



**Fraunhofer**

**IOF**

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE OPTIK UND FEINMECHANIK IOF

**JAHRESBERICHT  
ANNUAL REPORT  
2013**



# LÖSUNGEN MIT LICHT SOLUTIONS WITH LIGHT

**DIE WELT UND DIE GESELLSCHAFT VERÄNDERN SICH HEUTE SCHNELLER DENN JE. MÄRKTE ENTWICKELN SICH DYNAMISCHER UND NEUE TECHNOLOGIEN WERDEN ZUM MOTOR STÄNDIGER VERÄNDERUNGEN. DIES IST FÜR UNS EINE HERAUSFORDERUNG UND EINE CHANCE, GANZ NACH DEM MOTTO DES DIESJÄHRIGEN PHOTONIK KONGRESSES »ZUKUNFT DENKEN – WANDEL GESTALTEN – MIT LICHT GEWINNEN«.**

Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik blickt auf ein sehr erfolgreiches und spannendes Jahr 2013 zurück. Unsere Partner aus der Wirtschaft glauben an ihre Zukunftsfähigkeit, investieren in Forschung und Entwicklung und vertrauen dabei auf die Kompetenzen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Auch 2013 wurden die Arbeiten des Instituts mit herausragenden Preisen gewürdigt. Der sichtbarste war ohne Zweifel der Deutsche Zukunftspreis, der an Prof. Dr. Stefan Nolte und seine Partner der Robert Bosch GmbH und der Trumpf Laser GmbH + Co. KG für ihre Arbeiten zum Thema »Ultrakurz-puls laser für die industrielle Massenfertigung - produzieren mit Lichtblitzen« durch den Bundespräsidenten verliehen wurde. Mit der konzentrierten Energie des Lasers lassen sich inzwischen alle Werkstoffe schnell, präzise und in hoher Stückzahl wirtschaftlich und ressourceneffizient bearbeiten. Grundlagenforschung und Entwicklung fanden in Deutschland statt, ebenso die Produktion und neue Arbeitsplätze sind hier angesiedelt. Der wirtschaftliche Nutzen kommt zu großen Teilen in Deutschland zum Tragen. Das Forscherteam um Dr. Gunther Notni und Dr. Peter Kühmstedt sowie Prof. Dr. Richard Kowarschik von der Friedrich-Schiller-Universität Jena konnte sich über den Thüringer Forschungspreis 2013 freuen. In der Kategorie Angewandte Forschung erhielt das Team die Auszeichnung für ihre Arbeiten zum Thema »Ultraschnelle Bilder in 3D«. Bereits zum zweiten Mal konnte sich das Fraunhofer IOF als »Ausgezeichneter Ort im Land der Ideen« mit dem Projekt »efficient design für Photovoltaik« behaupten.

**SOCIETY AND THE WORLD WE LIVE IN ARE CHANGING FASTER THAN EVER BEFORE. MARKETS ARE EVOLVING WITH GREAT MOMENTUM AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES ARE THE DRIVERS OF CONSTANT CHANGE. FOR US, THIS IS BOTH A CHALLENGE AND AN OPPORTUNITY, ENTIRELY IN TUNE WITH THE THEME OF THIS YEAR'S PHOTONICS CONGRESS: "THINKING THE FUTURE – SHAPING CHANGE – SUCCESS WITH LIGHT".**

The Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering can look back on an extremely successful and exciting 2013. Our partners in the business community firmly believe in their continuing viability, invest in research and development and trust in the expertise of our employees.

The work undertaken at the institute was once again the recipient of important awards in 2013. The most prominent was without doubt the German Future Prize, which went to Prof. Dr. Stefan Nolte and his partners at Robert Bosch GmbH and Trumpf Laser GmbH & Co. KG for their work on "ultrashort laser pulses for effective series production – manufacturing with light flashes" and was presented by the German President. The concentrated energy of a laser can now be used for rapid and precise processing of all types of materials, in large quantities, economically and efficiently in terms of resources. Basic research and development was undertaken in Germany; production facilities and new jobs are also located here, and to a considerable extent, the economic benefits are reaped in Germany. The research team under Dr. Gunther Notni, Dr. Peter Kühmstedt and Prof. Dr. Richard Kowarschik at the Friedrich Schiller University Jena were the delighted recipients of the Thuringian Research Award in 2013. The team received the award for its work on the topic of "ultra-fast 3D images" in the Applied Research category. For the second time, the Fraunhofer IOF upheld its status as "A Place of Excellence in the Land of Ideas" with the "efficient design for photovoltaics" project.



Ein persönliches Highlight war unter anderem die Bekanntgabe der Gewinner des Programms »Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation« vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Juli 2013. Zu den erfolgreichen Konsortien gehörte auch »3Dsensation«, in welchem das Fraunhofer IOF Konsortialführer ist. Im Moment beteiligen sich 20 Forschungseinrichtungen und über 45 Unternehmen an der Strategieentwicklung des Vorhabens und bereiten sich auf die folgende Projektphase vor. »3Dsensation« verfolgt das Ziel, die Interaktion von Mensch und Maschine grundlegend zu verändern. Der Umgang des Menschen mit Maschinen und jeglichen technischen Systemen wird natürlicher und intuitiver, sicherer und effizienter gestaltet. Voraussetzung dafür ist die vollständige Anpassung der Mensch-Maschine-Interaktion an die Bedürfnisse und die Erfahrungen des Menschen.

Im Bereich der freiformoptischen Systeme konnte das Fraunhofer IOF und seine Partner erfolgreich den regionalen Wachstumskern *fo+* etablieren. Dieser soll in den nächsten Jahren die Erforschung und Entwicklung von komplexen optischen Systemen voranbringen. Das Institut stellt sich der Herausforderung mit seinen Kompetenzen im Bereich Design, Bearbeitung, Beschichtung und Systemintegration wesentlich kleinere, leichtere und funktionalere Lösungen zu entwickeln.

Mein Dank gilt unseren Partnern in Industrie und Wissenschaft für die gute Zusammenarbeit und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, den Thüringer Ministerien für Bildung, Wissenschaft und Kultur sowie Wirtschaft, Arbeit und Technologie sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre stetige Unterstützung. Meinen besonderen Respekt, meine Anerkennung und meinen Dank verdienen meine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für ihr Engagement. Ihre hervorragenden Leistungen erlauben es uns, an Lösungen für gesellschaftlich relevante Fragestellungen zu arbeiten und »Lösungen mit Licht« zu verwirklichen.

One personal highlight was the announcement of the winners of the "Twenty20 – Partnership for Innovation" program organized by the Federal Ministry of Education and Research in July 2013. "3Dsensation", in which the Fraunhofer IOF is the consortium leader, was among the successful projects. At the present time, 20 research institutions and over 45 companies are involved in the strategic development of the scheme and are now preparing for the next phase of the project. "3Dsensation" aims to fundamentally change the way humans and machines interact, making the way humans deal with machines and all kinds of technical systems more natural and intuitive, safer and more efficient. This ambition is predicated on fully adapting human-machine interaction to the needs and experiences of humans.

In the field of freeform optical systems, the Fraunhofer IOF and its partners successfully established the regional "growth core" project *fo+*, which in coming years will advance the research and development of complex optical systems. The institute is tackling the challenge of developing much smaller, lighter, and more functional solutions with its expertise in design, processing, coating and system integration.

My thanks for fruitful collaboration go to our partners in science and industry; I am also grateful to the Federal Ministry of Education and Research, the Thuringian Ministries of Education, Science and Culture, and Business, Work and Technology and the German Research Foundation for their unfailing support. For their outstanding dedication, I further wish to express my great respect, admiration and thanks to my employees. Their outstanding work enables us to develop solutions for issues which are of relevance to society and create "solutions with light".

Andreas Tünnermann

# INHALT

<b>Das Institut im Profil</b> .....	<b>6</b>
<b>Ausgewählte Ergebnisse 2013</b> .....	<b>22</b>
<b>Optische Komponenten und Systeme</b> .....	<b>24</b>
Flachbauende Multiaperturkameras mit Freiformarrays .....	26
Glatte und facettierte Freiformen für Beleuchtungsanwendungen .....	28
Pulskompressorgitterherstellung mittels Beugungslithographie .....	30
Hocheffiziente Transmissionsgitter für das Sentinel-5 NIR-Spektrometer .....	32
Optische Effekte in der Terahertz-Tomographie .....	34
Design und Aufbau eines anamorphotischen Teleskops für Erdbeobachtung .....	36
System zur Detektion kleiner schneller Teilchen im Weltraum .....	38
Image-Slicer für das PEPSI-Instrument .....	40
Erweiterte Qualitätsanalyse symmetrie-freier Optiksysteme .....	42
Neue Werkstoffkombination für kryogene Metalloptiken .....	44
<b>Feinmechanische Komponenten und Systeme</b> .....	<b>46</b>
Herstellung hochpräziser Freiformspiegel mit MRF® .....	48
Ultra-präzise Freiformbearbeitung von Abformwerkzeugen .....	50
Gedruckte Mikropumpe für Lab-on-a-Chip Systeme .....	52
<b>Funktionale Oberflächen und Schichten</b> .....	<b>54</b>
Doppel-Strukturen zur breitbandigen Entspiegelung .....	56
Funktionale Modellschichten mit abgestuften Rauheiten .....	58
Modellierung der optischen Eigenschaften von Silberschichten .....	60
Neue Beschichtungsanlage für Hochpräzisions-XUV-Optiken .....	62
Monolithische Gitter für die Hochpräzisionsmetrologie .....	64
<b>Photonische Sensoren und Messsysteme</b> .....	<b>66</b>
In-Line 3D-Lotpastensensor .....	68
Sensoren auf Basis von Bloch Oberflächenwellen .....	70
Charakterisierung komplexer photonischer Nanomaterialien .....	72
Kompakter mehrkanaliger Sensor zur optischen Navigation .....	74
Metrologie optomechanischer Elemente mit Computertomographie .....	76
Streulichtuntersuchung von Oberflächen und Schichten im IR .....	78
<b>Lasertechnik</b> .....	<b>80</b>
Ultrakurzpuls laser für die industrielle Massenfertigung .....	82
Ultrakurzpuls laser – Strukturierung von Dünnschichtsolarmodulen .....	84
CO <sub>2</sub> -laserbasiertes Faser-Beschichtungsverfahren .....	86
Unterdrückung von Stimulierter Raman Streuung in Faserlasern .....	88
Isolierte Attosekundenpulse bei hohen Repetitionsraten .....	90
<b>Fraunhofer-Verbund Light &amp; Surface und Fraunhofer-Gesellschaft</b> .....	<b>92</b>
<b>Namen, Daten, Ereignisse</b> .....	<b>98</b>

# CONTENT

<b>Profile of the institute</b>	<b>6</b>
<b>Selected results 2013</b>	<b>22</b>
<b>Optical components and systems</b>	<b>24</b>
Thin compound eye cameras with refractive freeform arrays	26
Smooth and faceted freeforms for illumination	28
Pulse compression grating fabrication by diffractive lithography	30
High-efficiency transmission gratings for the sentinel-5 NIR-spectrometer	32
Optical effects in terahertz tomography measurements	34
Design and assembly of an anamorphic telescope for earth observation	36
Optical system for the detection of small fast particles in space	38
Image slicer for the PEPSI instrument	40
Extended analysis of optical systems free of symmetry	42
A novel approach for cryogenic metal optics	44
<b>Precision engineering components and systems</b>	<b>46</b>
Fabrication of high precision freeform mirrors with MRF®	48
Ultra-precise freeform machining of molding tools	50
Printed Micropump for Lab-on-a-Chip Systems	52
<b>Functional surfaces and layers</b>	<b>54</b>
Double-structure for wideband antireflection properties	56
Functional model coatings with graded roughness	58
Modeling the optical constants of silver films	60
New deposition system for high-precision XUV optics	62
Monolithic gratings for high-precision optical metrology	64
<b>Photonic sensors and measuring systems</b>	<b>66</b>
Inline 3D solder paste sensor	68
Bloch surface wave sensors	70
Characterization of complex photonic nanomaterials	72
Curved artificial compound eyes for autonomous navigation	74
Metrology of opto-mechanical units using computed tomography	76
Light scattering analysis of surfaces and coatings in the IR	78
<b>Laser technology</b>	<b>80</b>
Ultrashort laser pulses for effective series production	82
Ultrashort pulse laser structuring of thin-film solar modules	84
CO <sub>2</sub> -laser-based fiber coating process	86
Suppression of stimulated raman scattering in fiber lasers	88
Isolated attosecond pulses at high repetition rates	90
<b>Fraunhofer Group for Light &amp; Surface and Fraunhofer-Gesellschaft</b>	<b>92</b>
<b>Names, data, activities</b>	<b>98</b>



# DAS INSTITUT IM PROFIL

## PROFILE OF THE INSTITUTE

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

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

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

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

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

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

# KOMPETENZEN COMPETENCES

## **Design und Simulation**

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

## **Mikro- und Nanostrukturierung**

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

## **Materialien der Optik und Photonik**

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

## **Beschichtung und Oberflächenfunktionalisierung**

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

## **Ultrapräzisionsbearbeitung**

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

## **Design and simulation**

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

## **Micro- and nanostructuring**

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

## **Optics and photonics materials**

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

## **Coating and surface functionalization**

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

## **Diamond-based ultra-precision processing**

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



beitung von Metall-, Kristall- und Kunststoffoptiken für die Anwendung im Wellenlängenbereich von 14  $\mu\text{m}$  bis 13,5 nm.

### **Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung**

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

### **Mikromontage und Systemintegration**

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

### **Laserentwicklung und nichtlineare Optik**

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

### **Messverfahren und Charakterisierung**

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

### **Materials processing using ultrashort laser pulses**

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

### **Micro-assembly and system integration**

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

### **Laser development and non-linear optics**

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




### **Measurement methods and characterization**

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

# ORGANISATION ORGANIZATION











## HEAD OF INSTITUTE

 <b>Director</b> Prof. Dr. Andreas Tünnermann	 <b>Deputy Director</b> Prof. Dr. Norbert Kaiser	 <b>Consultant</b> Prof. Dr. Wolfgang Karthe
--	---	---




## ADMINISTRATION

 <b>Administration</b> Elke Heuer	 <b>Strategy, Marketing, Coordination</b> Dr. Kevin Füchsel
---	--

## COMPETENCES

 <b>Design and Simulation</b> Prof. Dr. Herbert Gross	 <b>Micro and Nano-structuring</b> Dr. Ernst-Bernhard Kley	 <b>Coating and Surface Functionalization</b> Prof. Dr. Norbert Kaiser	 <b>Micro-Assembly and System Integration</b> Dr. Erik Beckert
 <b>Diamond-Based Ultra-Precision Processing</b> Dr. Stefan Risse	 <b>Laser Development and Non-Linear Optics</b> Prof. Dr. Jens Limpert	 <b>Materials processing using ultrashort laser pulses</b> Prof. Dr. Stefan Nolte	 <b>Measurement Methods and Characterization</b> Dr. Gunther Notni

## BUSINESS FIELDS

 <b>Optical Components and Systems</b> Dr. Andreas Bräuer	 <b>Precision Engineering Components and Systems</b> Dr. Ramona Eberhardt	 <b>Functional Optical Surfaces and Layers</b> Prof. Dr. Norbert Kaiser	 <b>Photonic Sensors and Measuring Systems</b> Dr. Gunther Notni
--	--	--	---

## STRATEGIC PROJECTS

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

# KURATORIUM ADVISORY COMMITTEE



Technical Services  
Wieland Stöckl



Optics and Photonics  
Materials  
Prof. Dr. Thomas  
Pertsch



Lasers  
Prof. Dr. Stefan  
Nolte

fo+  
Freeform Optics Plus

Dr. Ramona  
Eberhardt



## VORSITZENDER | CHAIR

- Dr. Michael Mertin | JENOPTIK AG, Jena

## MITGLIEDER | MEMBERS

- Christian Amann | BMW Group, München
- Dr. Klaus Bartholmé | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena
- Petra Bogdanski | Mahr GmbH, Jena
- Dr. Hans Eggers | Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
- Dipl.-Ing. Robert Fetter | Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Erfurt
- Dr. Roland Langfeld | Schott AG, Mainz
- Dr. Mario Ledig | Qioptiq Photonics GmbH & Co KG, Feldkirchen
- Manfred Lieke | Astrium GmbH Satellites, 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
- Dr. Berit Wessler | OSRAM GmbH, München
- Dr. Werner Wilke | VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

## EHRENMITGLIEDER | HONORARY MEMBERS

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

# DAS INSTITUT IN ZAHLEN

## THE INSTITUTE IN FIGURES

### Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2013 ist gegenüber dem Vorjahr um 6,2% gewachsen, wobei die Aufwendungen für Personal stärker (10,4%) anstiegen als die Sachausgaben (2,5%). Basis der erfolgreichen Entwicklung ist der hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag erreichte mit über 11 Millionen Euro abermals den höchsten Wert seit der Institutsgründung. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erhöhten sich ebenfalls deutlich (10,5%).

### Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2013 wurden insgesamt 6,3 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

### Personal

Mit dem Anwachsen des Betriebshaushaltes konnten auch 2013 neue Arbeitsplätze geschaffen werden. So wuchs die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter und Doktoranden gegenüber 2012 um 10,2%, die Zahl der technischen Mitar-

### Operating budget

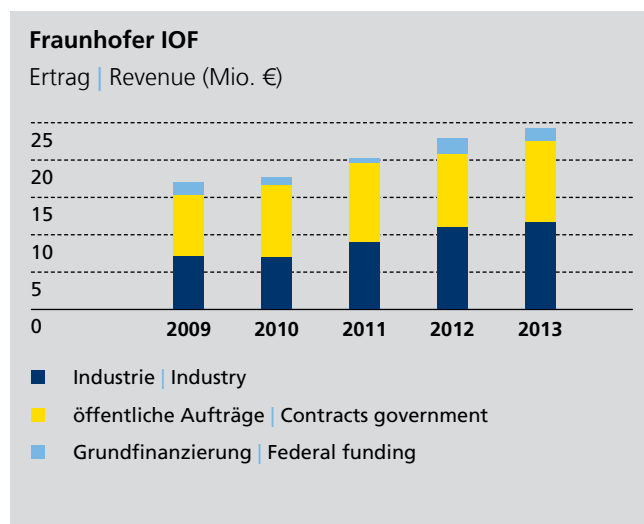
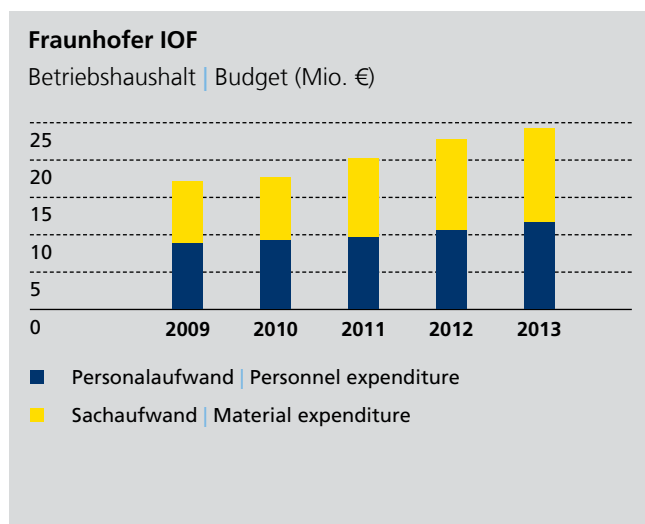
Compared with the previous year the operating budget increased in 2013 by 6.2%, with expenditure for staff rising more (10.4%) than material costs (2.5%). The basis of this successful development is the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached with more than 11 million euros again the highest value in the history of the institute. The received public funding also increased significantly (10.5%).

