Repetition Rate Scaling of SESAM Mode-locked Oscillator

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Shiti Handa

Atomic Layer Disposition of TiO_2 Nanolaminates for Optical Coatings

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Siti Heder

Local description and technology related optimization of freeform lenses for automotive headlamps

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Lukas Heller

Cavity enhanced cold atom quantum memories for temporally multiplexed quantum repeater nodes

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Timothy Imogore

Automated Spatio-temporal Co-alignment of Coherently Combined Lasers

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Ewa Kasperkiewicz

Head mounted device - design and tolerancing

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Marta Kazimierska

Spatial light modulators in non-rotationally symmetric imaging systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Stefan Kund

Al_2O_3 -basierte Barrierschichten mittels Atomlagenabscheidung

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Sebastian Linss

Sensitivity of Refractive Beam Shapers

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Gonzalo Palma Vega

Power scaling of narrow band fiber amplifier at 1018 nm

Friedrich-Schiller-Universität Jena



Thomas Kühlmann
Entwicklung eines Demonstrators für ein haptisches Feedback an der menschlichen Hand
Technische Universität Clausthal

Yang Lu
Numerical and experimental study of femtosecond selective laser melting of copper
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Martin Menge
Konzeptionierung eines Versuchsstandes zur Untersuchung kraftschlüssiger Verbindungen optischer Bauteile für die Anwendung in der Raumfahrt
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Wilko Middents
Reduzierung von Laser-induzierten Defekten in Faser-Bragg-Gittern
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Tom Pertermann
Analyse der Ortsfrequenzen verschiedener Oberflächenfehler auf Metallspiegeln
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Conrad Rößler
Simulationen zur Vorkompensation atmosphärischer Turbulenzen für Boden-Satelliten-Kommunikation
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Negin Sahraei
Simulation, Fabrication and Analysis of X-ray Planar Parabolic Compound Refractive Lenses
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Tyler Schoeppner
Anti-reflective surfaces for infrared materials
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Ziyao Tang
Ant Colony Optimization for Lens Design
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Brigitta Septriani

Parametric study of the phase diffusion process in a gain-switched semiconductor laser for randomness assessment in Quantum Random Number Generator (QRNG)

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Tadiyos Tarekegn

Glass selection for color correction of an optical system

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Isabelle Tyrasa

Bedürfnisorientiertes Meeting-Design: Eine Fallstudie über die Meetings der Abteilung »Strategie, Marketing und Koordination« des Fraunhofer IOF

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Sven Urban

Optikdesign-Studie für ein Rowland-Spektrometer mit planem Fresnel-Element

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Ziyao Wang

Development of an index profilometer for fiber preforms

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Xiaoyu Xu

Investigation of the refractive index distribution and propagation properties of waveguides by simulations in fused silica

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Fanhui Zeng

Plenoptical camera system modeling

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Shenlei Zhu

Methods for selection of compensators in optical design

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dissertationen | Dissertations

Dr. rer. nat. Sven Breitkopf

Energy Scaling by Stacking of Ultrashort Pulses in a Passive Enhancement Cavity

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Romina Diener

Mid-infrared photonic devices for stellar interferometry

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Anika Brömel

Development and evaluation of freeform surface descriptions

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Franz Beier

Leistungsskalierung von Hochleistungsfaserlasern im Spannungsfeld nichtlinearer Effekte und transversaler Modeninstabilitäten

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Kay Dietrich

Optische Aktivität von deterministischen 3D-chiralen Nanostrukturen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Jens Dunkel

Refraktive Freiform-Arrays für mikrooptische Abbildungssysteme

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Christian Franke

Struktur-Eigenschaftsbeziehung dielektrischer Mischschichten für Interferenzanwendungen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Thomas Kaiser

Application of the adjoint modal formalism for the design of nanooptical structures

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Robert Müller

Struktur und Eigenschaften von Spiegelschichten für den streifenden Einfall im weichen Röntgen- und EUV-Spektralbereich

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Dr. rer. nat. Philipp Naujok

Struktur und optische Eigenschaften von Bor-basierten Schichtsystemen für den BEUV-Spektralbereich

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Pol Ribes Pleguezuelo

Low-stress soldering process to assemble highly stable and miniaturized laser resonators

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Sina Saravi

Photon-pair generation in photonic crystal waveguides

Friedrich-Schiller-Universität Jena



Dr. rer. nat. Sören Schmidt
Efficient wave-optical simulations for the modeling of
micro-optical elements
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Stefan Schwinde
Untersuchung reaktivgesputterter Schutzschichten im
Hinblick auf die Beständigkeit hochreflektierender
Silberschichten
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Sönke Steenhusen
Untersuchungen zur sub-100 nm Strukturierung von
Hybridpolymeren mittels Zwei-Photonen Absorption und
Anwendungen
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Bayarjargal Tugchin (Narantsatsralt)
Excitation and superfocusing of the radially polarized
conical surface plasmon polaritons
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Yi Zhong
Optical design methods of non-rotationally symmetric
optical systems with freeform surfaces
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Schutzrechte | Intellectual Property

Patentoffenlegungen | Patent First Publications

Beckert, E.; Pabst, O.; Dannberg, P.
Verfahren zum Drucken optischer Elemente
DE 10 2017 203 180 A1; WO/2018 154090 A1

Duparre, J.; Brückner, A; Wippermann, F.; Oberdörster, A.
Vorrichtung zur Abbildung von Teilgesichtsfeldern, Multi-
aperturvorrichtung und Verfahren zum Bereitstellen
derselben
DE 10 2017 206 442 A1; WO/2018 188815 A1

Duparre, J.; Wippermann, F.
Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren
zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
DE 102017012197 A1; WO/2018 162304 A1

Duparre, J.; Wippermann, F.

Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung

DE 10 2017 206 429 A1; WO/2018 18932 A1

Michaelis, D.; Schreiber, P.

Projektionsvorrichtung und Verfahren zur Projektion mit optischen Freiformflächen

US 2018/0199017 A1; CN 108369367 A; EP 3345049 A1; KR 102018050364 A

Naujok, P.; Yulin, S.; Kaiser, N.

Multilayerspiegel zur Reflexion von EUV-Strahlung und Verfahren zu dessen Herstellung

WO 2018/065251 A1

Scheiber, T.; Haarlammert, N.

Rückreflexschutz

WO 2018/109182 A1; DE 10 2016 124 490 A1

Schürmann, M.; Müller, R.; Kaiser, N.; Schwinde, S.

Verfahren zur Herstellung eines Reflektorelements und Reflektorelement

US 2018/0029931 A1

de Vries, O.; Plötner, M.; Limpert, J.

Reduktion der Pulsrepetitionfrequenz eines gepulsten Lasersystems

US 2018/0041001 A1

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

Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben

JP 2018032053 A

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

Vorrichtung mit einer Multikanalabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Herstellen derselben

CN 108351497 A; IN 201817005293 A; US 2018/0198963 A1

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

Multiaperturabbildungsvorrichtung, tragbare Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung

WO 2017/029378 A1; US 2018/0176473 A1; CN 108139566 A

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

Multiaperturabbildungsvorrichtung mit einer reflektierenden Facette aufweisenden Strahlumlenkvorrichtung

US 2018/176437 A1; CN 108353115 A; EP 3338441 A1; JP 2018532145 A; KR102018053644A

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

Multiaperturabbildungsvorrichtung mit kanalindividueller Einstellbarkeit

CN 108139565 A

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

Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs

EP 3403392 A1; CN 108463992 A; IN 2018 2702 5766 A; KR 102018102127 A

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

Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs

CN 108604044 A; EP 3371650 A1; KR 102018112016 A

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

Multiaperturabbildungsvorrichtungen, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem

CN 108781249 A; EP 3403393 A1; US 2018/0324334 A1; KR 102018102126 A

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

Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem

CN 108431661 A

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

Multiaperturabbildungsvorrichtung mit Optiksubstrat

US2018/0176471 A1; IN 2018 3700 5179 A; CN 108351492 A; EP 3338129 A1; JP 2018527820 A

Wippermann, F.; Lange, N.; Pabst, O.

Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Verfahren zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes

EP 3366032 A1; CN 108432225 A; JP 2018536892 A; KR 102018072767 A; US 20180241920 A1

Zeitner, U.D.; Flügel-Paul, T.; Michaelis, D.; Harzendorf, T.

Optische Anordnung zur spektralen Zerlegung von Licht

EP 3 267 230 A1; US 2018/0011334 A1; DE 102016112504 A1

Patenterteilungen | Patent Assignations

Beckert, E.; Banse, H.; Zakel, E.; Fettke, M.

Verfahren zum Fügen justierter diskreter optischer Elemente

EP 2 117 755 B1

Böhme, S.; Peschel, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.; Limpert, J.
Vorrichtung zum Bearbeiten von zylindrischen Werkstücken

CA 2724209 C

Böhme, S.; Schreiber, T.; Fabian, S.

Laserbasiertes Spleißen von Glasfasern auf optischen Komponenten

EP 2 786 187 B1

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

Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung eines Objektbereichs

TW I628955 B

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

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

KR 10-1930040 B1

Danz, N.; Wächter, C.

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

EP 3 172 542 B1

Duparré, J.; Olivier, S.

Herstellungsverfahren einer Linse

EP 2 437 929 B1

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

Vorrichtung zur optischen Abbildung

EP 2 507 662 B1

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

Multiaperturabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung

DE 10 2017 208 709 B3

Duparre, J.; Wippermann, F.

Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung

DE 10 2017 204 035 B3

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

Funktionale Beschichtung und Verfahren zu deren Herstellung

DE 10 2014 119 233 B4

Gottschall, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Baumgartl, M.

Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung von kurzen Strahlungspulsen

US 9,880,446 B2; EP 3063 592 B1

Kalkowski, G.; Rothhardt, C.; Eberhardt, R.; Rhode, M.

Verfahren zum Fügen von Substraten

EP 2 678 287 B1

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

Optische Anordnung mit Strahlaufteilung

US 9,941,653 B2

Limpert, J.; Stutzki, F.; Cesar, J.; Thomas, J.U.; Nolte, S.; Voigtländer, C.; Tünnermann, A.

Transversalmodenfilter für Wellenleiter

EP 2 478 400 B1

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Gottschall, T.; Popp, J.; Meyer, T.

Erzeugung von synchronisierten Laserpulsen bei variablen Wellenlängen

DE 10 2017 115 687 B3

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Müller, M.; Kienel, M.; Klenke, A.

Lasersystem mit Überlagerung von zeitlich oder räumlich separaten Laserimpulsen

DE 10 2016 108 282 B4

Oberdörster, A.; Brückner, A.

Vorrichtung zur Aufnahme eines von einer Linse einer plenoptischen Kamera erzeugten Zwischenbilds und Plenoptische Kamera

DE 10 2013 200 059 B4

Oberdörster, A.