### Investments

The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 6.3 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2013.

### Staff

The increase in operating budget enabled the creation of further new jobs in 2013. The number of research assistants and doctoral candidates has risen by 10.2% compared to 2012, the number of technical assistants has grown by



beiter wurde um 16.6% erhöht. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Fachhochschule Jena.

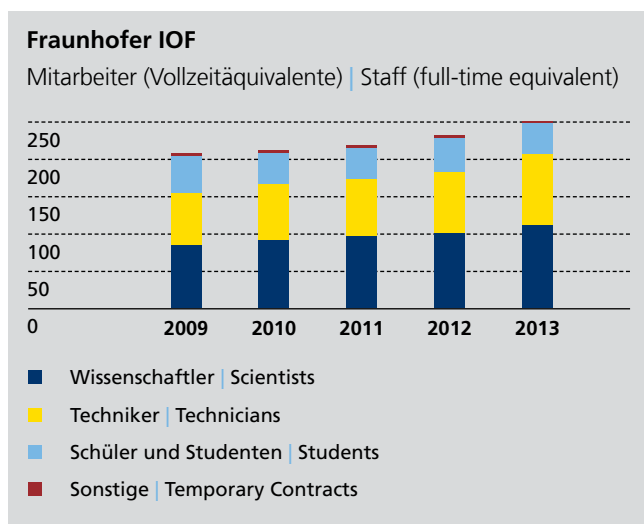
### Das FSU-IAP 2013 in Zahlen

Die Mitarbeiter des IAP konnten für 2013 Drittmittel in Höhe von 11,0 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2013 7 Professoren, 34 wissenschaftliche und 18 technische Mitarbeiter sowie 103 Doktoranden und 68 Studenten. Eine Übersicht der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

16.6%. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher education, in particular the Friedrich Schiller University Jena and the University of Applied Sciences Jena.

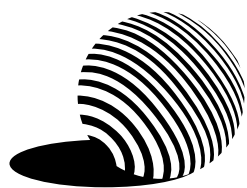
### The FSU-IAP in figures 2013

Employees at IAP acquired external funds worth 11.0 million euros in 2013 (see table). A total staff of 7 professors, 34 research assistants, 18 technical assistants, 103 doctoral candidates and 68 students were working at the IAP in 2013. The summary of completed theses are listed in the attachment.



**FSU-IAP**  
Drittmittelleinnahmen IAP 2013 | Contract research revenue IAP 2013

Fördergeber   Contracts with	Zuwendung   Funds   T€
BMBF	6.074
DFG	868
EU	338
Thüringen   Thuringia	1.353
Stiftungen   Foundations	633
Industrie   Industry	1.768



**3D**sensation

*Mensch · Maschine · Umwelt · ZUKUNFT*



# INNOVATIONSALLIANZ 3Dsensation

## 3Dsensation INNOVATION ALLIANCE

Die Innovationsallianz 3Dsensation verfolgt das Ziel, die Interaktion von Mensch und Maschine grundlegend zu verändern. Der Umgang des Menschen mit Maschinen und jeglichen technischen Systemen soll natürlicher und intuitiver, sicherer und effizienter gestaltet werden. Voraussetzung dafür ist die vollständige Anpassung der Mensch-Maschine-Interaktion an die Bedürfnisse und die Erfahrungen des Menschen.

Die Bundesministerin für Forschung und Bildung, Prof. Dr. Johanna Wanka hat die Innovationsallianz 3Dsensation unter Führung des Fraunhofer IOF am 18. Juli 2013 als einen der Gewinner des Wettbewerbs »Zwanzig20 - Partnerschaft für Innovation« bekannt gegeben.

Am Konsortium 3Dsensation beteiligen sich aktuell 20 Forschungsinstitute und über 45 Unternehmen, darunter 30 kleine und mittelständische Unternehmen. Die Allianz 3Dsensation bezieht Arbeits- und Kreativwissenschaften, Kognitions- und Neurowissenschaften, Natur- und Technikwissenschaften, Rechts- und Sozialwissenschaften ein und verfolgt so einen transdisziplinären, intersektoralen Ansatz.

In der Produktion ermöglicht 3Dsensation die Symbiose von Mensch und Maschine mit Hilfe von Robotern, die auf der Basis des 3D-Sehens eine sichere Umgebung für Menschen in Fertigungsprozessen gewährleisten. Durch die 3D-Erfassung und Analyse von Mimik, Gestik und Bewegung zur Steuerung von Assistenzsystemen verbessert 3Dsensation die Gesundheitsversorgung und garantiert Selbstbestimmung bis ins hohe Alter. 3Dsensation ermöglicht individuelle Mobilität unabhängig von gesundheitlichen und altersbedingten Beeinträchtigungen in urbanen und ländlichen Räumen durch Kopplung von 3D-Daten mit Assistenzsystemen. Für Menschen in einem urbanen Umfeld schafft 3Dsensation individuelle Sicherheit durch die autonome erfahrungsbasierte 3D-Analyse von Merkmalen und Bewegungsabläufen zur Identifikation von Auffälligkeiten und Gefahren.

The 3Dsensation innovation alliance aims to fundamentally change the way humans and machines interact. The way humans deal with machines and all kinds of technical systems will become more natural and intuitive, safer and more efficient. This ambition is predicated on fully adapting human-machine interaction to the needs and experiences of humans.

The Federal Minister for Education and Research, Prof. Dr. Johanna Wanka, announced the 3Dsensation innovation alliance, under the leadership of the Fraunhofer IOF, as one of the winners of the "Twenty20 – Partnership for Innovation" competition on July 18, 2013.

At the present time, 20 research institutes and over 45 companies, including 30 small and medium-sized enterprises, are members of the 3Dsensation consortium. The 3Dsensation alliance incorporates ergonomics and creative sciences, cognitive sciences and neurosciences, natural and technical sciences, jurisprudence and social sciences, thereby adopting an interdisciplinary, intersectoral approach.

In production, 3Dsensation enables a symbiosis of human and machine with the help of robots which ensure a safe environment for humans in manufacturing processes on the basis of 3D vision. With 3D capture and analysis of facial expressions, gestures and motions to control assistance systems, 3Dsensation improves healthcare and guarantees self-determination into old age. 3D sensation makes private mobility possible irrespective of health and age-related impairments in urban and rural areas by coupling 3D data with assistance systems. For humans in the urban environment, 3Dsensation creates personal safety with its autonomous experience-based 3D analysis of characteristics and motion sequences to identify striking features and risks.

**LEFT** 3Dsensation – Sichere Produktionsabläufe durch hochdynamische 3D-Vermessungssysteme. | 3Dsensation – Safe production processes with highly dynamic 3D measurement systems.



**DEUTSCHER ZUKUNFTSPREIS**  
Preis des Bundespräsidenten  
für Technik und Innovation





# DEUTSCHER ZUKUNFTSPREIS 2013

## GERMAN FUTURE PRIZE 2013

Moderne Lasersysteme bieten für viele Einsatzfelder faszinierende Möglichkeiten, da die Beherrschung dieser Lichtquellen immer besser gelingt. Ein Forscherteam hat jetzt Ultrakurz-puls-laser zu neuen Höchstleistungen geführt und damit zu einem erfolgreichen Werkzeug der industriellen Serienproduktion gemacht. Normale Industrielaser schmelzen das bearbeitete Material auf, was zu aufwendiger Nachbearbeitung führen kann. Der Ultrakurzpulslaser kann dagegen Schichten von wenigen Nanometern Dicke abtragen, ohne dass das bearbeitete Material Hitzeschäden erleidet. »Durch die geschickte Wahl von Pulsdauer, Pulsenergie und Fokussierung wird das Material so schnell und stark erhitzt, dass es direkt verdampft«, beschreibt Prof. Dr. Stefan Nolte den besonderen Vorteil des Verfahrens. Diese Technologie lässt sich so präzise handhaben, dass man damit sogar Gravuren auf Streichholzköpfe legen kann, ohne dass diese entflammen. Der universell einsetzbare Laser bohrt, schneidet, strukturiert oder fräst beliebige Formen. Von Diamanten über harte Gläser, Stahl und Halbleiter bis hin zu Keramiken und empfindlichsten Kunststoffen – die innovative Technik erlaubt es, fast alle Materialien berührungslos zu bearbeiten.

Prof. Dr. Stefan Nolte vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF hat zusammen mit Forschern der Robert Bosch GmbH und der TRUMPF Laser GmbH + Co. KG derartige Systeme für den industriellen Einsatz verfügbar gemacht. Schon jetzt werden damit z. B. extrem feine Düsen für Benzin-Direkteinspritzventile und besonders verträgliche Stents für die Gefäßchirurgie gefertigt oder gehärtetes Glas für Displays in Smartphones geschnitten. Für die herausragenden Arbeiten zum Thema »Ultrakurzpulslaser für die industrielle Massenfertigung - produzieren mit Lichtblitzen« hat Bundespräsident Joachim Gauck dem Forscherteam den Deutschen Zukunftspreis 2013 verliehen. Mit Prof. Dr. Stefan Nolte und Dr. Andreas Bräuer, welche 2007 mit dem Deutschen Zukunftspreis zum Thema »Licht aus Kristallen – Leuchtdioden (LEDs)« geehrt wurde, freut sich das Fraunhofer IOF das zweite Mal über diese Auszeichnung seiner Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Modern laser systems offer fascinating possibilities for a wide range of applications, as control of these light sources is becoming increasingly refined. A team of researchers have now achieved new heights of performance with ultrashort pulse lasers, thereby making them a key tool of industrial volume production. Normal industrial lasers fuse the processed material, which can result in complex subsequent finishing. By contrast, the ultrashort pulse laser can ablate layers only a few nanometers thick without the processed material sustaining heat damage. "A smart choice of pulse duration, pulse energy and focusing allow the material to be heated so quickly and strongly that it directly vaporizes," says Prof. Dr. Stefan Nolte, explaining the particular advantage of the method. The technology can be handled so precisely that even match heads can be engraved without igniting. The universal laser drills, cuts, structures and mills all kinds of forms and shapes. From diamonds via hard glass, steel and semiconductors to ceramics and the most sensitive plastics – the innovative technology makes non-contact processing of almost any material possible.

Together with researchers from Robert Bosch GmbH and TRUMPF Laser GmbH & Co. KG, Prof. Dr. Stefan Nolte from the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF has made these systems available for industrial use. Right now, they are being used to manufacture extremely fine nozzles for gasoline direct injection valves and particularly tolerable stents for vascular surgery or to cut toughened glass for smartphone displays. German President Joachim Gauck presented the research team with the German Future Prize 2013 for its outstanding work on the topic of "ultrashort laser pulses for effective series production – manufacturing with light flashes". Together with Prof. Stefan Nolte and Dr. Andreas Bräuer, who were previously honored with the German Future Prize for their work on "light from crystals – light-emitting diodes (LEDs)" in 2007, the Fraunhofer IOF is delighted to be the recipient of this award recognizing its research and development work for the second time.

**LEFT** Dr. Jens König, Prof. Dr. Stefan Nolte & Dr. Dirk Sutter

**GREEN**   
**PHOTONICS**  
FRAUNHOFER-INNOVATIONSClUSTER



# INNOVATIONSCLUSTER GREEN PHOTONICS

## INNOVATION CLUSTER GREEN PHOTONICS

Dem effizienten und schonenden Umgang mit Energie und Ressourcen durch die nachhaltige Nutzung von Licht widmen sich die Forschungsthemen des Fraunhofer-Innovationsclusters »Green Photonics«. An diesem Cluster sind neben dem Fraunhofer IOF weitere regionale und überregionale Forschungseinrichtungen und Unternehmen beteiligt, die die Anwendung von Licht für die Bereiche CO<sub>2</sub>-neutrale Energiewandlung, ressourceneffiziente Produktion, Schonung der Umwelt und sichere Ernährung und Trinkwasserversorgung vorantreiben. Mit diesen Schwerpunkten adressiert der Cluster internationale Wachstumsmärkte, die für die deutsche Industrie von hoher Bedeutung sind. Beispiele dafür sind energiesparende LED-Leuchten, neuartige energieeffiziente Solarzellen, hochpräzise optische Mess- und Analyseverfahren oder die gezielte Beeinflussung von Material- und Oberflächeneigenschaften zur Verringerung des Energie- und Ressourcenverbrauchs, wie z.B. in modernen Verbrennungsmotoren.

### »Nachwuchspreis Green Photonics«

Im Jahr 2013 hat die Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen des Innovationsclusters »Green Photonics« mit Unterstützung der Robert Bosch GmbH, des Vereins Deutscher Ingenieure und der Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen (STIFT) bereits zum zweiten Mal den »Nachwuchspreis Green Photonics« vergeben. Der Preis ging an junge Forscherinnen und Forscher der Ingenieur-, Natur- oder Wirtschaftswissenschaften, die sich in ihren Abschlussarbeiten mit der nachhaltigen Nutzung von Licht befasst haben. Ausschlaggebend für eine Prämierung war neben der wissenschaftlichen Qualität auch die Anwendungsrelevanz der Arbeiten.

Erste Preise erhielten Herr André Eberhardt für seine Masterarbeit mit dem Thema Entwicklung eines preisgünstigen, photometrischen Gassensors zur Bestimmung des CO/CO<sub>2</sub>-Gleichgewichts in der Roheisenherstellung und Frau Dr. Sarah Maria Falke für ihre Dissertation mit dem Thema Untersuchung der primären Prozesse der Licht-Strom-Wandlung in Materialien der organischen Photovoltaik.

The research themes of the Fraunhofer innovation cluster "Green Photonics" are dedicated to the efficient and sustainable use of energy and resources through the sustainable usage of light. The cluster involves, besides the Fraunhofer IOF, further regional and national research institutes and companies. The participating organizations develop applications in the areas of CO<sub>2</sub> neutral energy conversion, resource-efficient production, protection of the environment, as well as safe food and drinking water supply. These applications address international growth markets that are of high priority for the German industry. Examples include energy-saving LED lights, new energy-efficient solar cells, high-precision optical measurement and analysis methods, and the specific manipulation of material and surface properties to reduce energy and resource consumption such as in modern combustion engines.

### "Young talent award Green Photonics"

In 2013, Fraunhofer awarded the "Young talent award Green Photonics" for the second time in context of the innovation cluster "Green Photonics" with support by the Robert Bosch GmbH, the Association of German Engineers and the Foundation for Technology, Innovation and Research Thuringia. The prize was awarded to researchers in engineering, natural sciences and economics, who have dedicated their theses to the sustainable usage of light. The factor for winning an award was the application relevance of the work in addition to the scientific quality.

There were two first award winners. Mr. André Eberhardt were awarded for his master's thesis about the development of an inexpensive, photometric gas sensor for determining the CO/CO<sub>2</sub>- equilibrium in the production of pig iron and Dr. Sarah Maria Falke were awarded for her dissertation about the examination of the primary processes of light-to-current conversion in organic materials for photovoltaics.

**LEFT** *GreenTech-Projekt »HOBAS«: Justierdrehmaschine für asphärische Linsen. | GreenTech-Project "HOBAS": Lens centering machine for aspherical lenses.*

# NACHWUCHSFÖRDERUNG PROMOTING YOUNG TALENTS



### **Photonik-Akademie am Fraunhofer IOF**

Vom 17. bis 22. März 2013 fand in Jena die Photonik-Akademie statt, bei der sich 35 Studierende rund um das Thema »Lösungen mit Licht – optische Systemtechnik in Industrie und Produktion« informieren konnten. Veranstalter waren das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Fraunhofer IOF als Gastgeber. In Praxisworkshops, Vorträgen, Exkursionen (u.a. zu Zeiss und Jenoptik) und Treffen mit Vertretern der Photonik-Branche hatten die Teilnehmer die Möglichkeit, das Themenfeld intensiv kennenzulernen. Ein Highlight der Photonik-Akademie war das dreiteilige Praktikum, welches am Fraunhofer IOF und dem IAP der FSU Jena stattfand. Von der Berechnung komplexer optischer Systeme am Computer, über den Bau bis hin zur Vermessung der selbstgebauten Teleskope, lernten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die optische Systemtechnik durch das »Selber-Machen« kennen.

### **Bauen und Programmieren mit Roberta®**

Ziel der Roberta®-Initiative ist es, Mädchen und Jungen nachhaltig für Informatik, Technik und Naturwissenschaften zu begeistern. Ihnen werden Roboterkurse mit dem LEGO Mindstorms Baukastensystem angeboten, um einen praktischen Einstieg in die Thematik zu bekommen. Das Fraunhofer IOF hat daher zum »Forsche Schüler Tag« des Beutenberg Campus und zur Langen Nacht der Wissenschaften in Jena Roberta®-Workshops angeboten, die auf eine sehr positive Resonanz bei Schülern aller Altersklassen gestoßen sind.

### **Schüler- und Studentengruppen am IOF**

Im Rahmen der Nachwuchsarbeit freute sich das Institut auch 2013 über die zahlreichen Schüler- und Studentengruppen, welche den Weg zum Fraunhofer IOF gefunden haben. Diese konnten sich über das Haus und die aktuellen Forschungsthemen informieren, ihr Wissen über Licht und Optik vertiefen und einen ersten Einblick in die Laborarbeit gewinnen. Darüber hinaus bestand die Möglichkeit sich über Angebote zu Praktika, Abschlussarbeiten und Karrieremöglichkeiten zu informieren.

### **Photonics Academy at the Fraunhofer IOF**

The Photonics Academy was held in Jena from March 17 to 22, 2013, at which 35 students found out about the topic of "Solutions with light – optical systems engineering in industry and production". The Fraunhofer IOF hosted the academy, which was organized by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). In practical workshops, lectures, field trips (including to Zeiss and Jenoptik), and meetings with representatives of the photonics industry, the participants had the opportunity to experience the topic at first-hand. A highlight of the Photonics Academy was the three-part internship which took place at the Fraunhofer IOF and the IAP. From the computation of complex optical systems to the construction and characterization of telescopes, the participants learned optical systems engineering personally by "doing it themselves".

### **Building and Programming with Roberta®**

The aim of the Roberta® initiative is to create sustained interest and motivate girls and boys to take up computer science, technology and natural sciences. They are offered a practical introduction to the subject by robot courses with the LEGO Mindstorms kit. The Fraunhofer IOF has therefore offered Roberta® workshops at the "Forsche Schüler Tag" on the Beutenberg Campus and on the Long Night of Sciences in Jena, which met with a very positive response from students of all ages.

### **Student Groups at the IOF**

In 2013, many groups of elementary and high school students again found their way to the Fraunhofer IOF to learn about the institute and current research topics. The student groups were able to deepen their knowledge of light and optics through experiments and gain a first insight into laboratory work. Students from various universities and colleges found out about current research projects at the institute, as well as the range of internships, academic theses and career opportunities available.

# AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2013

## SELECTED RESULTS 2013



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

Das Fraunhofer IOF zählt zu den führenden und richtungweisenden Forschungseinrichtungen für Photonik und optische Systemtechnik in Europa. Auf der Grundlage wissenschaftlich exzellenten Handelns in Kernkompetenzfeldern gestaltet es maßgeblich die zukünftigen Entwicklungen in Optik und Feinwerktechnik. Herausragende Ergebnisse der Grundlagenforschung sowie strategische Kooperationen mit Partnern aus der Industrie belegen die Forschungsstärke des Fraunhofer IOF. Die Arbeiten erfolgen sowohl im Rahmen öffentlich finanzierter Vorlaufforschung als auch im direkten Auftrag der Wirtschaft.

Ausgewählte Forschungsergebnisse sind auf den folgenden Seiten dargestellt. Diese wurden im vergangenen Jahr in internen Projekten oder gemeinsam mit Partnern und Auftraggebern erzielt. Die dargestellten Beispiele zeigen Lösungen für die Geschäftsfelder:

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

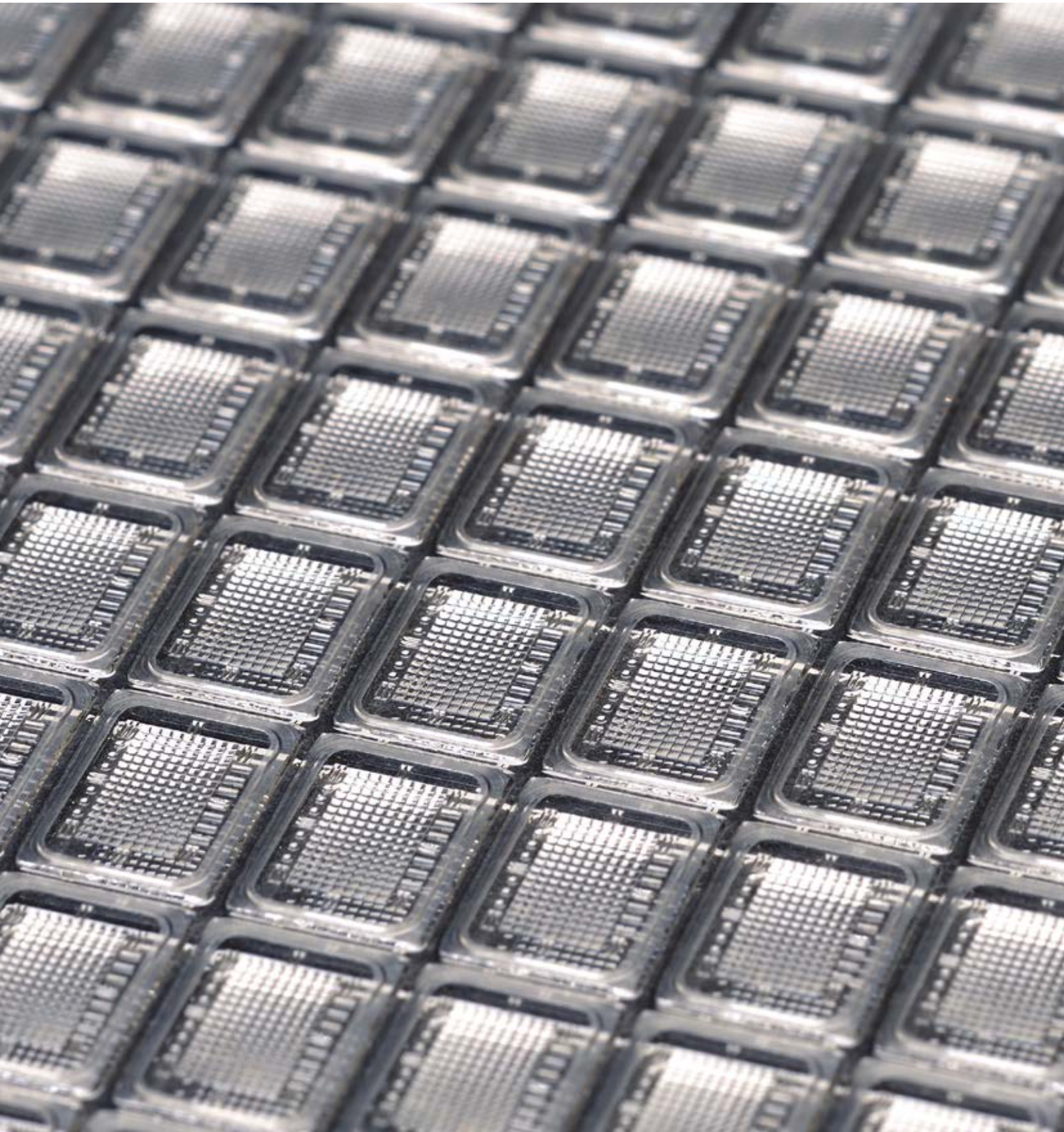
The Fraunhofer IOF develops innovative solutions with light for the cutting-edge fields of energy, environment, information, communication, health, production, security, and mobility. In close cooperation with the Institute of Applied Physics at the Friedrich Schiller University Jena, it combines applied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

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

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

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

**GESCHÄFTSFELD**  
**BUSINESS FIELD**





# OPTISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME

## OPTICAL COMPONENTS AND SYSTEMS

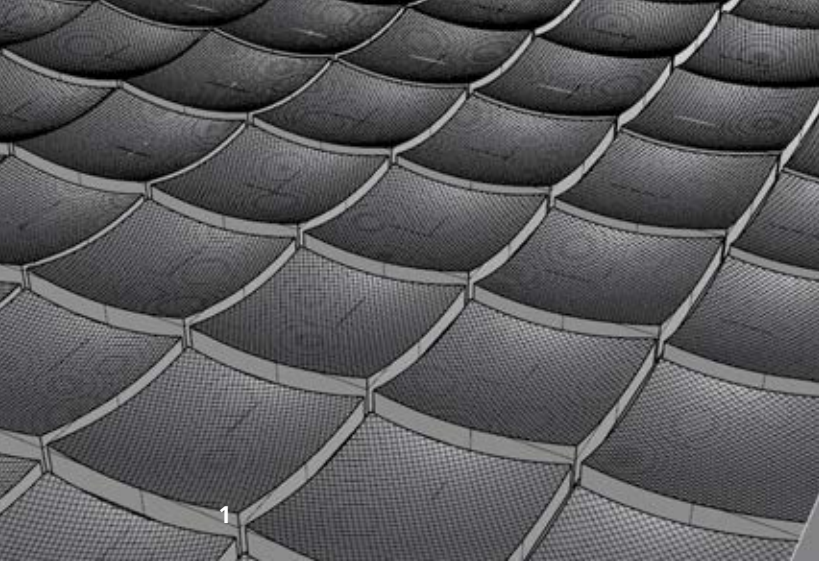
Das Fraunhofer IOF entwickelt kundenspezifische optische und mikrooptische Komponenten, Subsysteme und Systeme für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche. Alleinstellungsmerkmal ist dabei die Beherrschung der kompletten Prozesskette – vom Design über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung – sowie die Bereitstellung von klassischen Bearbeitungsverfahren als auch von Laser-, Photo- und Elektronenstrahlolithographie. So werden unter anderem metalloptische Komponenten und Systeme für Objektive, Teleskope und Spektrometer entwickelt. Für die Herstellung von sphärischen, asphärischen und freiform-optischen Komponenten und Subsystemen werden unterschiedliche Varianten der Ultrapräzisionsbearbeitung eingesetzt. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung und Herstellung von ein- und doppelseitigen refraktiven Mikrolinsenarrays (homogen, gechirpt, Freiformen) sowie von diffraktiven mikrooptischen Bauelementen (Gitter und CGH) mit Hilfe lithographischer Technologien.

Neuartige Berechnungs- und Bewertungsalgorithmen für optische Systeme, neue kryogene Werkstoffe für Metalloptiken, mikrooptische Freiformoptiken auf Waferlevel, lithographisch hergestellte Kompressionsgitter für Kurzpulslaser, sowie verschiedene optische Systeme und Komponenten für Weltraumanwendungen – wie zum Beispiel Sensoren zur Teilchendetektion im Weltraum, Spektrometergitter oder Image Slicer für Satelliteninstrumente - zeigen die Bandbreite der Projekte, die 2013 in diesem Geschäftsfeld abgeschlossen werden konnten.

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

Novel calculation and evaluation algorithms for optical systems, new cryogenic materials for metal optics, micro-optical freeform optics at wafer level, lithographically produced compression gratings for short pulse lasers, and various optical systems and components for space applications – such as sensors for particle detection in space, spectrometer grating or image slicers for satellite instruments – show the range of projects that were completed in this business field in 2013 .

**LEFT** *Refraktive Freiform-Mikrolinsenarrays per Step-and-Repeat in ORMOCOMP abgeformt. | Refractive free form microlens array molded into ORMOCOMP by step and repeat.*



## FLACHBAUENDE MULTIAPERTURKAMERAS MIT FREIFORMARRAYS THIN COMPOUND EYE CAMERAS WITH REFRACTIVE FREEFORM ARRAYS

Multiaperturkameras ermöglichen ultraflache Abbildungssysteme und können kosteneffizient im Vielfachnutzen auf Wafer Maßstab hergestellt werden. Diese erlauben aufgrund ihres Abbildungsprinzips eine Halbierung der Bauhöhe im Vergleich zu miniaturisierten Einzelaperturkameras vergleichbarer Abbildungsleistung /1/.

Damit derartige Abbildungssysteme zukünftig auch in Anwendungen der Konsumelektronik einsetzbar sind, werden großserientaugliche und kosteneffiziente Herstellungsprozesse benötigt. Die Grundlage bilden hierbei UV-Replikationsprozesse im Wafer Maßstab. Zur Herstellung der dazu benötigten Masterwafer, die als Kopiervorlagen dienen, wurde bisher die Schmelzlinzentechnologie /2/ eingesetzt. Die erzeugbare Geometrie der Einzellinsen innerhalb eines Mikrolinsenarrays ist damit auf sphärische, zylindrische und elliptische Linsen beschränkt, was die Korrektur von Abbildungsfehlern und mithin die erzielbare Auflösung des Objektivs begrenzt. Um eine weitere Steigerung der Abbildungsleistung zu erzielen, müssen refraktive Freiformarrays (Abb. 1) anstelle konventioneller Mikrolinsenarrays verwendet werden. Aufgrund ihrer asphärischen und asymmetrischen Oberflächengeometrie sind diese Elemente nicht mehr über ein Schmelzlinzenverfahren erzeugbar.

Artificial compound eye cameras enable the realization of ultra-flat imaging systems on wafer scale. Based on their imaging principle, they permit a reduction in thickness by a factor of two in comparison to single aperture objectives with comparable optical performance /1/.

Low cost fabrication technologies are needed in order to use these systems in high volume markets such as consumer electronics. Fabrication is therefore based on a UV-replication process. Reflow of photoresist /2/ is applied to generate master wafers that can be used to subsequently replicate optics wafers. Due to physical limitations, only spherical and ellipsoidal lens shapes are achievable. Consequently, the potential for correcting optical aberrations is restricted, leading to limited image quality and resolution. In order to further enhance the imaging performance, the use of refractive freeform arrays instead of conventional micro lens arrays is inevitable. Due to the non-symmetrical and aspherical surface shape of the single lens segments, fabrication by the reflow of photoresist is no longer possible.

A new fabrication approach based on a step and repeat process /3/ was therefore developed. This technology enables the replication of a single refractive freeform array fabricated

1 *Ausschnitt eines refraktiven Freiformarrays. | Lens segments of refractive freeform array.*

2 *Metallmaster eines refraktiven Freiformarrays hergestellt mittels Ultrapräzisionsbearbeitung. |*

*Master of a single refractive freeform array fabricated by an ultra-precise machining process.*

Als neuer Ansatz zur Herstellung der Masterwafer für refraktive Freiformarrays wurde daher ein Step&Repeat Verfahren entwickelt /3/. Dieses ermöglicht es, ein einzelnes Freiformarray (Abb. 2), welches zuvor mittels Ultrapräzisionsbearbeitung hergestellt wird, mehrere hundert Mal auf einem 8" Glassubtrat zu replizieren. Im Prozess unvermeidbar auftretende Formabweichungen infolge von Schwindungseffekten der verwendeten Polymere werden dabei durch ein angepasstes Belichtungsregime in Verbindung mit einer aktiven Kompensationsbewegung des Stempelwerkzeuges minimiert. Die bisher gefertigten Masterwafer ermöglichen die parallele Replikation von 253 Freiformarrays. Diese selbst bestehen aus 135 Einzellinsen mit einer Periode von ca. 500  $\mu\text{m}$  und Pfeilhöhen bis 160  $\mu\text{m}$ .

#### Literatur / References

/1/ Brückner, A., Duparré, J., Leitel, R., Dannberg, P., Bräuer, A., Tünnermann, A.: Thin wafer-level camera lenses inspired by insect compound eyes, *Optics Express*, 18, pp. 24379-24394, (2010).

/2/ Leitel, R., Dannberg, P., Brückner, A., Bräuer, A.: Recent developments in wafer-level fabrication of micro-optical multi-aperture imaging system, in *Proc. SPIE 8167 Optical Design and Engineering IV*, (2011).

/3/ Dunkel, J., Wippermann, F., Brückner, A., Reimann, A., Bräuer, A.: Fabrication of an array like freeform molding tool for UV-replication using a step and repeat process, in *Proc. SPIE 8763, Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI*, (2013).

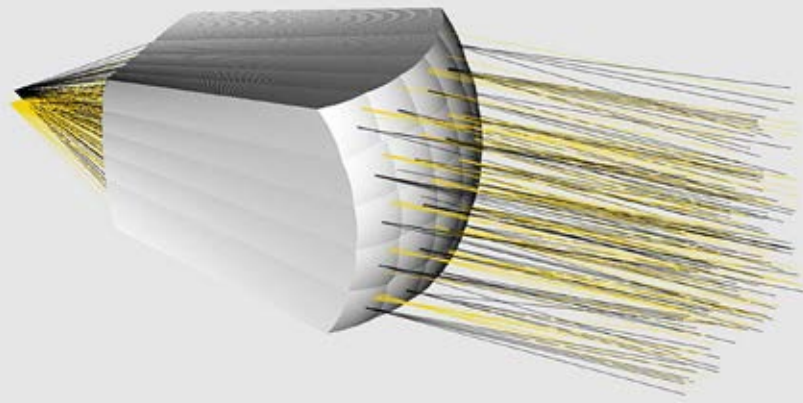
by an ultra-precision machining process several hundred times on an 8 inch glass wafer. Inevitable surface deviations are minimized by a carefully adopted exposure strategy in combination with an active movement of the stamp. Current 8" masters permit the replication of 253 single freeform arrays in parallel. The arrays themselves consist of 135 single lenslets with a pitch of 500  $\mu\text{m}$  and sag heights up to 160  $\mu\text{m}$ .

#### AUTHORS

Jens Dunkel  
Andreas Brückner  
Andreas Reimann  
Frank Wippermann  
Andreas Bräuer

#### CONTACT

Jens Dunkel  
Phone +49 3641 807-392  
jens.dunkel@iof.fraunhofer.de



## GLATTE UND FACETTIERTE FREIFORMEN FÜR BELEUCHTUNGSANWENDUNGEN SMOOTH AND FACETED FREEFORMS FOR ILLUMINATION

Die Freiformoptik ist gegenwärtig ein sich rasant entwickelndes Gebiet sowohl in Hinblick auf wissenschaftliche Forschung als auch industrielle Anwendung. Der Einsatz von Freiformen ermöglicht einerseits die Zusammenführung mehrerer Funktionalitäten in wenigen Elementen andererseits aber auch die Erzeugung von optischen Komponenten mit vollständig neuartigen Eigenschaften. Allerdings erhöhen sich die Anforderungen sowohl an die Elementherstellung als auch an das optische Design.

Mit einem am Fraunhofer IOF entwickelten Designverfahren lassen sich quasi beliebige Beleuchtungsverteilungen auf einem vorgegebenen Target schon mit einer Freiformfläche in einem optischen System für gut kollimierte Quellstrahlen oder kleine Quellgrößen erzeugen. Hierbei werden die Freiformflächen in systemangepasste, generalisierte kartesische Ovale zerlegt, deren Parameter direkt berechnet werden können (Abb. 3). Die Erweiterung auf komplexe Quelllichtverteilungen, wie z.B. LED-Cluster (Abb. 2), erfolgt durch Vorverzerrung der optischen Sollverteilung mittels linearer Optimierung. Für solche Punkt-zu-Punkt Lichtumverteilungen muss die konkrete Quellabstrahlung genau berücksichtigt werden. Um Systemtoleranzen zu erhöhen und eine vergrößerte

Freeform optics are currently the subject of rapid development in both scientific research and industrial applications. The use of freeforms enables the incorporation of multiple functionalities into fewer optical components to produce compact systems or the generation of optical elements with novel features. The requirements of element fabrication as well as the optical design, however, are much more demanding.

At Fraunhofer IOF, a design method was developed to create an arbitrary illumination pattern at a given target by means of a single freeform in an optical system using a well collimated or a small size light source. To this end, the freeform surface is decomposed into a huge set of generalized, system-adapted Cartesian ovals, where the corresponding parameters can be directly determined (Fig. 3). For more complex light sources, e.g. LED clusters, the method is generalized by a predistortion of the goal distribution via linear optimization (Fig. 2). With such point-by-point redistribution of the light, the actual emission pattern of the light sources has to be carefully considered. In order to increase the system's tolerances, especially with respect to the light sources (source inhomogeneities, source location etc.), freeform fly's eye condensers can be utilized to generate coarsely structured light patterns at the target. Such

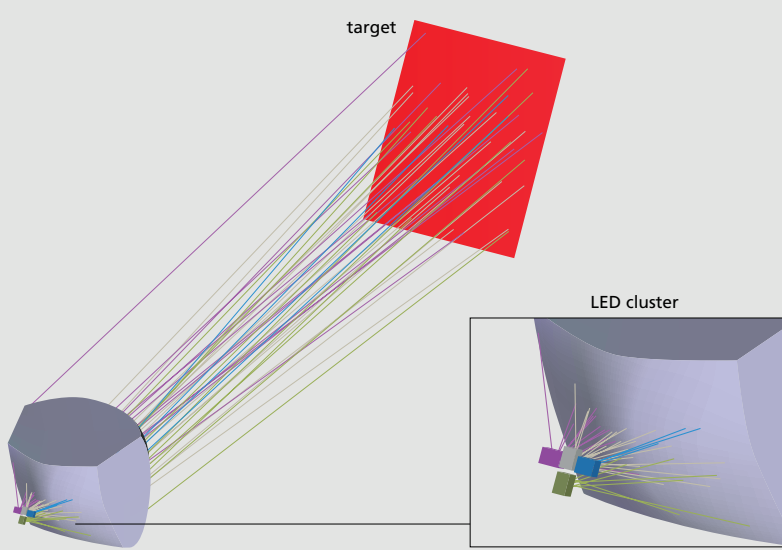
**1** *Kollimierender, strahlformender Freiform-Wabenkondensator.* |

*Collimating, beam shaping freeform fly's eye condenser.*

**2** *Erzeugung einer homogenen Ausleuchtung auf einem zur Quellebene um 45° geneigten Target, wobei als Lichtquelle ein Cluster aus vier LEDs verwendet wurde* |

*Homogeneous illumination of a 45° tilted target by a cluster of four LEDs.*

2



Quellunabhängigkeit (Quellinhomogenitäten, -positionen etc.) zu erreichen, können Freiform-Wabenkondensoren bei der Erzeugung von grob strukturierten Beleuchtungsverteilungen eingesetzt werden. Diese zweiseitig segmentierten Freiformen vereinen verschiedene Funktionalitäten in einem Element, wie Lichtkollimation/-fokussierung, Lichtstrahlformung und Homogenisierung (Abb. 1).