Mehrkanaloptik-Bildaufnahmeverrichtung und Mehrkanaloptik-Bildaufnahmeverfahren

US 9,930,237 B2; JP 6336599 B2

Scheidung, S.; Risse, S.; Peschel, T.; Gebhardt, A.; Damm, C.; Steinkopf, R.
Verfahren zur Fertigung einer optischen Anordnung mit mindestens zwei optischen Funktionsflächen, optisches Gerät und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens
EP 2470328 B1

Scherg, G.-P.; Knopf, H.; Gratzke, N.; Schulz, U.
Gradienten-Hartschicht mit sich änderndem E-Modul
DE 10 2017 003 042 B3

Schreiber, P.; Bräuer, A.; Duparré, J.
Bilderfassungssystem zur Rundumsicht
EP 2 011 331 B1

Schulz, U.; Kaiser, N.; Munzert, P.; Rickelt, F.
Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht
SG 11201510178 Y; JP 06415549 B2

Schulz, U.; Rickelt, F.; Munzert, P.; Heiße, H.; Kaiser, N.
Verfahren zur Herstellung eines reflexionsmindernden Schichtsystems und reflexionsminderndes Schichtsystem
US 9,939,556 B2; DE 10 2015 101 135 B4

Schulz, U.; Munzert, P.
Verfahren zur Herstellung eines Kunststoffsubstrats mit einer Lackschicht und Kunststoffsubstrat mit einer Lackschicht
DE 10 2012 100 294 B4

Schürmann, M.; Kaiser, N.; Schwinde, S.
Optisches Element mit einer reflektierenden Beschichtung
EP 3 158 370 B1

Sieler, M.; Schreiber, P.; Riedel, A.
Multiapertur-Projektionsdisplay und Einzelbilderzeuger für ein solches
JP 6371377 B2

Voigtländer, C.; Nolte, S.; Thomas, J.U.; Tünnermann, A.; Williams, R.
Modenfilter mit Brechzahlmodifikation
EP 2761344 B1

Wächter, C.; Danz, N.; Michaelis, D.; Flämmich, M.
Reflektive Strahlformer zum Erzeugen einer gewünschten Abstrahlcharakteristik aus einer Abstrahlcharakteristik einer Flächenlichtquelle
EP 2 758 708 B1

Wippermann, F.; Duparre, J.; Brückner, A.
Vorrichtung zur optischen Navigation und dessen Verwendung
EP 2 387 744 B1

Wippermann, F.; Duparré, J.; Bräuer, A.; Brückner, A.
Vorrichtung, Bildverarbeitungsvorrichtung und Verfahren zur optischen Abbildung
EP 2 432 213 B1

Wippermann, F.; Lange, N.; Reimann, A.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben
EP 3 004 962 B1; JP 6280210 B2; CN 105556372 B;
ZL 201480030206.7, EP 2 920 636 B1; JP 6267235 B2

Wippermann, F.; Reimann, A.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben
DE 10 2013 209 819 B4; KR 10 1891652 B1;
ZL 201480030017.X

Wippermann, F.; Reimann, A.; Dunkel, J.; Bräuer, A.
Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung einer Struktur aus aushärtbarem Material durch Abformung
KR 10 1858486 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Vorrichtung mit einer Multikanalabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Herstellen derselben
TW I631374 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, tragbare Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
TW I631370 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit kanalindividueller Einstellbarkeit
TW I617192 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Reimann, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem
TW I629513 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem
TW I642974 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit Optiksubstrat
IN 201837005179 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
TW I 615635 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungssystem mit kanalweiser Nutzung mehrerer nicht zusammenhängender Bildbereiche
TW I 612337 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs
TW I 612337 B

Wippermann, F.; Lange, N.; Pabst, O.
Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Verfahren zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes
TW I 642975 B

Zeitner, U.D.; Weichelt, T.; Bourgin, Y.
Beleuchtungseinrichtung und Vorrichtung zur lithografischen Belichtung
EP 3 141 961 B1; US 10,101,665 B2

Zeitner, U.D.; Harzendorf, T.; Stürzebecher, L.
Beleuchtungseinheit und Vorrichtung zur lithografischen Belichtung
EP 2 423 750 B1

Wissenschaftliche Publikationen | Scientific Publications

Bücher | Books

Stenzel O., Ohlídal M.
Optical Characterization of Thin Solid Films
Springer Series in Surface Sciences (2018), ISBN 978-3-319-75325-9

Buchkapitel | Book chapters

Breitkopf, S.; S. Wunderlich, T. Eidam, E. Shestaev, S. Holzberger, T. Gottschall, H. Carstens, A. Tünnermann, I. Pupeza, J. Limpert
Extraction of enhanced, ultrashort laser pulses from a passive 10-MHz stack-and-dump cavity
in Exploring the World with the Laser: Dedicated to Theodor Hänsch on his 75th Birthday, edited by D. Meschede, T. Udem, T. Esslinger (2018), ISBN 978-3-319-64346-8

Kroker, S.; T. Siefke
Resonant Waveguide Grating Structures
in Optical Characterization of Thin Solid Films; Springer Series in Surface Sciences, edited by O. Stenzel, M. Ohlídal (2018), ISBN 978-3-319-75325-9

Kroker, S.; T. Siefke
Polarization Control by Deep Ultra Violet Wire Grid Polarizers
in Optical Characterization of Thin Solid Films; Springer Series in Surface Sciences, edited by O. Stenzel, M. Ohlídal (2018), ISBN 978-3-319-75325-9

Pabst, R.
Optische 3D-Vermessung hochdynamischer Messszenen
in GESCHÄFTSMODELL-INNOVATIONEN RICHTIG UMSETZEN, edited by H.J. Bullinger, W. Bauer, M. Rüger (2018), Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Saule, T.; S. Holzberger, O. De Vries, M. Plötner, J. Limpert, A. Tünnermann, I. Pupeza
Phase-stable, multi- μ J femtosecond pulses from a repetition-rate tunable Ti: Sa-oscillator-seeded Yb-fiber amplifier
in Exploring the World with the Laser: Dedicated to Theodor Hänsch on his 75th Birthday, edited by D. Meschede, T. Udem, T. Esslinger (2018), ISBN 978-3-319-64346-8

Trost, M.; S. Schröder
Roughness and Scatter in Optical Coatings
in Optical Characterization of Thin Solid Films; Springer Series in Surface Sciences, edited by O. Stenzel, M. Ohlídal (2018), ISBN 978-3-319-75325-9

Zeitschriften | Journals

Abdo, M.; E. Förster, P. Bohnert, V. Badilita, R. Brunner, U.

Wallrabe, J.G. Korvink

Dual-mode pushbroom hyperspectral imaging using active system components and feed-forward compensation

Review of Scientific Instruments 89 (2018) p. 083113, ISSN 0034-6748

Alberucci, A.; C.P. Jisha, S. Bolis, J. Beeckman, S. Nolte

Interplay between multiple scattering and optical nonlinearity in liquid crystals

Optics Letters 43 (15) (2018) p. 3461-3464, ISSN 0146-9592

Alberucci, A.; C.P. Jisha, S. Nolte

Photonic potential for TM waves

Optics Letters 43 (20) (2018) p. 4949-4952, ISSN 0146-9592

Alberucci, A.; R. Barboza, C.P. Jisha, S. Nolte

Temporal dynamics of light written waveguides in unbiased liquid crystals

Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics 35 (8) (2018) p. 1878-1887, ISSN 0740-3224

Beier, F.; F. Moller, B. Sattler, J. Nold, A. Liem, C. Hupel,

S. Kuhn, S. Hein, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt,

A. Tünnermann

Experimental investigations on the TMI thresholds of low-NA Yb-doped single-mode fibers

Optics Letters 43 (6) (2018) p. 1291-1294, ISSN 0146-9592

Bergner, K.; B. Seyfarth, K.A. Lammers, T. Ullsperger, S. Döring,

M. Heinrich, M. Kumkar, D. Flamm, A. Tünnermann, S. Nolte

Spatio-temporal analysis of glass volume processing using ultrashort laser pulses

Applied Optics 57 (16) (2018) p. 4618-4632, ISSN 1559-128X

Bergner, K.; D. Flamm, M. Jenne, M. Kumkar, A. Tünnermann,

S. Nolte

Time-resolved tomography of ultrafast laser-matter interaction

Optics Express 26 (3) (2018) p. 2873-2883, ISSN 1094-4087

Bergner, K.; M. Müller, R. Klas, J. Limpert, S. Nolte,

A. Tünnermann

Scaling ultrashort laser pulse induced glass modifications for cleaving applications

Applied Optics 57 (21) (2018) p. 5941-5947, ISSN 1559-128X

Berlich, R.; S. Stallinga

High-order-helix point spread functions for monocular three-dimensional imaging with superior aberration robustness

Optics Express 26 (4) (2018) p. 4873-4891, ISSN 1094-4087

Berner, A.; E. Kasperkiewicz, Y. Zhang, H. Gross

3rd order spherochromatism surface contribution and its intrinsic and induced aberration parts

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 35 (8) (2018) p. 1368-1378, ISSN 1084-7529

Bohn, J.; T. Bucher, K.E. Chong, A. Komar, D.Y. Choi,

D.N. Neshev, Y.S. Kivshar, T. Pertsch, I. Staude

Active Tuning of Spontaneous Emission by Mie-Resonant Dielectric Metasurfaces

Nano Letters 18 (6) (2018) p. 3461-3465, ISSN 1530-6984

Bösel, C.; H. Gross

Double freeform illumination design for prescribed wavefronts and irradiances

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 35 (2) (2018) p. 236-243, ISSN 1084-7529

Breitkopf, S.; N. Lilienfein, T. Achtnich, C. Zwysig,

A. Tünnermann, I. Pupeza, J. Limpert

Velocity- and pointing-error measurements of a 300-r/min self-bearing permanent-magnet motor for optical applications