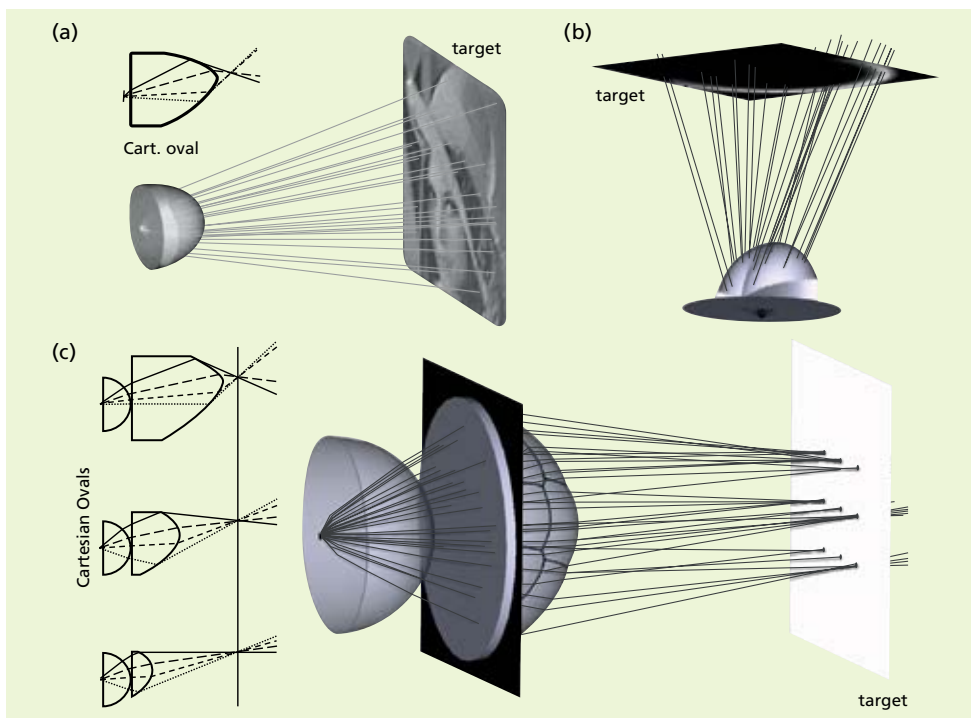
Die Arbeiten wurden durch das BMBF im Rahmen des Projekts »FREE« (FKZ 13N10827) gefördert.

double-sided, segmented freeforms incorporate several functionalities in one element, such as light collimation/focusing, light shaping and homogenization (Fig. 1).

#### References / Literatur

/1/ Michaelis, D., Schreiber, P., Bräuer, A.:  
Opt. Lett. 36, 918-920 (2011).

/2/ Michaelis, D., Schreiber, P., Li, C., Bräuer, A.:  
Proc. SPIE 8124, 812403 (2011).



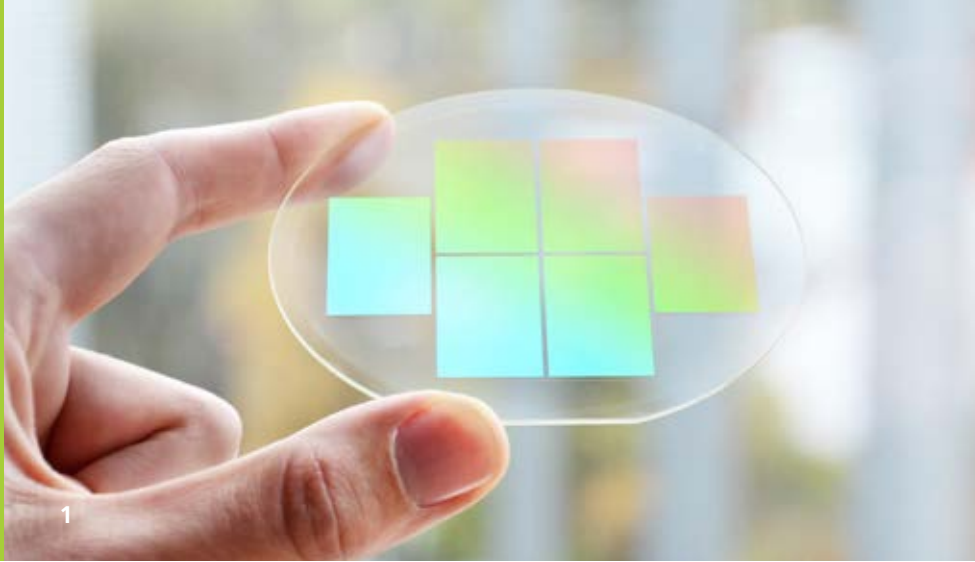
**3** *Strukturierte Beleuchtung mittels Freiformoptiken, (a) glatte Freiformlinse, (b) Freiformlinse mit einer Unstetigkeit der ersten Ableitung (c) telezentrische Punktmustergeneration mit einer Eingangsfeldlinse und einer segmentierten Freiformlinse. | Generation of illumination patterns by means of freeform optical systems, (a) smooth freeform lens, (b) non-steady differentiable freeform lens, (c) telecentric spot generator consisting of a collimating lens and steady, segmented splitting optics.*

#### AUTHORS

Dirk Michaelis  
Chen Li  
Axel Bodemann  
Peter Schreiber  
Andreas Bräuer

#### CONTACT

Dr. Dirk Michaelis  
Phone +49 3641 807-438  
dirk.michaelis@iof.fraunhofer.de



## PULSKOMPRESSORGITTERHERSTELLUNG MITTELS BEUGUNGSLITHOGRAPHIE PULSE COMPRESSION GRATING FABRI- CATION BY DIFFRACTIVE LITHOGRAPHY

Hochenergie Kurzpuls laser, welche auf Chirped Pulse Amplification (CPA) basieren, erfordern Beugungsgitter von ausgezeichneter Qualität für die Pulsstreckung und Kompression. Diese Elemente sollten eine sehr hohe Beugungseffizienz, eine hohe Zerstörschwelle sowie eine ausgezeichnete Homogenität der Liniendichte aufweisen.

Eine etablierte Herstellungsmethode, welche die beschriebenen Kriterien erfüllt, basiert auf Elektronenstrahlolithographie für die Gitterdefinition und reaktivem Ionenätzen für den Übertrag in das Quarzsubstrat. Dieser Ansatz profitiert von der hohen lateralen Auflösung und Genauigkeit der Elektronenstrahlolithographie. Eine Schreibzeit von mehreren Stunden für die Belichtung eines einzelnen Wafers ist auf Grund des scannenden Schreibregimes jedoch nicht unüblich. Um eine Gitterherstellung in größeren Stückzahlen zu ermöglichen, wurde eine maskenbasierte vollflächige Belichtungsmethode entwickelt, welche auf Beugungslithographie in einem Mask Aligner basiert. Das Grundprinzip der Technologie besteht darin, das Nahfeld-Beugungsbild einer Photomaske zur Belichtung zu nutzen. Dabei definiert die Maske, welche durch kollimiertes monochromatisches UV Licht mit wählbaren Einfallswinkeln beleuchtet wird, die Amplitude und Phase der transmittierten Lichtverteilung. Das komplexe Lichtfeld breitet sich anschließend über eine Entfernung von etwa 20  $\mu\text{m}$  bis 200  $\mu\text{m}$  frei aus und das entstehende Beugungsbild wird zur Belichtung verwendet.

High-power ultrafast lasers based on chirped pulse amplification (CPA) require diffraction gratings of superior quality for pulse stretching and compression. These elements should feature a very high diffraction efficiency, a high damage threshold and an excellent homogeneity of the line density.

A well-established fabrication technology which meets the described criteria is the combination of electron beam lithography for the grating geometry definition in resist and reactive ion etching for transfer into the fused silica substrate. This approach utilizes the high lateral resolution and accuracy of electron beam lithography, but several hours of writing time are common for the lithography of a single wafer due to the scanning exposure regime.

To enable throughput-scalable grating fabrication, a mask based full-field exposure approach based on diffractive proximity photolithography in a mask aligner was developed. The fundamental principle of the technology is the use of the near-field diffraction pattern of a photomask to expose the resist coated substrates. The mask is illuminated by collimated monochromatic UV light composed of controllable incidence angles and defines the amplitude and phase of the transmitted light distribution. The resulting complex field propagates in free space for a distance of about 20  $\mu\text{m}$  to 200  $\mu\text{m}$  and the emerging diffraction pattern is finally used to expose the photoresist.

1 *Pulskompressorgitter auf einem 4" SiO<sub>2</sub> Wafer. | Pulse compression gratings on a 4" SiO<sub>2</sub> wafer.*

Es wurde demonstriert, dass Pulskompressorgitter mit einer Periode von 800 nm (1250 Linien/mm), welche üblicherweise mit Elektronenstrahlolithographie geschrieben werden, in einer vergleichbaren Qualität mittels Beugungslithographie herstellbar sind. Der Belichtungsprozess basiert auf einer Phasenmaske, welche durch eine Multipol-Konfiguration von Einfallswinkeln beleuchtet wird, und ein Luftbild erzeugt, welches sich durch sehr gute Homogenität, hohe laterale Auflösung sowie eine große Schärfentiefe auszeichnet. Die mittlere Beugungseffizienz der hergestellten Gitter liegt bei über 97% im Bereich der Designwellenlänge von 1030 nm und der Wellenfrontfehler ist vergleichbar mit elektronenstrahlgeschriebenen Gittern.

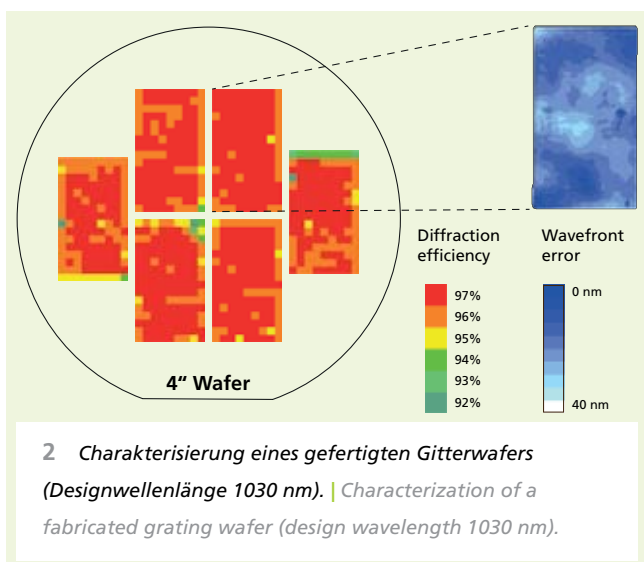
Teile der dargestellten Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des ZIK ultra-optics Projektes »Fertigungstechnologien für hoch entwickelte Mikro- und Nanooptiken« (FZK: 03Z1HN32) gefördert.

It was demonstrated that pulse compression gratings with a period of 800 nm (1250 lines/mm) – typically written by electron beam lithography – can be fabricated with a similar quality by diffractive proximity photolithography. The exposure process is based on a phase mask which is illuminated by an adapted multipole configuration of incidence angles to generate an aerial image with excellent homogeneity, high lateral resolution and large depth of focus. The average diffraction efficiency of the fabricated pulse compression gratings is found to exceed 97% at the design wavelength of 1030 nm and the wave-front error is comparable to electron beam lithography fabricated gratings.

Parts of the work presented were funded by the German Ministry of Science and Education as part of the ZIK ultra-optics project entitled "Fertigungstechnologien für hoch entwickelte Mikro- und Nanooptiken" (FZK: 03Z1HN32).

#### References / Literatur

Stuerzebecher, L., Fuchs, F., Harzendorf, T., Zeitner, U. D.: Pulse compression grating fabrication by diffractive proximity photolithography, Optics Letters, Vol. 39, Issue 4, pp. 1042-1045 (2014), <http://www.opticsinfobase.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-39-4-1042>.

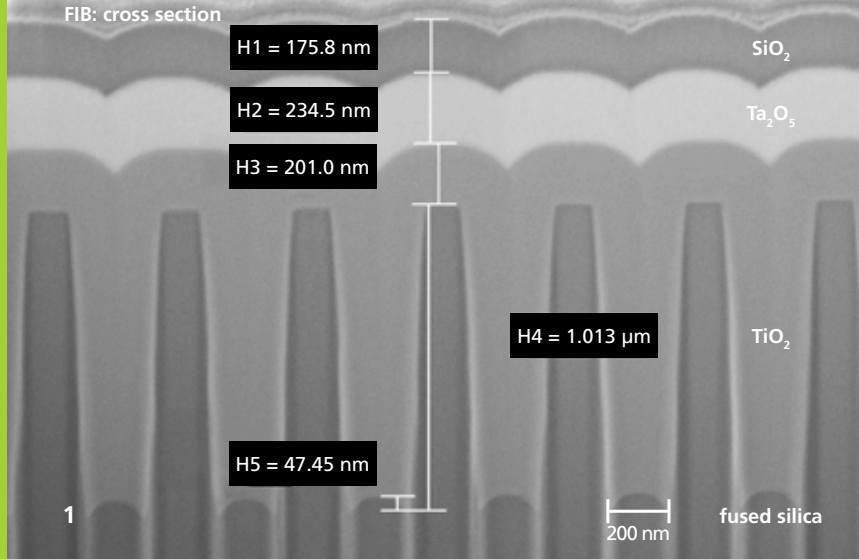


#### AUTHORS

Lorenz Stürzebecher  
Frank Fuchs  
Torsten Harzendorf  
Uwe D. Zeitner

#### CONTACT

Lorenz Stürzebecher  
Tel. +49 3641 807-393  
[lorenz.stuerzebecher@iof.fraunhofer.de](mailto:lorenz.stuerzebecher@iof.fraunhofer.de)



## HOCHEFFIZIENTE TRANSMISSIONSGITTER FÜR DAS SENTINEL-5 NIR-SPEKTROMETER HIGH-EFFICIENCY TRANSMISSION GRATINGS FOR THE SENTINEL-5 NIR-SPECTROMETER

Spezialisierte Spektrometergitter für weltraumgestützte Missionen sind einer der Schwerpunkte der Arbeiten des Center for Advanced Micro- and Nano-Optics (CMN).

Für derartige Anwendungen können die am CMN gebündelten Technologien der hochgenauen Elektronenstrahlolithographie und reaktiven Ionenätzprozesse für die Strukturübertragung in Kieselglas (fused silica,  $\text{SiO}_2$ ) vorteilhaft eingesetzt werden.

Durch die Kombination mit Verfahren zur optischen Beschichtung, insbesondere der Atomic-Layer-Deposition (ALD), wurden in den letzten Jahren neuartige Gitterkonzepte entwickelt, welche die Anwendungsmöglichkeiten gegenüber ausschließlich in Kieselglas ausgebildeten Gittern erheblich erweitern. Im Rahmen einer Vorstudie zur Sentinel-5 Mission der Europäischen Weltraumbehörde ESA wurde ein solches Gitter für das NIR Band zwischen 750 nm – 775 nm entworfen, hergestellt und charakterisiert.

Ziel der Sentinel-5 Mission ist die Beobachtung der Atmosphärenzusammensetzung bezüglich Luftqualität, Ozon, Treibhausgasen sowie Solarstrahlung mit hoher Sensitivität /1/. Dies stellt höchste Ansprüche an die Empfindlichkeit und Auflösung der optischen Gitter, die als disperse Kernkomponenten der Spektrometer zum Einsatz kommen.

Custom-made gratings for spaceborne spectroscopic applications are one of the central aspects of work at the Center for Advanced Micro- and Nano-Optics (CMN).

These applications benefit from the technologies of highly accurate electron beam lithography and reactive ion-etching for the pattern transfer, bundled at the CMN.

Over the course of recent years, new grating concepts have been developed at the CMN, combining the established grating technology with optical coatings – especially atomic-layer-deposition (ALD). In comparison to gratings realized solely in fused silica, the field of application can be extended significantly by the newly devised concepts. In the framework of a pre-development study for the Sentinel-5 mission of the European Space Agency, such a grating – intended for the NIR spectral band between 750 nm and 775 nm – was designed, realized and characterized.

The Sentinel-5 mission aims at monitoring the composition of the atmosphere, analyzing air-quality, stratospheric ozone and solar radiation /1/. The high requirements of sensitivity and resolution, in particular, pose a challenge to the optical gratings as the key components of the spectrometer. For the NIR grating of Sentinel-5, the main challenge involved

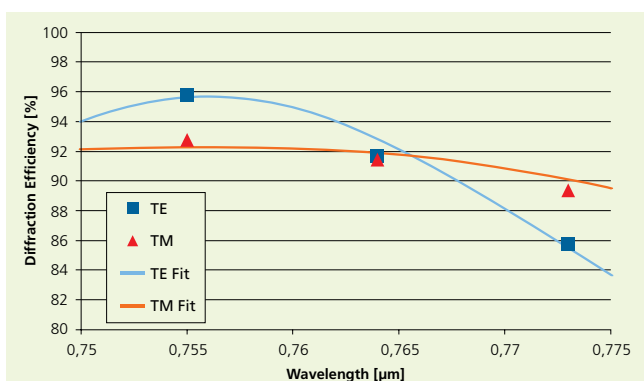
1 Querschnitt durch das Transmissionsgitter nach Verfüllung mit  $\text{TiO}_2$  und Übersichtung mit  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  und  $\text{SiO}_2$ . | Cross section of the transmission grating after filling with  $\text{TiO}_2$  and coating with  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  and  $\text{SiO}_2$ .



Im vorliegenden Fall bestand die wesentliche Herausforderung in der geforderten Kombination einer weitestgehend polarisationsunabhängigen Beugungseffizienz von mehr als 80% mit einer Gitterperiode von nur 441 nm. Diese Anforderungen sind mit monolithischen SiO<sub>2</sub>-Gittern praktisch nicht realisierbar. Das optische Design des Gitters kombiniert daher ein Grundgitter aus Kieselglas mit einer hochbrechenden Verfüllung aus TiO<sub>2</sub> sowie zwei weiteren optischen Schichten aus Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und SiO<sub>2</sub>, welche eine anti-reflektive Wirkung erzielen.

Für eine erfolgreiche Umsetzung des Designs konnte der technologische Ablauf erfolgreich optimiert werden. Um die Verfüllung mittels ALD zu ermöglichen, wurde hierfür der Prozess des reaktiven Tiefätzens mit dem Ziel, leicht trapezförmige Profile ohne Hinterschnitt zu generieren, angepasst. Die so generierten fused silica Profile wurden im Anschluss mit TiO<sub>2</sub> verfüllt und mit Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und SiO<sub>2</sub> beschichtet.

Das Gitter zeigt eine Beugungseffizienz von mehr als 85% über den gesamten Spektralbereich. Die Effizienz ist hierbei, mit einem Polarisationskontrast von weniger als 5%, nahezu polarisationsunabhängig.



**2** *Beugungseffizienz des in Abbildung 1 gezeigten Transmissionsgitters. | Diffraction efficiency of the transmission grating shown in Fig. 1.*

the required combination of a mostly polarization-independent diffraction efficiency of more than 80% and a grating period of just 441 nm. It is not possible to fulfil these requirements with monolithic fused-silica gratings. However they can be realized by the devised approach of a fused silica based grating, filled with a higher refractive material such as TiO<sub>2</sub>, and two further optical coatings for anti-reflective purposes. The fabrication approach had to be optimized to successfully realize the design. The process of reactive ion etching was optimized, aiming for a slightly trapezoidal shape of the grating bars to allow for a void-free filling of the trenches using ALD. Following the ALD filling, the gratings were coated with Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and SiO<sub>2</sub>.

The generated gratings were thoroughly characterized, achieving a diffraction efficiency > 85% in the whole spectral band at a very low polarization sensitivity of less than 5%.

Parts of the project have been funded by DLR Space Administration under project FKZ 50EE 1204.

#### References / Literatur

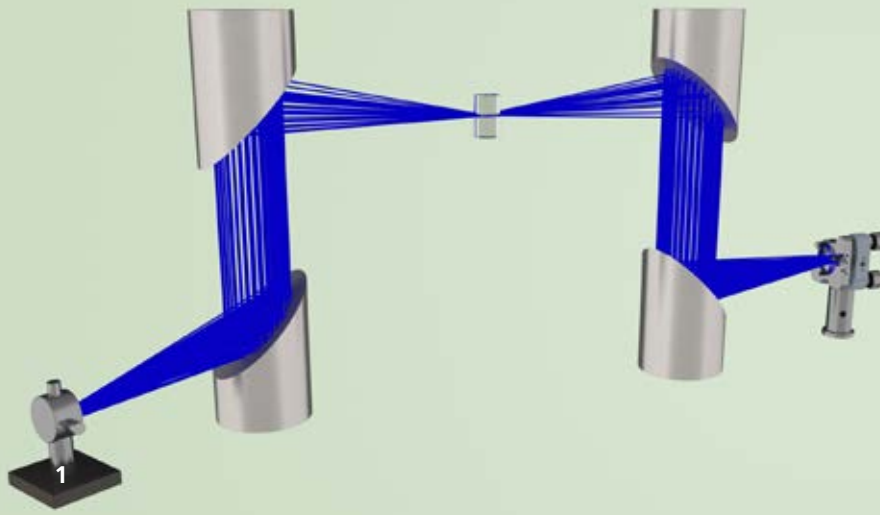
/1/ [www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinels\\_-4\\_-5\\_and\\_-5P](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinels_-4_-5_and_-5P).

#### AUTHORS

Frank Fuchs  
Uwe D. Zeitner  
Dirk Kampf<sup>1</sup>  
Roman Windpassinger<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Kayser-Threde GmbH

#### CONTACT

Dr. Frank Fuchs  
Phone +49 3641 807-434  
[frank.fuchs@iof.fraunhofer.de](mailto:frank.fuchs@iof.fraunhofer.de)



## OPTISCHE EFFEKTE IN DER TERAHERTZ-TOMOGRAPHIE

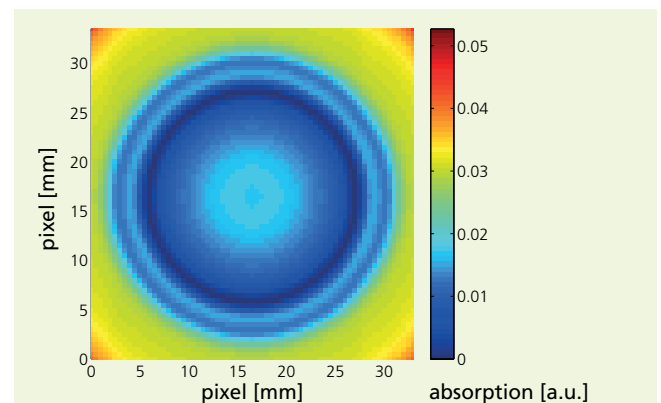
## OPTICAL EFFECTS IN TERAHERTZ TOMOGRAPHY MEASUREMENTS

Terahertz (THz)-Strahlung (0,1 – 10 THz, Wellenlänge 3 mm bis 30  $\mu\text{m}$ ) liegt im elektromagnetischen Spektrum zwischen Mikrowellen-Strahlung und fernem Infrarot. Sie durchdringt zahlreiche Materialien, wie beispielsweise Kunststoffe, Kleidung, Hölzer, Polymerschäume und Keramiken. Bezüglich Wasser besitzt THz-Strahlung eine hohe Sensitivität, ebenso für viele organische Substanzen (wie z.B. Pharmazeutika, Drogen, Sprengstoffe), die anhand ihrer charakteristischen Absorptionsspektren im THz-Bereich erkannt und identifiziert werden können. Dies eröffnet neue Anwendungsgebiete in der Sicherheitstechnik, Biosensorik, medizinischen Bildgebung, Kommunikationstechnik oder industriellen Inspektion /1/.

Ein Forschungsschwerpunkt des Fraunhofer IOF ist die Tomographie mit THz-Strahlung. Dabei handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren zur Analyse der räumlichen Verteilung eines Stoffes innerhalb seines Körpers. Es werden Ultrakurz-puls-laser für die zeitaufgelöste Erzeugung und Detektion von THz-Pulsen eingesetzt. Dadurch können im Vergleich zur herkömmlichen Tomographie mit Röntgenstrahlung eine Vielzahl neuer Informationen genutzt werden. Neben der Absorption der Strahlung liefern Phasen-, Laufzeit- und spektrale Informationen neue Ansätze für Analysen und Rekonstruktionsalgorithmen /2/. Die THz-Tomographie unterliegt aufgrund der langwelligen Strahlung verschiedenen optischen Effekten. Dazu zählen Brechung und Beugung, sowie

Terahertz (THz) radiation (0.1 – 10 THz, wavelength 3 mm to 30  $\mu\text{m}$ ) is electromagnetic radiation in the frequency range between the microwave and far infrared band. It penetrates through numerous materials such as plastics, clothing, wood, polymer foams and ceramics. THz radiation is sensitive to water and many organic substances (e.g. medication, illicit drugs, explosives) which can be identified by their characteristic absorption spectra in the THz range. This allows new applications in fields of security technologies, biosensors, medical imaging, communication technologies and industrial control /1/.

One focus of work at Fraunhofer IOF is tomography with THz radiation. This is an imaging technology which visualizes



**2** Rekonstruktionsbild eines PMMA Zylinders ( $\varnothing$  25 mm) mit Artefakten. | Reconstruction image of a PMMA cylinder ( $\varnothing$  25 mm) with artifacts.

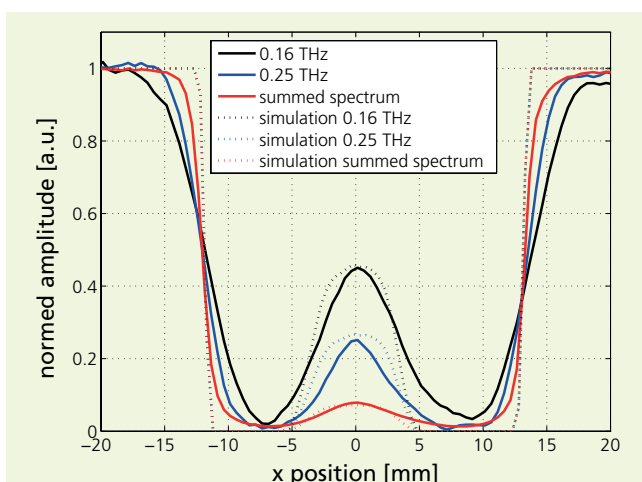
**1** Strahlableitung an einem Kunststoffzylinder im THz-System. | Beam deflection at a plastic cylinder in a THz system.

Kanteneffekte, die aufgrund der zeitaufgelösten Detektion der Pulse entstehen. Beispielsweise wirken Proben aus Kunststoff, durch ihre relativ hohen Brechungsindizes im THz-Bereich, wie optische Elemente im Strahlengang (Abb. 1). Die optischen Effekte schlagen sich in den tomographischen Messungen (Projektionen) nieder. Sie führen nach der Rekonstruktion zu Artefakten im Schnittbild und erschweren damit die Analyse der Proben (Abb. 2).

Für das grundlegende Verständnis werden neue Modelle zur Beschreibung optischer Effekte erarbeitet. Die Simulationen werden mit den Ergebnissen der THz-Messungen verglichen (Abb. 3) und bilden damit die Basis für die Entwicklung neuer Korrekturalgorithmen und Systemkonzepte für die THz-Tomographie. Ziel ist hierbei, die Bildqualität und Auflösung von tomographischen Bildern zu verbessern.

#### Literatur / References

- /1/ Jansen, C. et al.: Appl. Opt. Vol. 49, E48-E57 (2010).  
/2/ Brahm, A. et al.: Appl. Phys. B. Vol. 100, S. 151-158 (2010).



**3** THz-Linienscan eines PMMA Zylinder (Ø 25 mm) – Messung und Simulation. | Cross section of a PMMA cylinder (Ø 25 mm) – measurement and simulation.

the spatial distribution of a material within an object. We use ultrashort pulse lasers to generate THz pulses and realize a time-resolved measurement. Thus not only amplitude information but also the phase, time and spectral information can be detected in comparison to conventional tomography measurements with X-rays. Due to the additional information, THz tomography opens up attractive new applications with the development of adapted reconstruction algorithms /2/.

Optical effects like refraction, diffraction and edge effects have an influence on Terahertz tomography measurements due to its long wavelengths. For example, plastic materials have a relatively high refractive index in the THz frequency range and act like optical elements in the beam path of tomographic systems (Fig. 1). The optical effects can result in artifacts in the reconstructed images (Fig. 2) which makes it difficult to detect and resolve material defects inside the sample. The development of new optical models is required for analysis of the impact of optical effects on THz tomography measurements. The simulations of optical effects are compared to THz measurements (see Fig. 3) and form the basis for developing new algorithms and system concepts. The objective is to improve the quality and resolution of THz tomography images.

#### AUTHORS

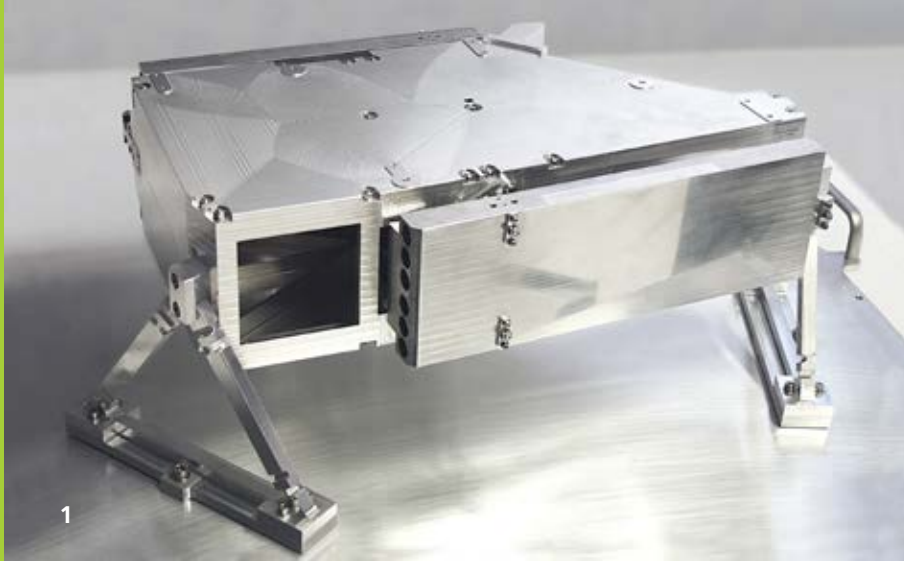
Anika Brahm<sup>1,2</sup>  
Constanze Grossmann<sup>1</sup>  
Gunther Notni<sup>1</sup>  
Andreas Tünnermann<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer IOF

<sup>2</sup>Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

#### CONTACT

Anika Brahm  
Phone +49 3641 807-237  
anika.brahm@iof.fraunhofer.de



## DESIGN UND AUFBAU EINES ANAMORPHOTISCHEN TELESKOPS FÜR ERDBEOBACHTUNG

## DESIGN AND ASSEMBLY OF AN ANAMORPHOTIC TELESCOPE FOR EARTH OBSERVATION

Im Rahmen ihres Programmes »Earth Explorer« hatte die Europäische Weltraum-Agentur (ESA) die Mission PREMIER vorgesehen. Deren Ziel sollte die Erfassung der dreidimensionalen Verteilung von Spurengasen in der Atmosphäre sein /1/. Als eines der beiden Hauptinstrumente war der Infrared Limb Sounder (IRLS), ein abbildendes Fourier-Transform Spektrometer für den mittleren IR-Bereich vorgesehen. Dieses beobachtet in Richtung des Horizonts und bildet einen vertikalen Schnitt durch die Atmosphäre ab. Am Fraunhofer IOF wurde im Auftrag von EADS Astrium ein Demonstrator des IRLS-Teleskops aufgebaut. Dessen Besonderheit besteht in der anamorphotischen Abbildung, d.h. ein rechteckiger Bildausschnitt der Atmosphäre wird auf den quadratischen Sensor des Spektrometers abgebildet. Beim realisierten Demonstrator handelt es sich dabei um ein Vierspiegeldesign unter ausschließlicher Verwendung von Freiformflächen.

Die Spiegel wurden mittels Einkorn-Diamant-Bearbeitung von Aluminium hergestellt. Zur Realisierung der Freiformflächen wurde das Werkzeug entsprechend eines vorher berechneten Pfades synchron zur Spindeldrehung ausgelenkt. Die Justage von Freiformflächen stellt aufgrund des Fehlens einer Rotationsachse eine besondere Herausforderung dar, da alle 6 Freiheitsgrade eingestellt werden müssen. Zur Vereinfachung des Prozesses konnte auf die in den vergangenen Jahren aufgebauten Erfahrungen zurückgegriffen werden /2/: Jeweils zwei Spiegel wurden auf einem gemeinsamen Substrat

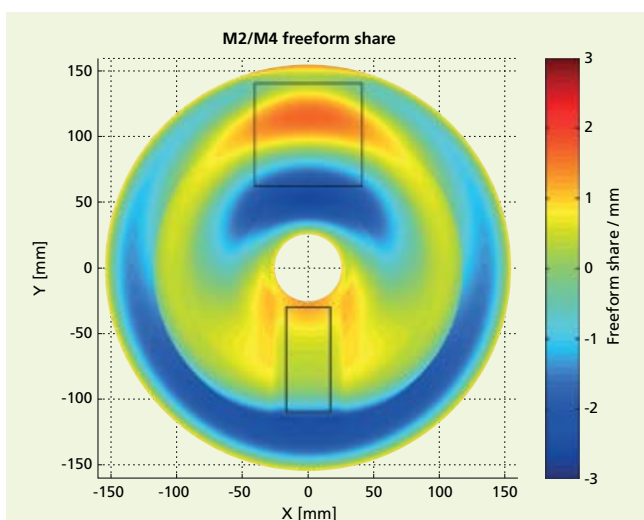
The European Space Agency planned the PREMIER mission on the "Earth Explorer" program to monitor the three dimensional distribution of trace gases in the atmosphere /1/. The Infrared Limb Sounder (IRLS), one of the two main instruments, would be an imaging Fourier-transform spectrometer for the mid infrared (IRLS). This instrument points towards the horizon and establishes a vertical cut through the atmosphere. Under a contract with EADS Astrium, a demonstrator of the IRLS telescope was designed and built at IOF. The telescope produces an anamorphic image, i.e. it transfers a rectangular field onto the square sensor of the spectrometer. The demonstrator relies on a 4-mirror design using freeform surfaces only.

The mirrors were produced from Aluminum by single point diamond turning. The freeform surfaces were realized using a servo process, i.e. the tool was moved according to a pre-calculated path synchronously to the revolution of the spindle. The adjustment of freeform surfaces is a challenging process, because all 6 degrees of freedom of each mirror have to be controlled precisely. To simplify the process, we used a procedure developed at IOF in recent years /2/: pairs of mirrors were placed on a common substrate and were cut in a single machining run together with properly placed reference features. The mirrors were attached to a lightweight telescope housing via kinematic mounts to prevent deformations of the housing from influencing the mirror surfaces. At the same time, the total mass of the telescope could be reduced to

1 Demonstrator für das anamorphotische Teleskop. | *Anamorphic telescope demonstrator.*

platziert und zusammen mit Referenzmarken für die Ausrichtung in einer Aufspannung geschnitten. Die Spiegel wurden kinematisch an ein leichtgewichtiges Gehäuse angekoppelt. Dadurch wurde eine weitgehende Entkopplung der Spiegel von den Deformationen des Gehäuses erreicht. Gleichzeitig konnte die Masse des gesamten Teleskops auf 6,3 kg reduziert werden. Die für die Stabilität gegen Vibrationen wesentliche unterste Resonanzfrequenz des Teleskops liegt bei 319 Hz.

Der Aufbau des Teleskops erfolgt anhand der Referenzmarken. Daran schließt sich die Feinjustage der Spiegel unter interferometrischer Kontrolle an. Durch die beim Diamantdrehen erreichbare hohe Positionsgenauigkeit der Spiegel eines Paares zueinander und zu den entsprechenden Justiermarken konnte der Justageprozess auf wenige Stunden verkürzt werden. Die erreichte Wellenfrontqualität des Teleskops liegt, je nach Position im Bildfeld, mit 300 nm bis 800 nm r.m.s. im beugungsbegrenzten Bereich für die Arbeitswellenlänge von ca. 8  $\mu\text{m}$ .



**2** *Schnittpfad für das Spiegelpaar M2/M4. Die Farbe kodiert die Auslenkung des Werkzeugs. | Cutting path for mirror pair M2/M4. Color codes for the tool extension.*

6.3 kg. The lowest resonance frequency which is important for the stability against vibrations is as high as 319 Hz.

The assembly of the telescope was done using mechanical reference features on the mirrors and the housing. The final adjustment of the mirrors was then performed under interferometric control. The high accuracy of the relative positions of the mirrors on one substrate to each other as well as to the respective reference marks allowed the adjustment process to be reduced to a few hours. We achieved a wavefront quality of the telescope in the range of 300 nm to 800 nm r.m.s. depending on the position in the image field. This quality allows for diffraction-limited imaging for the intended wavelength range in the mid-IR.

#### References / Literatur

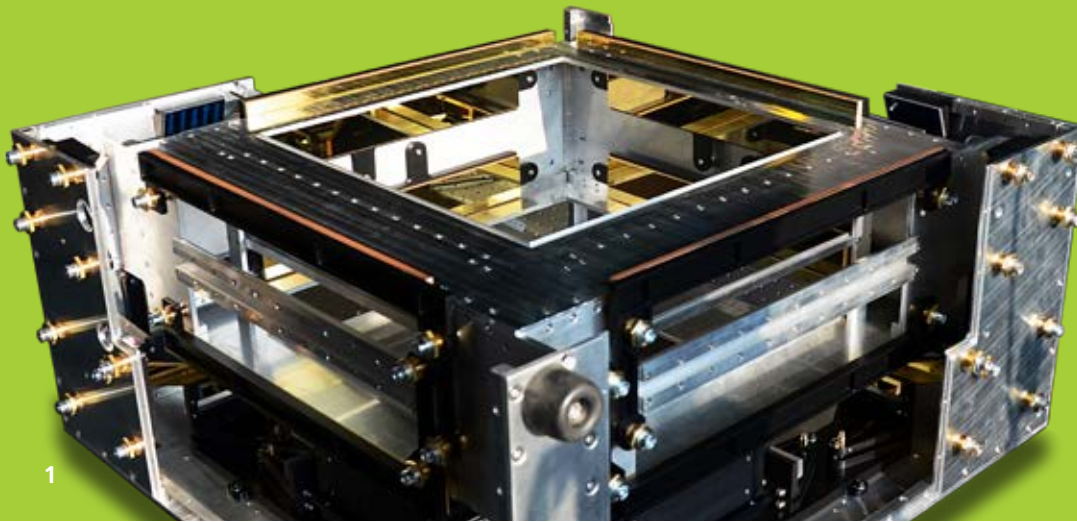
- /1/ ESA (2012). Report for Mission Selection: PREMIER, ESA SP-1324/3 (3 volume series), European Space Agency, Noordwijk NL, [http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/SP1324-3\\_PREMIERr.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/SP1324-3_PREMIERr.pdf).
- /2/ Scheiding, S. et. al.: Ultra-precisely manufactured mirror assemblies with well-defined reference structures, Proc. SPIE 7739.