Review of Scientific Instruments 89 (6) (2018) p. 063110, ISSN 0034-6748

Chambonneau, M.; D. Richter, S. Nolte, D. Grojo

Inscribing diffraction gratings in bulk silicon with nanosecond laser pulses

Optics Letters 43 (24) (2018) p. 6069-6072, ISSN 0146-9592

Chemnitz, M.; C. Gaida, M. Gebhardt, F. Stutzki, J. Kobelke,

A. Tünnermann, J. Limpert, M.A. Schmidt

Carbon chloride-core fibers for soliton mediated super-continuum generation

Optics Express 26 (3) (2018) p. 3221-3235, ISSN 1094-4087

Chemnitz, M.; R. Scheibinger, C. Gaida, M. Gebhardt, F. Stutzki,

S. Pumpe, J. Kobelke, A. Tünnermann, J. Limpert, M.A. Schmidt

Thermodynamic control of soliton dynamics in liquid-core fibers

Optica 5 (6) (2018) p. 695-703, ISSN 2334-2536

- Devaney, N.; F. Kenny, A.V. Goncharov, M. Goy, C. Reinlein
Development of a prototype active optics system for future space telescopes
 Applied Optics 57 (22) (2018) p. E101-E106, ISSN 1559-128X
- Diener, R.; S. Nolte, T. Pertsch, S. Minardi
Effects of stress on neighboring laser written waveguides in gallium lanthanum sulfide
 Applied Physics Letters 112 (11) (2018) p. 111908, ISSN 0003-6951
- Efthimiopoulos, I.; D. Palles, S. Richter, U. Hoppe, D. Moncke, L. Wondraczek, S. Nolte, E.I. Kamitsos
Femtosecond laser-induced transformations in ultra-low expansion glass: Microstructure and local density variations by vibrational spectroscopy
 Journal of Applied Physics 123 (23) (2018) p. 233105, ISSN 0021-8979
- Faraz, T.; H.C.M. Knoop, M.A. Verheijen, C.A.A. van Helvoirt, S. Karwal, A. Sharma, V. Beladiya, A. Szeghalmi, D.M. Hausmann, J. Henri, M. Creatore, W.M.M. Kessels
Tuning Material Properties of Oxides and Nitrides by Substrate Biasing during Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition on Planar and 3D Substrate Topographies
 Acs Applied Materials & Interfaces 10 (15) (2018) p. 13158-13180, ISSN 1944-8244
- Fasold, S.; S. Linss, T. Kawde, M. Falkner, M. Decker, T. Pertsch, I. Staude
Disorder-Enabled Pure Chirality in Bilayer Plasmonic Metasurfaces
 Acs Photonics 5 (5) (2018) p. 1773-1778, ISSN 2330-4022
- Fazio, A.; D. Harries, G. Matthäus, H. Mutschke, S. Nolte, F. Langenhorst
Femtosecond laser irradiation of olivine single crystals: Experimental simulation of space weathering
 Icarus 299 (2018) p. 240-252, ISSN 0019-1035
- Füchsel, K.; J. Limpert, T. Schreiber, A. Thoss, A. Tünnermann
Workshop on next-generation optical fiber technology provides perspectives and a roadmap
 Laser Focus World 54 (1) (2018) p. 29-30, ISSN 1043-8092
- Gaida, C.; M. Gebhardt, T. Heuermann, F. Stutzki, C. Jauregui, J. Antonio-Lopez, A. Schulzgen, R. Amezcua-Correa, A. Tünnermann, I. Pupeza, J. Limpert
Watt-scale super-octave mid-infrared intrapulse difference frequency generation
 Light-science & Applications 7 (2018) p. 94, ISSN 2047-7538
- Gaida, C.; M. Gebhardt, T. Heuermann, F. Stutzki, C. Jauregui, J. Limpert
Ultrafast thulium fiber laser system emitting more than 1 kW of average power
 Optics Letters 43 (23) (2018) p. 5853-5856, ISSN 0146-9592
- Gaida, C.; T. Heuermann, M. Gebhardt, E. Shestae, T.P. Butler, D. Gerz, N. Lilienfein, P. Sulzer, M. Fischer, R. Holzwarth, A. Leitenstorfer, I. Pupeza, J. Limpert
High-power frequency comb at 2 μm wavelength emitted by a Tm-doped fiber laser system
 Optics Letters 43 (21) (2018) p. 5178-5181, ISSN 0146-9592
- Göbel, T.A.; G. Bharathan, M. Ams, M. Heck, R.G. Kramer, C. Matzdorf, D. Richter, M.P. Siems, A. Fürbach, S. Nolte
Realization of aperiodic fiber Bragg gratings with ultrashort laser pulses and the line-by-line technique
 Optics Letters 43 (15) (2018) p. 3794-3797, ISSN 0146-9592
- Gottschall, T.; T. Meyer, M. Schmitt, J. Popp, J. Limpert, A. Tünnermann
Advances in laser concepts for multiplex, coherent Raman scattering micro-spectroscopy and imaging
 Trac-trends in Analytical Chemistry 102 (2018) p. 103-109, ISSN 0165-9936
- Günther, K.; J.P. Bergmann, C. Zhang, M. Rosenberger, G. Notni
Hot Wire-Assisted Gas Metal Arc Welding of Ni-Based Hardfacing
 WELDING JOURNAL 97 (2018) p. 99-107, ISSN 0043-2296
- Heck, M.; S. Nolte, A. Tünnermann, R. Vallee, M. Bernier
Femtosecond-written long-period gratings in fluoride fibers
 Optics Letters 43 (9) (2018) p. 1994-1997, ISSN 0146-9592
- Heilmann, R.; C. Greganti, M. Grafe, S. Nolte, P. Walther, A. Szameit
Tapering of femtosecond laser-written waveguides
 Applied Optics 57 (3) (2018) p. 377-381, ISSN 1559-128X