#### AUTHORS

Thomas Peschel  
Christoph Damm  
Sebastian Scheiding  
Matthias Beier  
Stefan Risse

#### CONTACT

Dr. Thomas Peschel  
Phone +49 3641 807-335  
[thomas.peschel@iof.fraunhofer.de](mailto:thomas.peschel@iof.fraunhofer.de)



## SYSTEM ZUR DETEKTION KLEINER SCHNELLER TEILCHEN IM WELTRAUM OPTICAL SYSTEM FOR THE DETECTION OF SMALL FAST PARTICLES IN SPACE

Sogenannter »Weltraumschrott« oder space debris stellt ein Risiko für bemannte und unbemannte Raumfahrtmissionen dar. Um dieses Risiko zu minimieren, sind Modelle entwickelt worden, die die Verteilung von Körpern und Partikeln im Orbit beschreiben und Vorhersagen über die zu erwartende Einschlagshäufigkeit in einer gegebenen Umlaufbahn erlauben. Es ist wichtig, diese Modelle mit Hilfe von Messungen auf ihre Gültigkeit zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Dabei kommt den Partikeln kleiner als ein Millimeter eine besondere Bedeutung zu. Diese können nicht vom Boden aus erfasst werden, und ihre Häufigkeit und ihr Geschwindigkeitsvektor müssen direkt im Orbit bestimmt werden.

Ein möglicher Ansatz der In-situ-Messung solcher Partikel ist die Flugzeitmessung zwischen zwei Lichtvorhängen. Dazu wird in zwei parallelen Ebenen mittels eines linear aufgeweiteten Lasers je ein Lichtvorhang zwischen Spiegeln aufgespannt. Ein durchfliegendes Teilchen, erzeugt beim Passieren des Lichtvorhanges einen schwachen Lichtblitz. Dieser wird von Detektoren registriert, die sich nah über oder unter dem Lichtvorhang befinden. Anhand der Verteilung der Signalstärke entlang einer Detektorreihe kann der Ort des Teilchens in jedem der beiden Lichtvorhänge bis auf wenige Millimeter genau errechnet werden. Aus diesen beiden Positionen, dem bekannten Abstand der Lichtvorhänge und der Zeitdifferenz zwischen den beiden Lichtblitzen lässt sich der

Space debris imposes a major risk for manned and unmanned space missions. To mitigate this risk, models have been developed to predict the distribution of orbiting bodies and particles in the space environment of a given orbit and to assess the expected impact risk and frequency. It is important to validate these models with measurements and adapt them if necessary. Particles smaller than one millimeter are of special interest because they cannot be detected by ground means and their frequency and trajectory have to be measured directly in space.

One possible approach for in-situ measurement of such particles is the time-of-flight measurement between two light curtains. The light curtains are formed between mirrors in parallel planes by a linearly expanded laser beam. A particle passing the curtains produces a weak flash of scattered light. This scattered light is recorded by rows of detectors that are placed close to the light curtain. The position of the particle can be obtained to within a few millimeters' precision from the distribution of the signal strength along a row of detectors. The velocity vector of the particle can be fully calculated from these two positions, the distance of both light curtains and the time between the light flashes. For the smallest particles to be detected, the expected detector irradiance is ten orders of magnitude below the irradiance in the light curtain. Measures to reduce stray light in the system are therefore of special importance.

1 *Montiertes breadboard model des Partikeldetektors. | Breadboard model of the instrument.*

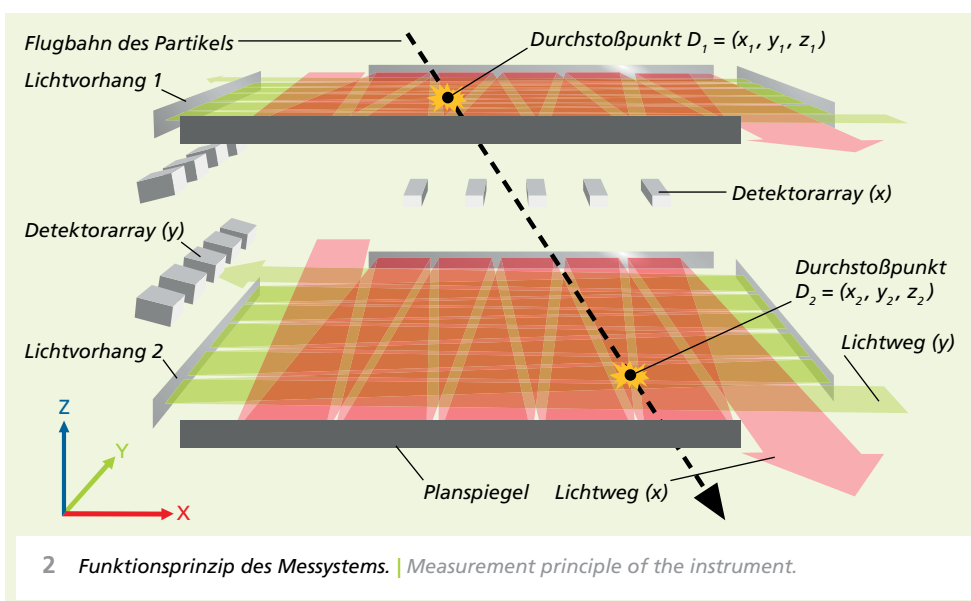
Geschwindigkeitsvektor des Teilchens vollständig berechnen. Für die kleinsten zu detektierenden Teilchen liegt die Bestrahlungsstärke am Empfänger ca. 10 Größenordnungen niedriger als die Bestrahlungsstärke im Lichtvorhang. Maßnahmen zur Streulichtunterdrückung im Instrument kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

In Zusammenarbeit mit der Firma etamax space GmbH und dem Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze der TU Braunschweig wurde ein entsprechendes Instrument als Laboraufbau für eine Erprobung des Messverfahrens in Laborumgebung entworfen und aufgebaut. Das Gerät realisiert eine Detektionsfläche von 300 x 300 mm<sup>2</sup> mit dem Ziel, Partikel ab 3 µm Durchmesser bei Geschwindigkeiten zwischen 0,1 und 30 km/s zu erfassen.

Die Ergebnisse entstanden im Rahmen des ESA-Projektes »Particle Trajectory Analyser Phase A/B« (Vertrag Nr. 4000104050) und wurden mit Mitteln der Europäischen Union gefördert.

To test the measurement principle in a lab environment, a breadboard model of such a particle detector was developed and built in cooperation with etamax space GmbH and the Institute of Computer and Network Engineering of the Technical University of Braunschweig. The instrument has a detection area of 300 x 300 mm<sup>2</sup> and aims at detecting particles 3 µm in size or larger at velocities between 0.1 and 30 km/s.

This work was carried out as part of the ESA project entitled "Particle Trajectory Analyser Phase A/B" (contract no. 4000104050) and was funded by the European Union.



## AUTHORS

Uwe Lippmann

Andy Tänzer

Gunther Notni

Karl Dietrich Bunte<sup>1</sup>

Christian Herbst<sup>1</sup>

Torsten Fichna<sup>2</sup>

<sup>1</sup> etamax space GmbH,

Braunschweig

<sup>2</sup> Institut für Datentechnik und

Kommunikationsnetze,

TU Braunschweig

## CONTACT

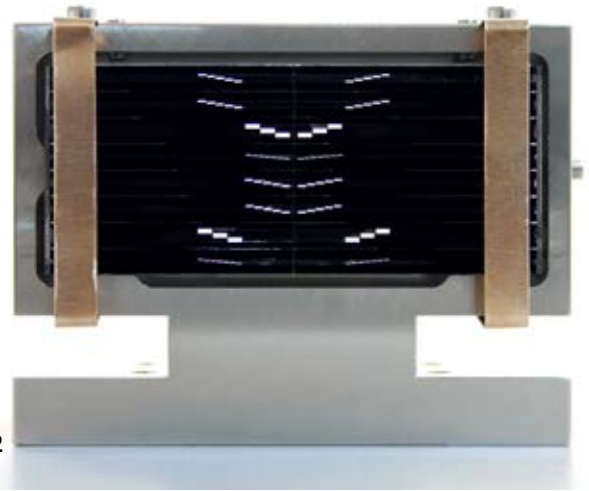
Uwe Lippmann

Phone +49 3641 807-249

uwe.lippmann@iof.fraunhofer.de



1



2

## IMAGE-SLICER FÜR DAS PEPSI-INSTRUMENT IMAGE SLICER FOR THE PEPSI INSTRUMENT

Das Large Binocular Telescope (LBT) auf dem Mount Graham (Arizona, USA) ist mit seinen beiden 8 m Spiegeln eines der derzeit leistungsfähigsten Teleskope für die Astronomie. Das Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) wird am LBT das Instrument PEPSI (Potsdam Echelle Polarimeter and Spectroscopic Instrument) betreiben, welches eine Kombination aus Polarimeter und Spektrometer darstellt /1/. Letzteres stellt mit einer spektralen Auflösung von bis zu 300.000 den Astronomen die Möglichkeit zur Verfügung, z.B. nach Signaturen extraterrestrischen Lebens auf erdähnlichen Planeten zu suchen.

Für den komplexen Aufbau des Spektrometers wurde am Fraunhofer IOF erstmals ein wellenleiterbasierter Image-Slicer realisiert, der das in mehreren Fasern geführte Licht der beiden Teleskopspiegel räumlich aufgelöst in den Spalt des Spektrometers projiziert. Das erstmals durch Suto und Takami demonstrierte Prinzip konnte in einem miniaturisierten Aufbau, der den beengten Platzverhältnissen in der Instrumentenoptik Rechnung trägt, umgesetzt werden. Dazu wurden in einer aufwändigen Prozessfolge /2/ makroskopisch einzelne Wellenleiter als dünne Glasplatten (Dicke je nach gewünschter Spektrometer-Auflösung im Bereich 70  $\mu\text{m}$  bis 500  $\mu\text{m}$ ) mit einem Silber-Rückseitenspiegel auf einer der Seitenflächen versehen und in einem Montageprozess mit präziser Seitversatz mit einer Genauigkeit  $<10 \mu\text{m}$  aufeinander gestapelt (Abb. 1). Dabei kam ein indexangepasster Klebstoff zum Einsatz, der passend zur numerischen Apertur des Wellenleiters die Totalreflexion des im Wellenleiter geführten

The Large Binocular Telescope (LBT) on Mount Graham (Arizona, US), having two 8 m mirrors, is currently one of the most advanced telescopes for astronomy. The Leibniz Institute for Astrophysics Potsdam (AIP) will implement the PEPSI instrument (Potsdam Echelle Polarimeter and Spectroscopic Instrument), a combination of polarimeter and spectrometer, at the LBT /1/. With a resolution up to 300,000, the spectrometer offers astronomers the opportunity to search e.g. for signatures of extraterrestrial life on earth-like planets.

For the complex configuration of the spectrometer at Fraunhofer IOF, a waveguide based image-slicer was realized for the first time that projects the light, fed by fibers from the two mirrors of the telescope, into the slit of the spectrometer with spatial resolution. This principle, first demonstrated by Suto and Takami, was now transferred to a miniaturized setup, which takes the limited volume in the optics of the instrument into account. Within a complex process algorithm /2/, individual and macroscopic glass plates (thickness depending on the required spectrometer's resolution, between 70  $\mu\text{m}$  and 500  $\mu\text{m}$ ) were equipped with an Ag-backside mirror at one of the side faces and then precision placed with a pitch (required accuracy  $<10 \mu\text{m}$ ) to form a stack (Fig. 1). An index-matching adhesive was used to provide total internal reflection for the numerical aperture of the light guided within the glass plate as a waveguide. The stacks then had to be grinded and polished into the final, miniaturized geometry before being integrated by precision assembly on a common ZERODUR substrate (Fig. 2).

1 *Teilweise bearbeiteter, einzelner Slicer-Stapel.* | *Partially machined individual slicer stack.*

2 *Image-Slicer, fertig aufgebaut und in Halterung montiert.* | *Image slicer, completely assembled and integrated into a mechanical mount.*



Lichts sicherstellt. Die Stapel mussten anschließend in hoher Präzision mittels Schleifen und Polieren in die finale, miniaturisierte Geometrie überführt werden, bevor abschließend die Integration der so gefertigten einzelnen Image-Slicer mittels Präzisionsmontage auf einem ZERODUR-Substrat zur Gesamtbaugruppe erfolgte (Abb. 2).

Eine erste Vermessung des PEPSI-Image-Slicers ergab, dass der optische Verlust und die Degradation der F-Zahl in der Wellenleiterstruktur den zulässigen Vorgaben entspricht. Bei den realisierten drei spektralen Auflösungen (100.000, 200.000 und 300.000), in Abb. 2 verdeutlicht durch die treppenförmig angeordneten Ausgangs-Fenster in verschiedener Anzahl und Größe wird, fertigungsbedingt eine unterschiedliche Qualität der Abbildung in den Spalt erreicht. Die erzielten Ergebnisse liegen innerhalb der erreichbaren Fertigungstoleranzen. Damit ist sichergestellt, dass wie geplant das PEPSI-Instrument inklusive des Image-Slicers als zentraler Baugruppe in 2014 am LBT in Betrieb genommen werden kann.

#### Literatur / References

- /1/ Strassmeier, K. G. et al.: The science case of the PEPSI high-resolution echelle spectrograph and polarimeter for the LBT. *Astronomische Nachrichten* 325, 27 (2004).
- /2/ Beckert, E. et al.: Waveguide image-slicers for ultrahigh resolution spectroscopy. *Proc. SPIE* 7018 (2008).

A first evaluation of the PEPSI image slicer proved that optical losses and the focal ratio degradation are in line with the requirements. Concerning the three realized resolutions (100,000, 200,000 and 300,000), seen in Fig. 2 by different sizes and numbers of the various stepwise output windows, different optical performances when illuminating the slit are achieved, all within the required tolerances. This ensures that the PEPSI instrument including the image slicer as a core component can be setup and provide "first light" to schedule at the LBT in 2014.

#### AUTHOR

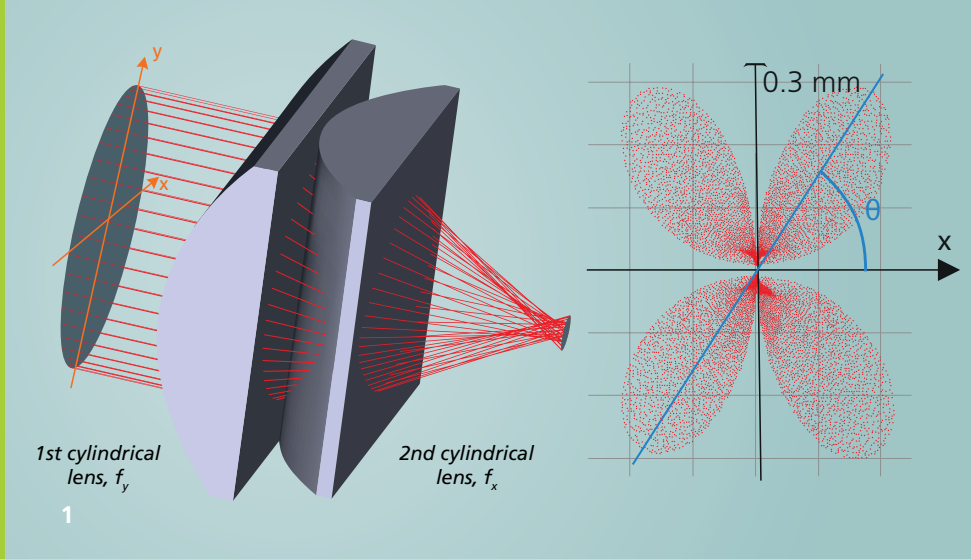
Erik Beckert

#### CONTACT

Dr. Erik Beckert

Phone +49 3641 807-338

[erik.beckert@iof.fraunhofer.de](mailto:erik.beckert@iof.fraunhofer.de)



# ERWEITERTE QUALITÄTSANALYSE SYMMETRIE-FREIER OPTIKSYSTEME EXTENDED ANALYSIS OF OPTICAL SYSTEMS FREE OF SYMMETRY

In konventionellen Optiksyste men gibt es viele Möglichkeiten, um die optische Qualität zu bewerten. In der Konzeptphase ist es sehr wichtig, die innere Struktur eines Systems zu verstehen und die Wirkung aller Systemkomponenten auf die Gesamtqualität zu erfassen. Dies kann mittels der Seidelbildfehler erfolgen, die aber nur in der dritten Ordnung der Bildfehlerentwicklung und für rotationssymmetrische Systeme gültig sind. Für moderne Anwendungen sind allgemeine Geometrien und Freiformflächen von großem Interesse. Daher werden aktuell verallgemeinerte Methoden und Werkzeuge zur Bewertung der Systemqualität und der Struktur benötigt. In einem ersten Schritt wurde das bekannte Aldis Theorem /1/ verwendet und zusammen mit dem Ansatz von Brewer /2/ verallgemeinert. Eine Einschränkung des Ansatzes ist momentan die noch Einzelstrahl-basierte Modellierung, entsprechende Ideen zur Formulierung integraler Kriterien sind in Vorbereitung. Die Anwendung dieses Konzepts erfolgte zunächst auf ein anamorphotisches System aus zwei gekreuzten asphärischen Zylinderlinsen. Die Ergebnisse zeigen wie erwartet die Probleme dieser Anordnung.

Im Fall des anamorphotischen Systems werden zwei Bildorte zur Berechnung der transversalen Aberrationen betrachtet. Abbildung 1 zeigt das System aus zwei gekreuzten Zylinderlinsen mit dem Spotdiagramm. Die ungewöhnliche Form des Spotmusters lässt sich mit der nicht-paraxialen Phasen-

In conventional optical systems, there are many ways to evaluate and assess functional performance. In the concept phase and the design of optical systems, an understanding of the structure, the effect of the individual components and their contribution to the total quality is crucial. The old-fashioned Seidel approach results in additive surface contributions, but it is only valid in the 3rd order of the perturbation theory of aberrations and only defined for circular symmetry. Nowadays, more general geometries of the system layout as well as freely shaped surfaces are of great interest. As a first step towards this goal, a proposed theorem according to Aldis /1/ and a famous generalization following Brewer /2/ are extended. In the general case, it is necessary to define a pilot ray which serves as a reference. The application of this concept is first restricted to an anamorphotic system of two crossed aspherical cylindrical lenses and the results are promising and able to indicate the problems that are known for these types of systems.

Fig. 1 shows the geometry of an anamorphotic system consisting of two crossed aspherical cylindrical lenses together with the spot diagram of the system performance on axis. The strange shape of the pattern can be understood by the non-separability of non-paraxial phase functions of the components in x and y directions. Fig. 2 shows the surface contributions of the system to the transverse

1 Aufbau eines Testsystems aus zwei gekreuzten Zylinderlinsen mit Spotdiagramm. |

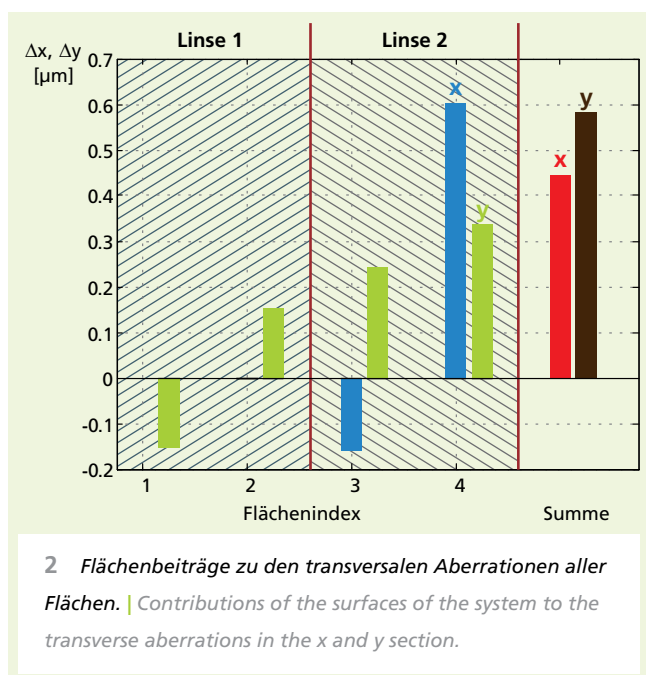
Layout of a test system with two crossed cylindrical lenses and corresponding spot diagram.

funktion der Komponenten in x- bzw. y-Richtung verstehen. Abbildung 2 zeigt die Flächenanteile der Aberrationen. Man erkennt, dass die erste Linse perfekt wirkt, während alle verbleibenden Restfehler von der zweiten Linse kommen.

aberrations and the total value. It can be seen that the first lens as a components works perfectly, while the second lens produces residual aberrations.