- Heist, S.; C. Zhang, K. Reichwald, P. Kühmstedt, G. Notni, A. Tünnermann
5D hyperspectral imaging: fast and accurate measurement of surface shape and spectral characteristics using structured light
 Optics Express 26 (18) (2018) p. 23366-23379, ISSN 1094-4087
- Heist, S.; P. Dietrich, M. Landmann, P. Kühmstedt, G. Notni, A. Tünnermann
GOBO projection for 3D measurements at highest frame rates: a performance analysis
 Light-science & Applications 7 (2018) p. 71, ISSN 2047-7538
- Heuermann, T.; C. Gaida, M. Gebhardt, J. Limpert
Thulium-doped nonlinear fiber amplifier delivering 50 fs pulses at 20 W of average power
 Optics Letters 43 (18) (2018) p. 4441-4444, ISSN 0146-9592
- Heusinger, M.; D. Michaelis, T. Flügel-Paul, U.D. Zeitner
Diffuse scattering due to stochastic disturbances of 1D-gratings on the example of line edge roughness
 Optics Express 26 (21) (2018) p. 28104-28118, ISSN 1094-4087
- Hilpert, E.; J. Hartung, S. Risse, R. Eberhardt, A. Tünnermann
Precision manufacturing of a lightweight mirror body made by selective laser melting
 Precision Engineering-journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology 53 (2018) p. 310-317, ISSN 0141-6359
- Hua, Y.; W. Liu, M. Hemmer, L.E. Zapata, G.J. Zhou, D.N. Schimpf, T. Eidam, J. Limpert, A. Tünnermann, F.X. Kartner, G.Q. Chang
87-W 1018-nm Yb-fiber ultrafast seeding source for cryogenic Yb: yttrium lithium fluoride amplifier
 Optics Letters 43 (8) (2018) p. 1686-1689, ISSN 0146-9592
- Jauregui, C.; C. Stihler, A. Tünnermann, J. Limpert
Pump-modulation-induced beam stabilization in high-power fiber laser systems above the mode instability threshold
 Optics Express 26 (8) (2018) p. 10691-10704, ISSN 1094-4087
- Jauregui, C.; F. Stutzki, A. Tünnermann, J. Limpert
Thermal analysis of Yb-doped high-power fiber amplifiers with Al:P co-doped cores
 Optics Express 26 (6) (2018) p. 7614-7624, ISSN 1094-4087
- Jenne, M.; D. Flamm, T. Ouaj, J. Hellstern, J. Kleiner, D. Grossmann, M. Koschig, M. Kaiser, M. Kumkar, S. Nolte
High-quality tailored-edge cleaving using aberration-corrected Bessel-like beams
 Optics Letters 43 (13) (2018) p. 3164-3167, ISSN 0146-9592
- Jenne, M.; F. Zimmermann, D. Flamm, D. Grossmann, J. Kleiner, M. Kumkar, S. Nolte
Multi Pulse Pump-Probe Diagnostics for Development of Advanced Transparent Materials Processing
 Journal of Laser Micro Nanoengineering 13 (3) (2018) p. 273-279, ISSN 1880-0688
- Jeong, Y.G.; R. Piccoli, D. Ferachou, V. Cardin, M. Chini, S. Hädrich, J. Limpert, R. Morandotti, F. Legare, B.E. Schmidt, L. Razzari
Direct compression of 170-fs 50-cycle pulses down to 1.5 cycles with 70 transmission
 Scientific Reports 8 (2018) p. 11794, ISSN 20145-2322
- Kaiser, N.; Z.S. Wang
Special issue on optical coatings
 Advanced Optical Technologies 7 (1-2) (2018) p. 11-12, ISSN 2192-8576
- Kämmer, H.; G. Matthäus, S. Nolte, M. Chanal, O. Uteza, D. Grojo
In-volume structuring of silicon using picosecond laser pulses
 Applied Physics A-materials Science Processing 124 (4) (2018) p. 302, ISSN 0947-8396
- Kellner, T.; A. Breitbarth, C. Zhang, G. Notni
Characterizing 3D sensors using the 3D modulation transfer function
 Measurement Science and Technology 29 (3) (2018) p. 035103, ISSN 0957-0233
- Klas, R.; A. Kirsche, M. Tschernajew, J. Rothhardt, J. Limpert
Annular beam driven high harmonic generation for high flux coherent XUV and soft X-ray radiation
 Optics Express 26 (15) (2018) p. 19318-19327, ISSN 1094-4087
- Klenke, A.; M. Müller, H. Stark, A. Tünnermann, J. Limpert
Sequential phase locking scheme for a filled aperture intensity coherent combination of beam arrays
 Optics Express 26 (9) (2018) p. 12072-12080, ISSN 1094-4087

Klenke, A.; M. Müller, H. Stark, F. Stutzki, C. Hupel, T. Schreiber, A. Tünnermann, J. Limpert

Coherently combined 16-channel multicore fiber laser system

Optics Letters 43 (7) (2018) p. 1519-1522, ISSN 0146-9592

Klenke, A.; M. Müller, H. Stark, M. Kienel, C. Jauregui, A. Tünnermann, J. Limpert

Coherent beam combination of ultrafast fiber lasers

IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 24 (5) (2018) p. 0902709, ISSN 1077-260X

Kuhn, S.; S. Hein, C. Hupel, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann

Modelling the refractive index behavior of Al,P-doped SiO₂, fabricated by means of all-solution doping, in the vicinity of Al:P=1:1

Optical Materials Express 8 (5) (2018) p. 1328-1340, ISSN 2159-3930

Lin, D.K.; H.Y. Chen, Z.K. Liu, K. Dietrich, S. Kroker, T. Kaesebier, Y. Liu, E.B. Kley, Y.L. Hong

Reducing Rowland ghosts in diffraction gratings by dynamic exposure near-field holography

Optics Letters 43 (4) (2018) p. 811-814, ISSN 0146-9592

Liu, C.; H. Gross

Numerical optimization strategy for multi-lens imaging systems containing freeform surfaces

Applied Optics 57 (20) (2018) p. 5758-5768, ISSN 1559-128X

Liu, S.; A. Vaskin, S. Addamane, B. Leung, M.-C. Tsai, Y. Yang, P.P. Vabishchevich, G.A. Keeler, G. Wang, X. He, Y. Kim, N.F. Hartmann, H. Htoon, S.K. Doorn, M. Zilk, T. Pertsch, G. Balakrishnan, M.B. Sin

Light-emitting metasurfaces: simultaneous control of spontaneous emission and far-field radiation

Nano Letters 18 (11) (2018) p. 6906-6914, ISSN 1530-6984

Lechmere, F.J.F.; A.N. Fedotova, S. Liu, G.A. Keeler, G.M. Peake, S. Saravi, M.R. Shcherbakov, S. Burger, A.A. Fedyanin, I. Brener, T. Pertsch, F. Setzpfandt, I. Staude

Polarization-dependent second harmonic diffraction from resonant GaAs metasurfaces

ACS Photonics 5 (5) (2018) p. 1786-1793, ISSN 2330-4022

Matthäus, G.; H. Kammer, K.A. Lammers, C. Vetter, W. Watanabe, S. Nolte

Inscription of silicon waveguides using picosecond pulses

Optics Express 26 (18) (2018) p. 24089-24097, ISSN 1094-4087

Matz, G.; B. Messerschmidt, H. Gross

Fast and reliable reconstruction of the refractive index profile of gradient index lenses produced by ion-exchange processes