### Literatur / References

- /1/ Cox, A.: A System of Optical Design, Focal Press, (1964).
- /2/ Brewer, S.: Surface contribution algorithms for analysis and optimization, JOSA 66 (1976) p8.

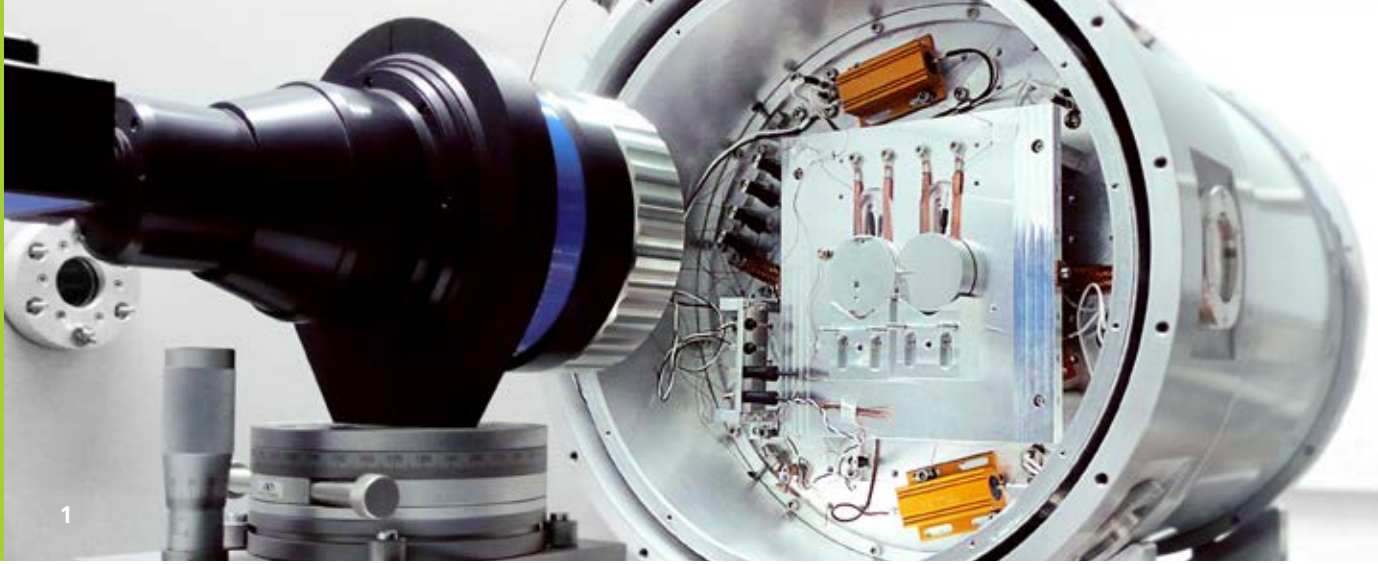


### AUTHORS

Herbert Gross  
Chang Liu  
Olga Rodenko

### CONTACT

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



## NEUE WERKSTOFFKOMBINATION FÜR KRYOGENE METALLOPTIKEN A NOVEL APPROACH FOR CRYOGENIC METAL OPTICS

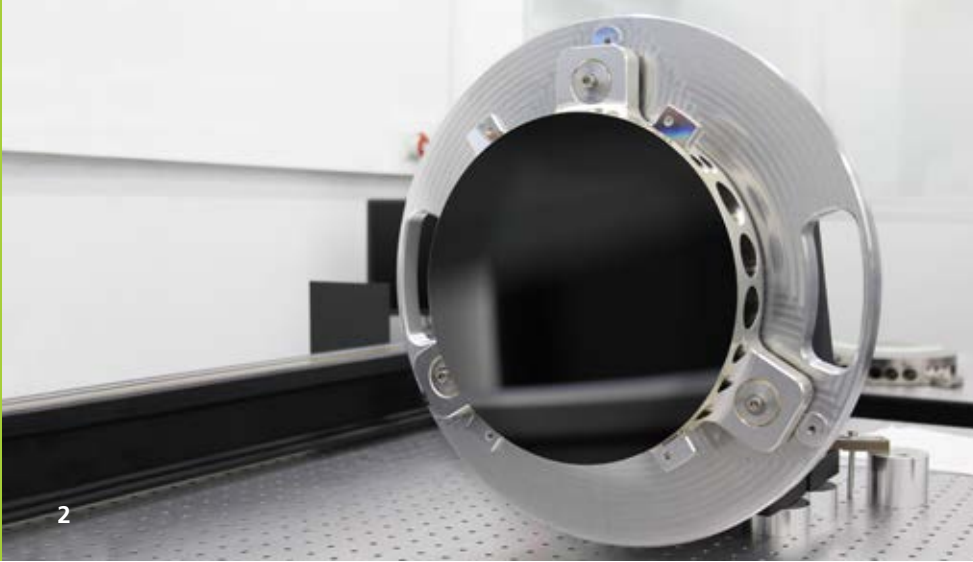
Ultrapräzise Metalloptiken werden insbesondere für Weltraumanwendungen sowie für wissenschaftliche Instrumentierungen von Großteleskopen bei unterschiedlichsten Applikationstemperaturen eingesetzt. Im Rahmen eines Verbundprojektes mit dem Max-Planck-Institut für Astronomie wurde eine athermale Werkstoffkombination entwickelt, welche für Applikationen bei 77 K geeignet ist. Hierbei wird ein thermisch angepasster Aluminiumwerkstoff mit etwa 40% Silicium (AlSi40) als Substratmaterial mit 50 µm bis 150 µm röntgenamorphem Chemisch Nickel (NiP) als Polierschicht verwendet. Chemisch Nickel ermöglicht die Anwendung deterministischer Polier- und Korrekturverfahren und ist damit Voraussetzung für die Anwendung von Metalloptiken vom NIR bis zum kurzwelligen UV-Wellenlängenbereich. Um den Bimetalleffekt zu minimieren, werden die thermischen Ausdehnungskoeffizienten beider Werkstoffe, Substrat und Polierschicht, über ihre chemischen Zusammensetzungen angepasst. Die Feinabstimmung erfolgt über die gezielte Einstellung der Phosphorkonzentration der Chemisch Nickel-Schicht. Hierzu wurde eine Beschichtungstechnologie realisiert, mit der unterschiedliche Phosphorkonzentrationen, respektive

Ultra-precise metal optics are preferably used for space applications and scientific instrumentation of large telescopes covering a highly variable temperature range. An athermal combination of materials which is suitable for those applications was investigated in a collaborative project with the Max Planck Institute for Astronomy. The substrate aluminum material containing about 40 wt% silicon (AlSi40) is thermally matched to the polishing layer made of X-ray amorphous electroless nickel. Electroless nickel permits deterministic polishing and local correction techniques and is therefore mandatory for the application of metal optics down to the ultraviolet wavelength range. To minimize the bimetallic effect, the coefficient of thermal expansion of the substrate and the polishing layer are tailored by means of their chemical composition. The fine tuning is done via a defined phosphorus concentration of the electroless nickel layer. For this purpose, a plating system was established which allows for electroless nickel layers with different phosphorus concentrations and different coefficients of thermal expansion. This correlation was investigated in detail for a temperature range of -185 °C to 100 °C. A specialized thermal treatment and aging procedure for the

**1** *Geöffnetes Kryo-Interferometer am Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg. |*

*Open cryo-interferometer at the Max-Planck-Institute for Astronomy, Heidelberg.*

**2** *Primärspiegel für eine TMA-Optik für die PCW-Mission (AlSi40 + NiP). Das Projekt wurde als Unterauftrag der ABB Canada für das Space Technology Development Program der Canadian Space Agency realisiert. | Primary mirror of the TMA metal optics for the PCW Mission (AlSi40 + NiP). The project was realized under a subcontract from ABB Canada for the Space Technology Development Program of the Canadian Space Agency.*

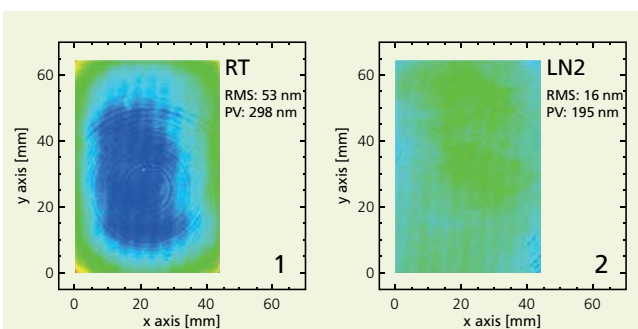


thermische Ausdehnungskoeffizienten, hergestellt werden können. Des Weiteren wurde eine notwendige thermische Behandlungsabfolge für AlSi40 entwickelt, um formstabile Metalloptiken für kryogene Applikationen herstellen zu können. Mittels im Projekt realisierter Interferometrie unter kryogenen Bedingungen kann die durch den minimierten Bimetalleffekt, aber auch die durch Montagekräfte entstehende Formabweichung, analysiert werden. Durch eine deterministische Korrekturtechnik, Magnetorheological Finishing (MRF), kann diese Formabweichung in der Chemisch Nickel - Schicht vorgehalten werden. In Abbildung 3 sind die Formabweichungen von einer bei Raumtemperatur mittels MRF korrigierten (links) und bei  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  analysierten (rechts) Metalloptik gezeigt. Dieser Metallspiegel ist Teil eines Instruments (METIS) für das European-Extremely Large Telescope, um beispielsweise die Expansion unseres Universums direkt zu messen.

Die Arbeiten wurden im Projekt »MOT – Statische und aktive Metalloptik höchster Qualität für Tieftemperaturanwendungen« durch die Forschungskoooperation der Fraunhofer-Gesellschaft mit der Max-Planck-Gesellschaft gefördert.

new material combination was also developed to create dimensionally stable metal optics for cryogenic applications. An interferometrical setup was developed to analyze the remaining shape deviation at cryogenic temperatures. This measured form deviation at cryogenic temperatures can be preshaped in the electroless nickel layer by deterministic form correction such as magnetorheological finishing (MRF). Defined shape deviation at room temperature results in a minimized deviation at the working temperature of  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Fig. 3 illustrates the shape deviations of a metal mirror which has been corrected by MRF at room temperature (left) compared to  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  (right). This particular mirror is part of a breadboard optic (METIS), an instrument for the European Extremely Large Telescope, which can be used to directly analyze the expansion of our universe.

The work was carried out as part of the "MOT – Static and Active Metal Optics of the Highest Quality for Low Temperature Applications" project and was funded by the research cooperation of the Fraunhofer Society and the Max Planck Society.



**3** Formabweichung nach MRF bei Raumtemperatur (links) und finale Spiegeldeformation bei 77 K (rechts). |  
Form deviation after MRF at room-temperature (left) and final form deviation at 77 K (right).

#### AUTHOR

Jan Kinast

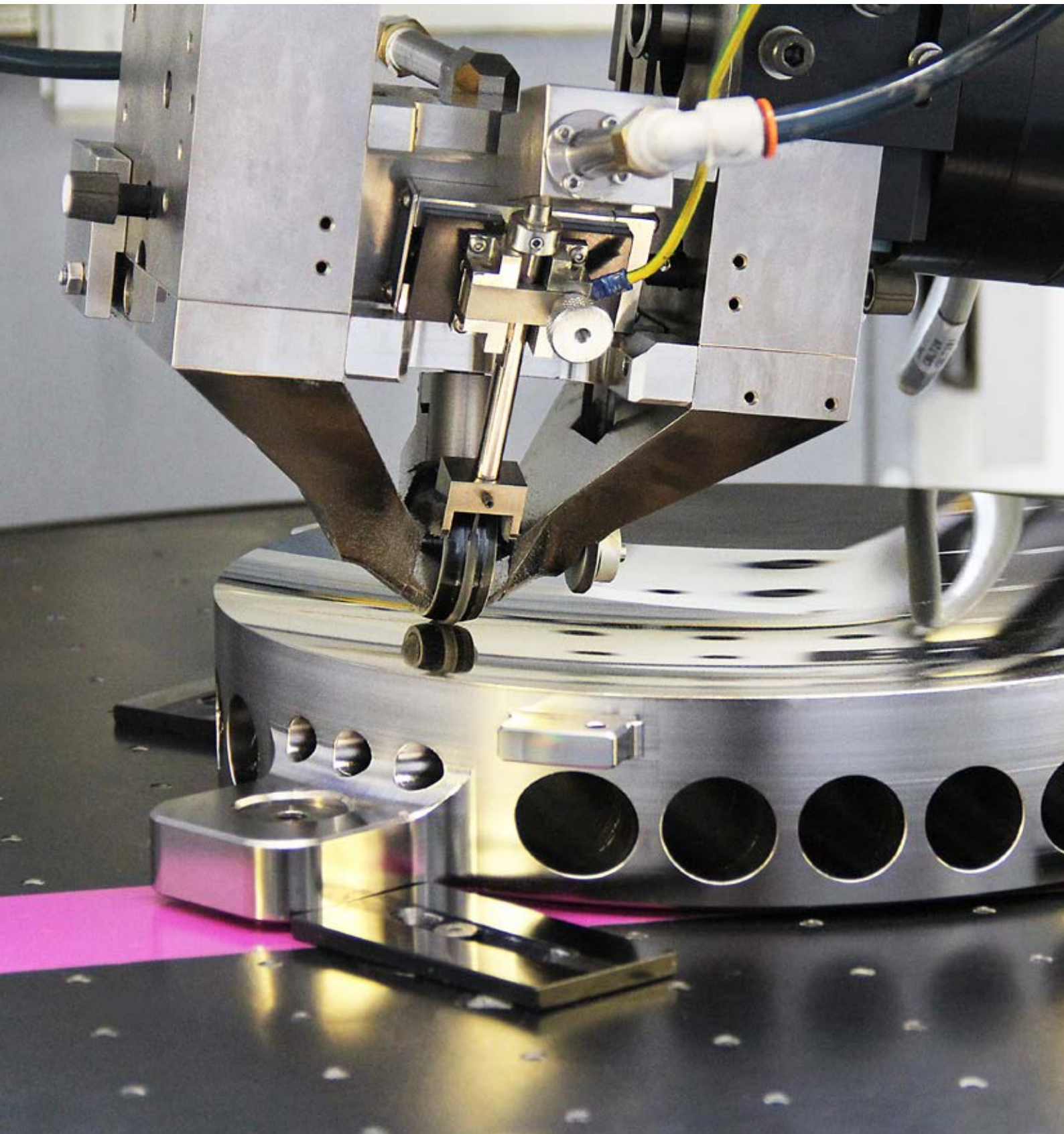
#### CONTACT

Jan Kinast

Phone +49 3641 807-364

jan.kinast@iof.fraunhofer.de

**GESCHÄFTSFELD**  
**BUSINESS FIELD**



# FEINMECHANISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME / PRECISION ENGINEERING COMPONENTS AND SYSTEMS

Die Kombination von Feinmechanik und Optik stellt ein Alleinstellungsmerkmal des Fraunhofer IOF innerhalb der deutschen und europäischen Forschungslandschaft dar und setzt die Tradition Jenas als einen der führenden Optikstandorte fort. Die Schwerpunkte der Forschungstätigkeiten in diesem Geschäftsfeld sind die Auslegung und Herstellung von mechanischen Baugruppen für definierte Anforderungen (z.B. Vakuum, Temperatur, Spannung, Leichtbau), Technologieentwicklungen zu speziellen Komponenten bzw. Bewegungssystemen (z.B. Chucks), Verfahrensentwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik von optischen Systemen (z.B. Laserlöten, CO<sub>2</sub>-Laserspleißen, SPDT, Drucken), der Aufbau und die Erprobung von Demonstratoren und Prototypen sowie die Entwicklung von Sondermaschinen und Vorrichtungen (z.B. Justierdrehmaschinen).

Die ultrapräzise Freiformbearbeitung von Abformwerkzeugen setzt die Kompetenzen dieses Geschäftsfeldes anhand von höchsten Anforderungen gezielt um. Ebenso werden hochpräzise metallische Freiformspiegel mittels Magnetorheological Finishing zur Formkorrektur und gleichzeitigen Glättung der Spiegeloberfläche hergestellt.

Digitale Druckverfahren zur Funktionsintegration auf polymerbasierten Chips werden genutzt, um zum Beispiel Mikropumpen für Lab-on-Chip Systeme zu realisieren.

The combination of precision engineering and optics represents a unique feature of the Fraunhofer IOF in the German and European research environment and continues the tradition of Jena as a leading optical center. The focus of the research activities in this segment are the design and manufacture of mechanical assemblies for defined requirements (e.g. vacuum, temperature, voltage, lightweight construction), technology developments for specific components or motion systems (e.g. chucks), process development for the construction and connection technology of optical systems (e.g. laser soldering, CO<sub>2</sub> laser splicing, SPDT, printing), the construction and testing of demonstrators and prototypes, and the development of special machines and devices (e.g. adjustment milling machine).

The ultra-precision freeform machining of molding tools implements the competencies of this business segment to the highest standards.

Similarly, high-precision metallic freeform mirrors are produced with magnetorheological finishing for shape correction and simultaneous smoothing of the mirror surface.

A method for digital printing of integrated functions on polymer-based chips is used, for example, to implement micro-pumps for lab-on-chip systems.

**LEFT** Formkorrektur eines 330 mm Freiformspiegels mit MRF. Die Technologie ermöglicht die Bearbeitung von Substraten mit Aperturen bis zu 950 mm x 1250 mm. | Figure correction of a 330 mm freeform mirror with MRF. The technology enables the machining of substrates with apertures up to 950 mm x 1250 mm.



## HERSTELLUNG HOCHPRÄZISER FREIFORMSPIEGEL MIT MRF® FABRICATION OF HIGH PRECISION FREEFORM MIRRORS WITH MRF®

Spiegeloptiken auf Aluminiumbasis werden heutzutage durch moderne Diamantbearbeitungsverfahren in komplexen asphärischen oder freigeformten Geometrien hergestellt. Dabei sind die so gefertigten optischen Bauelemente jedoch oftmals auf Anwendungen im langwelligen infraroten Spektralbereich (IR) oder nahem Infrarot (NIR) limitiert. Gründe dafür sind insbesondere die verbleibenden Formabweichungen aufgrund der endlichen Maschinengenauigkeiten der Ultrapräzisionsdrehmaschinen sowie Streuverluste bei kurzen Einsatzwellenlängen als Resultat der typischen Diamantdrehstrukturen. Für Applikationen im kurzwelligen VIS oder im ultravioletten Spektralbereich (UV) werden durch zusätzliche Politur- und Formkorrekturtechniken die Formabweichung und die Mikrorauheit der Spiegelbaugruppen auf ein Minimum reduziert.

Magnetorheological Finishing (MRF) ist eine Sub-Aperture-Politurtechnik, welche ein magnetorheologisches Fluid zur Formkorrektur und gleichzeitigen Glättung der Spiegeloberfläche nutzt /1/. Das Fluid wird dazu über ein rotierendes Polierrad geführt, in dessen Umgebung sich ein starkes elektromagnetisches Feld befindet. Im Magnetfeld erhöht sich die Viskosität des Fluides um mehrere Größenordnungen.