Optics Letters 43 (3) (2018) p. 407-410, ISSN 0146-9592

Müller, M.; A. Klenke, A. Steinkopff, H. Stark, A. Tünnermann, J. Limpert

3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser

Optics Letters 43 (24) (2018) p. 6037-6040, ISSN 0146-9592

Müller, R.; L. Ghazaryan, P. Schenk, S. Wolleb, V. Beladiya, F. Otto, N. Kaiser, A. Tünnermann, T. Fritz, A. Szeghalmi

Growth of Atomic Layer Deposited Ruthenium and Its Optical Properties at Short Wavelengths Using Ru(EtCp)₂ and Oxygen

Coatings 8 (11) (2018) p. 413, ISSN 2079-6412

Oberbillig, T.; N. Felde, F. Martin, L. Coriand, N. Dahms, K. Munderloh, K. Schultz, M. Fliedner, A. Duparré

Oil-Repellent Optics for Wastewater Sensor Applications

Optik & Photonik 13 (1) (2018) p. 14-18, ISSN 1863-1460

Oleszko, M.; H. Gross

Analysis of freeform mirror systems based on the decomposition of the total wave aberration into Zernike surface contributions

Applied Optics 57 (9) (2018) p. 1998-2006, ISSN 1559-128X

Paster, M.; T. Weichelt

New Illumination Technology for Mask Aligner Lithography

Optik & Photonik 13 (3) (2018) p. 25-27, ISSN 1863-1460

Pertermann, T.; J. Hartung, M. Beier, M. Trost, S. Schröder, S. Risse, R. Eberhardt, A. Tünnermann, H. Gross

Angular resolved power spectra density analysis for improving mirror manufacturing

Applied Optics 57 (29) (2018) p. 8692-8698, ISSN 1559-128X

Rizzo, R.; M. Alvaro, N. Danz, L. Napione, E. Descrovi, S. Schmieder, A. Sinibaldi, R. Chandrawati, S. Rana, P. Munzert, T. Schubert, E. Maillart, A. Anopchenko, P. Rivolo, A. Mascioletti, F. Sonntag, M.M. Ste

Bloch surface wave enhanced biosensor for the direct detection of Angiopoietin-2 tumor biomarker in human plasma

Biomedical Optics Express 9(2)2018 p. 529-542, ISSN 2156-7085

- Rizzo, R.; M. Alvaro, N. Danz, L. Napione, E. Descrovi, S. Schmieler, A. Sinibaldi, R. Chandrawati, S. Rana, P. Munzert, T. Schubert, E. Maillart, A. Anopchenko, P. Rivolo, A. Mascioletti, F. Sonntag, M.M. Ste
Bloch surface wave label-free and fluorescence platform for the detection of VEGF biomarker in biological matrices
SENSORS AND ACTUATORS B-CHEMICAL 255 (2018) p. 2143-2150, ISSN 0925-4005
- Rosenberger, M.; R. Celestre, G. Notni
Image plane moving stage for high precision multi-spectral imaging
Measurement 119 (2018) p. 85-90 , ISSN 0263-2241
- Saule, T.; M. Högner, N. Lilienfein, O. de Vries, M. Plötner, V.S. Yakovlev, N. Karpowicz, J. Limpert, I. Pupeza
Cumulative plasma effects in cavity-enhanced high-order harmonic generation in gases
Apl Photonics 3 (10) (2018) p. 101301, ISSN 2378-0967
- Schmidt, D.; G. Matthäus, S. Nolte, K. Pollok, F. Langenhorst
Laser simulated hypervelocity micrometeoroid impacts: Orientation dependent shock effects in enstatite single crystals
Meteoritics & Planetary Science 53 (2018) p. 6119-6119, ISSN 1086-9379
- Schreiber, T.; S. Kuhn, G. Feldkamp, A. Schwuchow, K. Schuster, S. Hein, R. Eberhardt, A. Tünnermann
Micro-fluorescence lifetime and spectral imaging of ytterbium doped laser materials
Optics Express 26 (25) (2018) p. 32417-32432, ISSN 1094-4087
- Schulz, U.; H. Knopf, F. Rickelt, T. Seifert, P. Munzert
Application of uracil for the preparation of low-index nanostructured layers
Optical Materials Express 8(8) (2018) p. 2182-2189, ISSN 2159-3930
- Siefke, T.; M. Heusinger, C.B.R. Hurtado, J. Dickmann, U. Zeitner, A. Tünnermann, S. Kroker
Line-edge roughness as a challenge for high-performance wire grid polarizers in the far ultraviolet and beyond
Optics Express 26 (15) (2018) p. 19534-19547, ISSN 1094-4087
- Sinibaldi, A.; A. Occhicone, A.; P. Munzert, F. Sonntag, F. Michelotti, N. Danz
Label-free monitoring of human IgG/anti-IgG recognition using Bloch surface waves on 1D photonic crystals
Biosensors 8 (3) (2018) p. 71, ISSN 2079-6374
- Sinibaldi, A.; Fieramosca, A.; Danz, N.; Munzert, P.; Occhicone, A.; Barolo, C.; Michelotti, F.
Effects of Reabsorption due to Surface Concentration in Highly Resonant Photonic Crystal Fluorescence Biosensors
Journal of Physical Chemistry C 122 (45) (2018) p. 26281-26287, ISSN 1932-7447
- Sinibaldi, A.; N. Danz, P. Munzert, F. Michelotti
Hybrid inorganic/organic photonic crystal biochips for cancer biomarkers detection
Optics and Laser Technology 102 (2018) p. 227-232, ISSN 0030-3992
- Solntsev, A.S.; P. Kumar, T. Pertsch, A.A. Sukhorukov, F. Setzpfandt
LiNbO₃ waveguides for integrated SPDC spectroscopy
Apl Photonics 3 (2) (2018) p. 021301, ISSN 2378-0967
- Steenhusen, S.; F. Burmeister, M. Gross, G. Domann, R. Houbertz, S. Nolte
Heterogeneous microoptical structures with sub-micrometer precision
Thin Solid Films 668 (2018) p. 74-80, ISSN 0040-6090
- Stihler, C.; C. Jauregui, A. Tünnermann, J. Limpert
Modal energy transfer by thermally induced refractive index gratings in Yb-doped fibers
Light-science & Applications 7 (2018) p. 59, ISSN 2047-7538
- Stihler, C.; C. Jauregui, A. Tünnermann, J. Limpert
Phase-shift evolution of the thermally-induced refractive index grating in high-power fiber laser systems induced by pump-power variations
Optics Express 26 (15) (2018) p. 19489-19497, ISSN 1094-4087
- Tadesse, G.K.; W. Eschen, R. Klas, V. Hilbert, D. Schelle, A. Nathanael, M. Zilk, M. Steinert, F. Schrepel, T. Pertsch, A. Tünnermann, J. Limpert, J. Rothhardt
High resolution XUV Fourier transform holography on a table top
Scientific Reports 8 (2018) p. 8677, ISSN 20145-2322
- Thomae, D.; T. Hönle, M. Kraus, V. Bagusat, A. Deparnay, R. Brüning, R. Brunner
Compact echelle spectrometer employing a cross-grating
Applied Optics 57 (25) (2018) p. 7109-7116, ISSN 1559-128X
- Trapp, J.M.; M. Decker, J. Petschulat, T. Pertsch, T. G. Jabbour
Design of a 2 diopter holographic progressive lens
Optics Express 26 (25) (2018) p. 32866-32877, ISSN 1094-4087

Vaskin, A.; J. Bohn, K.E. Chong, T. Bucher, M. Zilk, D.Y. Choi,
D.N. Neshev, Y.S. Kivshar, T. Pertsch, I. Staude

**Directional and spectral shaping of light emission with
Mie-resonant silicon nanoantenna arrays**

Acs Photonics 5 (4) (2018) p. 1359-1364, ISSN 2330-4022

Wengerowsky, S.; S.K. Joshi, F. Steinlechner, H. Hübel, R. Ursin
An entanglement-based wavelength-multiplexed quantum communication network

Nature 564 (7735) (2018) p. 225-228, ISSN 0028-0836

Werdehausen, D.; I. Staude, S. Burger, J. Petschulat, T. Scharf,
T. Pertsch, M. Decker

**Design rules for customizable optical materials based on
nanocomposites**

Optical Materials Express 8 (11) (2018) p. 3456-3469,
ISSN 2159-3930

Wong, E.; S. Heist, C. Bräuer-Burchardt, H. Babovsky,
R. Kowarschik

**Calibration of an array projector used for high-speed
three-dimensional shape measurements using a single
camera**

Applied Optics 57 (26) (2018) p. 7570-7578, ISSN 1559-128X

Worku, N.; R. Hambach, H. Gross

**Decomposition of an arbitrary field with smooth wave-
front to set of Gaussian beams with non-zero curvatures**

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image
Science and Vision 35 (7) (2018) p. 1091-1102,
ISSN 1084-7529

Zhong, Y.; H. Gross

**Improvement of Scheimpflug systems with freeform
surfaces**

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image
Science and Vision 57 (6) (2018) p. 1482-1491,
ISSN 1084-7529

Zhong, Y.; H. Gross

Vectorial aberrations of biconic surfaces

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image
Science and Vision 35 (8) (2018) p. 1385-1392,
ISSN 1084-7529

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
Walter Ooppel
Anne Groß
Annika Höft
Sylvia Bathke
Lara Hartung
Dr. Stephanie Hesse-Ertelt
Adlin Bruns
Peggy Stöckner
Bettina Puhlfürß

Redaktionsschluss | Editorial deadline

1.4.2019

Gestaltung | Graphic design

Walter Ooppel

Druck | Print

Förster & Borries GmbH & Co. KG
Industrierandstraße 23
08060 Zwickau
www.foebo.de

Bildnachweis | Photo Acknowledgements

Seite | page: 3: © Fotostudio Arlene Knipper

Seite | page: 23(2), 24(2), 28(2), 29(3), 30(1,2), 31(3), 36,
37, 41, 42, 43, 46(2), 47, 49, 50(1), 51, 52, 53,
54, 55, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 67, 70, 71, 72,
73, 74, 75:

© Die Autoren / the authors / Fraunhofer IOF

Seite | page: 20, 24(1), 100:

© Michael Weimer / Fraunhofer IOF

Seite | page: 22, 33(3), 34, 35, 50, 66, 92:

© Christian Süß / Fraunhofer IOF

Seite | page: 32: © Max Planck Institute for Plasma Physics

Seite | page: 91: © lightpoet / Adobe Stock

Seite | page: 101: © Fraunhofer FEP

Seite | page: 102(l): © Fraunhofer ILT

Seite | page: 102(r): © Fraunhofer IST

Seite | page: 103(l): © Fraunhofer IPM

Seite | page: 103(r): © Fraunhofer IWS

Seite | page: Titel / Cover, 4, 8, 12, 14, 16, 18, 26, 28(1),
38, 40, 45, 46(1), 48, 56, 58, 64, 68, 76, 78,
80, 82, 84, 85, 86, 88, 94, 95, 96, 106, 108,
110, 112, 114:

© Walter Ooppel / Fraunhofer IOF