Aluminum based mirror optics exhibiting complex aspherical or freeform shaped geometries are manufactured by modern diamond machining techniques. However, components produced in such a way are commonly designed for applications in the long-wave infrared (IR) or near infrared (NIR) spectral range. Limiting factors for shorter wavelengths are especially the finite machining accuracy of the ultra-precision turning machines and scatter losses for shorter wavelength applications as a result of the remaining diamond turning structure. In order to achieve diffraction limited performance for optical systems working in the short-wave VIS or even in the ultraviolet (UV) range, additional polishing and figuring steps are used to reduce the figure deviation and the microroughness of the mirrors to a minimum.

Magnetorheological Finishing (MRF) is a sub-aperture polishing technique using a magnetorheological fluid for figure correction with a simultaneous smoothing of the optical surface /1/. The fluid is delivered to a rotating spherical polishing wheel surrounded by a strong electromagnetic field. In the magnetic field the viscosity of the fluid increases by several orders of magnitude. While defined plunging the optics to be polished into the stiffened fluid, high local shear forces are generated leading to a material removal from the optical surface.

**1** Einzelspiegel für ein hyperspektral abbildendes Teleskop. Die Formabweichung jedes Spiegels wurde durch MRF auf  $< 20 \text{ nm rms}$  verbessert. Durch eine zusätzliche Politur wurde die Mikrorauheit der Spiegeloberfläche auf  $< 0,5 \text{ nm rms}$  reduziert. | Three single mirrors for a hyperspectral imaging Three Mirror Anastigmat (TMA). The figure deviation of each mirror was reduced to  $< 20 \text{ nm rms}$  with MRF. An additional post polishing reduced the microroughness to  $< 0.5 \text{ nm rms}$ .



Durch definiertes Eintauchen der zu polierenden Optik in das Fluid entstehen lokal hohe Scherkräfte, welche zum Materialabtrag auf der Oberfläche führen.

Das Fraunhofer IOF nutzt das MRF-Verfahren zur Herstellung hochpräziser Einzelspiegel und Spiegelsystemen mit hohen Anforderungen an Formgenauigkeit und Oberflächengüte (Abb. 1). Als Polierschichten eignen sich insbesondere amorphe Nickel-Phosphor- oder Silizium-Schichten, die auf dem Grundmaterial abgeschieden werden. Entsprechend dem meist interferometrisch bestimmten Formfehler wird nun die Abweichung zur Designfläche über eine CNC-basierte Verweilzeitsteuerung korrigiert. Die Abbildung auf Seite 46 zeigt beispielhaft die MRF-Bearbeitung eines 330 mm Freiformspiegels mit einem 50 mm Polierrad /2/. Der verbleibende Formfehler wurde in drei Bearbeitungsschritten auf ca. 112 nm PV (Peak to Valley) / 16 nm rms (root mean square) reduziert. Gleichzeitig wurde die Mikrorauheit von 5 nm rms nach dem Diamantdrehen auf ca. 2 nm rms nach der MRF-Bearbeitung verbessert.

Die Ergebnisse entstanden im Unterauftrag von ABB Canada für die Canadian Space Agency.

#### Literatur / References

- /1/ Golini, D., Kordonski, W., Dumas, P., Hogan, S.J.: Magnetorheological Finishing in commercial precision optics manufacturing. Proc. SPIE 3782. (1999).
- /2/ Beier, M., Scheiding, S., Gebhardt, A., Loose, R., Risse, S., Eberhardt, R., Tünnermann, A.: Fabrication of high precision metallic freeform mirrors with Magnetorheological Finishing (MRF). Proc. SPIE 8884. (2013).

The MRF technology is used at Fraunhofer IOF for manufacturing high precision individual mirrors and mirror systems with challenging demands on form accuracy and surface finish (Fig. 1). Typical polishing materials are oftentimes amorphous nickel-phosphorus or silicon that is deposited on the aluminum base material. Corresponding to the mostly interferometrically determined figure deviation, a sophisticated CNC-based dwell time algorithm is used to reduce the deviation of the optical surface to its design shape. Exemplary, figure on page 46 illustrates the figure correction of a 330 mm freeform mirror with a 50 mm polishing wheel /2/. The figure deviation was reduced to 112 nm p.-v. (peak to valley) / 16 nm rms (root mean square) within three machining steps only. Simultaneously, the microroughness is improved from 5 nm rms after the diamond turning step to about 2 nm rms after MRF.

The presented results were achieved under a subcontract from ABB Canada for the Space Technology Development Program of the Canadian Space Agency.

#### AUTHORS

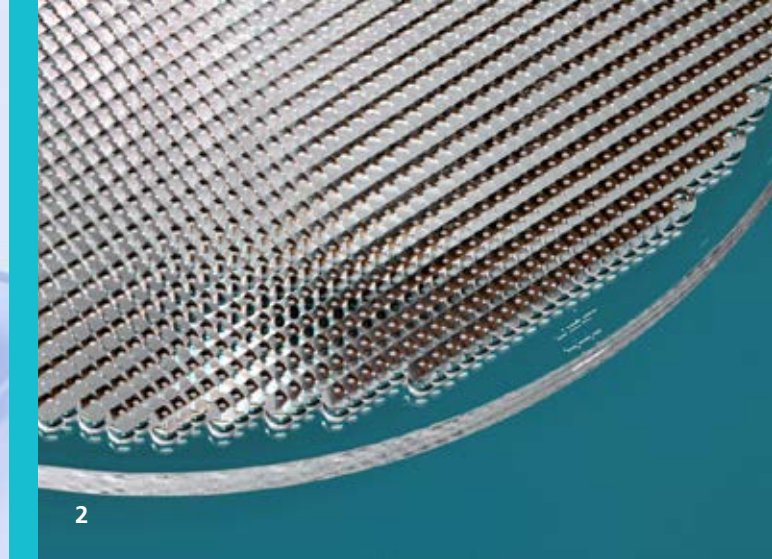
Matthias Beier  
Roman Loose  
Andreas Gebhardt  
Stefan Risse

#### CONTACT

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



1



2

## ULTRA-PRÄZISE FREIFORMBEARBEITUNG VON ABFORMWERKZEUGEN ULTRA-PRECISE FREEFORM MACHINING OF MOLDING TOOLS

Replikationsverfahren erschließen die Serienherstellung von präzisen Komponenten für Beleuchtungs- oder Abbildungsoptiken. Grundlage für den Erfolg ist neben dem Fertigungsverfahren die Entwicklung von Abformwerkzeugen. Dabei sind die Fertigungstoleranzen des Abformwerkzeuges etwa eine Größenordnung genauer als die der späteren Optik. Wissenschaftlich und marktrelevant sind Replikationen in Polymer durch Spritzguss und Spritzprägen sowie in Glas durch Heißpressen.

Aufgrund des moderaten Temperaturbereiches erlaubt das Abformen in Polymer und die Replikation niedrigschmelzender Gläser die Anwendung von Abformwerkzeugen auf Basis von Aluminium oder Stahl kombiniert mit amorphen Nickel-Phosphor-Schichten (Abb. 1). Die Bearbeitung der NiP-Dickschicht erfolgt dabei mit ultra-präzisen Technologien und ermöglicht eine Rauheit unter 5 nm rms (root mean square) und Formabweichungen im Bereich von 0,5 µm PV (peak to valley) für Abformwerkzeuge bis 50 mm Durchmesser. Mit der Diamantbearbeitung steht eine hervorragende Technik zur Realisierung komplexer Strukturen wie Sphären, Asphären und Freiformen zur Verfügung. Häufig werden dabei spezielle Oberflächen mit Arraystrukturen (Abb. 2) oder diffraktiven Elementen in die optische Funktionsfläche (Abb. 1) integriert.

Replication processes open up the series production of precise components for applications in the field of illumination and imaging optics. Beside process development, the developing of molding tools is basis for success. For this, molding tools should be at least an order of magnitude more precise than the optics to be manufactured. Replications by injection molding in a polymer and by press molding in glass are of interest in scientific and market-induced terms.

Due to the limited temperature range, the molding in polymer and replication of low-melting glass allow application of molding tools based on aluminum and steel, respectively, combined with nickel-phosphorus coatings (Fig. 1). In such a case, the processing of the NiP thick-layer is carried out with ultra-precise technologies, enabling roughness values below 5 nm rms (root mean square) and form deviations in the range of 0.5 µm p.-v. (peak to valley) for molding tools with 50 mm in diameter. Diamond machining is an excellent technique for the processing of complex structures like spheres, aspheres, and freeforms as well. At this, special surfaces with array structures (Fig. 2) or with diffractive elements are often integrated in optical function surfaces (figure 1). The molding tool is composed of two single elements whose pairing is achieved by combining upper and lower molding surfaces. It is installed

1 *Abformwerkzeuge konkav und plan tlw. diffraktiv strukturiert, (KOMPASS-Projekt). | Concave, plane, and diffractive structured molding elements, respectively, (cooperation within the project KOMPASS).*

2 *Polymerer Wabenkondensator mit beidseitigem Linsenarray, (FREE-Projekts). | Double sided lens array condenser, (cooperation within the project FREE).*

Das Abformwerkzeug wird aus zwei Einzelementen gebildet. Die Paarung erfolgt durch die Kombination einer unteren und einer oberen Abformfläche. Das Abformwerkzeug wird gepaart und indexiert in die Replikationsanlage eingebaut. Es werden zunehmend Referenzstrukturen eingesetzt, welche vorzugsweise im Diamantbearbeitungsprozess in einer Aufspannung realisiert werden.

Die Replikation von Glas im offenen oder geschlossenen Heißprägeverfahren erfordert temperaturbeständige Abformwerkzeuge. Infolgedessen werden ausgewählte CrNi-Stähle oder Wolframkarbid eingesetzt. Die Diamantbearbeitung ist aufgrund der Werkstoffeigenschaften und der Wechselwirkung mit dem Diamantwerkzeug nur noch unter besonderen Bedingungen möglich.

Am Fraunhofer IOF wurde hierzu eine ultraschall-unterstützte Bearbeitung etabliert. Die Ultraschall-Unterstützung reduziert die Kontaktzeit des Werkzeugs mit der Werkstückoberfläche und verhindert Überhitzung, reduziert Verschleiß und sichert geringe Schnittkräfte. Der Aktor wurde mit einer Frequenz von 39 kHz und einer elliptischen Schwingung betrieben. Im Ergebnis konnten Abformwerkzeuge mit einer Rauheit kleiner 30 nm rms und Formabweichungen von kleiner 2,5 µm PV bzw. ca. 0,5 µm rms demonstriert werden. Durch zusätzliche Korrekturzyklen werden Formabweichungen unter 1 µm PV erreicht. In einem nachfolgenden Polierschritt zur Glättung der Oberfläche werden Werte von kleiner 3 nm rms erzielt.

Die Arbeiten wurden vom BMBF in den Projekten KOMPASS (FKZ: 13N10839) und FREE (FKZ: 13N10827) gefördert.

in the replication system paired and indexed. For this purpose, reference structures are used increasingly whose diamond machining process can be carried out in one setting.

The replication of glass in a hot-embossing process, open or closed, requires temperature-resistant molding tools. Thus, selected CrNi steels or tungsten carbide are inserted. Caused by material properties and interactions with the cutting tool, however, diamond machining is only possible under special conditions. For this, an ultrasonic-supported processing method was established at Fraunhofer IOF. Due to the combination with the ultrasonic device, the contact time of molding tool and component surface is reduced, thus preventing overheating, reducing wear, and ensuring low cutting forces, respectively. The actuator operates at a frequency of 39 kHz and is powered by elliptical oscillation.

As a result, molding tools with roughness values lower than 30 nm rms and with form deviations less than 2.5 µm p.-v. and 0.5 µm rms, respectively, can be shown. Moreover, form deviations less than 1 µm p.-v. are achievable by additional correction loops. Values below 3 nm rms are realized by smoothing the surface in a subsequent polishing step.

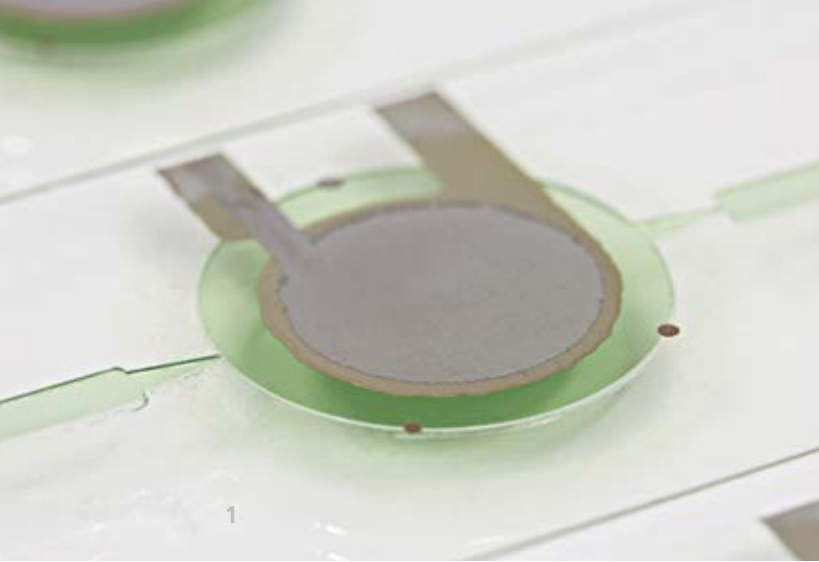
Financial support by the BMBF in the form of the projects KOMPASS (FKZ: 13N10839) and FREE (FKZ: 13N10827) is gratefully acknowledged.

#### AUTHORS

Stefan Risse  
Andreas Gebhardt  
Ralf Steinkopf  
Wilko Fuhlrott  
Ramona Eberhardt

#### CONTACT

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



## GEDRUCKTE MIKROPUMPE FÜR LAB-ON-A-CHIP SYSTEME PRINTED MICROPUMP FOR LAB-ON-A-CHIP SYSTEMS

Im Bereich der Lebenswissenschaften wurden in den vergangenen Jahren verstärkt optofluidische Lab-on-a-Chip Systeme (LOC) für eine schnelle, patientennahe Diagnose entwickelt. Die Systeme basieren auf strukturierten Glas- oder Polymerchips, die Flüssigkeitskanäle und Kammern aufweisen, in denen chemische oder biologische Nachweisreaktionen ablaufen. Die Auswertung erfolgt zumeist mithilfe optischer Detektion. Im Gegensatz zu klassischen Laborverfahren werden Flüssigkeitsvolumina von nur wenigen Mikrolitern benötigt, zudem ist perspektivisch keine voluminöse und kostenintensive Laborausrüstung erforderlich. Mikropumpen stellen Kernkomponenten dieser Systeme dar und ermöglichen die kontrollierte Verteilung der Flüssigkeiten auf dem Chip. Ein Nachteil derzeitiger LOC Systeme ist, dass die Pumpfunktion und weitere Funktionalitäten in der Regel nicht auf dem Chip integriert sind, sondern extern stattfinden.

Am Fraunhofer IOF werden digitale Druckverfahren zur Funktionsintegration auf polymerbasierten Chips untersucht. Es wurde eine Mikropumpe entwickelt, deren Aktor vollständig gedruckt ist. Eingesetzt wurde ein drop-on-demand Inkjet Verfahren, bei dem Lösungen oder Dispersionen funktionaler Materialien additiv und maskenlos auf Substrate aufgebracht werden. Das Verfahren ermöglicht einen ressourcen-

Optofluidic lab-on-a-chip systems (LOC) have attracted growing interest in the life science sector for fast point-of-care diagnostics during the past years. Such systems are based on glass or polymer chips that exhibit fluid channels and chambers in which chemical or biological reactions take place. Optical detection is typically used for analysis purposes. In contrast to traditional lab methods only small volumes of analytes and reagents of few microliters are necessary. Furthermore no cost-intensive and bulky lab equipment is required. Micropumps are key components of LOC systems and realize controlled fluid motion on the chip. However, in current LOC systems pumping and other functionalities are commonly not integrated on the chip but arranged externally. Fraunhofer IOF investigates digital printing technologies as a tool for function integration in polymer-based chips.

A micropump with an all inkjet-printed actuator was developed. Drop-on-demand inkjet printing is capable of an additive and mask-free deposition of solutions or dispersions of functional materials on different substrates. It enables a resource-efficient deposition and is therefore beneficial especially in combination with cost-efficient replication processes that are used for the production of optofluidic chips. The pump consists of an actuated membrane and a polymer chip

**1 Demonstrator einer Mikropumpe auf Basis inkjet-gedruckter piezoelektrischer Polymere. |**

*Demonstrator of a micropump based on inkjet-printed piezoelectric polymers.*

**2 Inkjet-gedruckte Elektroden auf flexiblem Polymersubstrat. |**

*Inkjet-printed electrodes on a flexible polymer substrate.*

schonenden Materialauftrag und eignet sich daher insbesondere für die Kombination mit kosteneffizienten Replikationsprozessen, die zur Fertigung optofluidischer Polymerchips bereits eingesetzt werden. Die Pumpe besteht aus einer aktuierten Membran und einem Polymerchip, der eine Pumpkammer und passive Ventile aufweist (Abb. 1). Durch eine zyklische Bewegung der Membran stellt sich ein gerichteter Flüssigkeitstransport ein.

Diese wird durch piezoelektrische Polymeraktoren erzielt, die auf passive Polymerfolien gedruckt werden. Die Aktoren bestehen aus einer Sandwichanordnung von einem gedruckten piezoelektrischen Polymer [P(VDF-TrFE)] zwischen zwei gedruckten Silberelektroden auf Basis von Silber-Nanopartikel Dispersionen (Abb. 2). Die maximale Temperatur der Wärmebehandlung bzw. des Sinterns der gedruckten Schichten beträgt 130 °C und ist damit kompatibel mit temperaturempfindlichen Substraten. Das statische und dynamische Auslenkungsverhalten der Aktoren wurde modelliert und experimentell untersucht. Es konnte ein piezoelektrischer  $d_{31}$ -Koeffizient von 7 bis 9 pm V<sup>-1</sup> ermittelt werden [1]. Erste Pumpdemonstratoren wurden aufgebaut. Es wurden Pumpraten im Bereich von 5 bis 10 µL min<sup>-1</sup> erzielt. Es wird erwartet, dass durch optimierte Ansteuerung und Geometrien höhere Pumpraten von mehr als 100 µL min<sup>-1</sup> erreicht werden können.

Die Arbeiten wurden vom BMBF im Rahmen der Verbundprojekte »Komplexer Optofluidchip« (FKZ 03IPT609A) und »Optische Mikrosysteme« (FKZ 16SV5472 K) gefördert.

with a pump chamber and passive valves (Fig. 1). With a cyclic actuation of the membrane a directed fluid flow is realized.

Actuation is realized by piezoelectric polymer unimorph actuators that are printed onto passive polymer substrates. The actuators consist of a printed piezoelectric polymer [P(VDF-TrFE)] sandwiched between two electrodes printed from silver nanoparticle dispersions (Fig. 2). The maximum process temperature (130 °C) is compatible with different polymer substrates. The static and dynamic deflection behavior was studied and the piezoelectric  $d_{31}$  coefficient measured to be 7 to 9 pm V<sup>-1</sup> [1]. The first iteration of a pump demonstrator exhibits pump rates of approximately 5 to 10 µL min<sup>-1</sup>. It is expected that with optimized driving conditions and geometries higher pump rates above 100 µL min<sup>-1</sup> can be realized.

The work was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the joint research projects "Komplexer Optofluidchip" (FKZ 03IPT609A) and "Optische Mikrosysteme" (FKZ 16SV5472 K).

#### References / Literatur

[1] Pabst, O., Perelaer, J., Beckert, E., Schubert, U. S., Eberhardt, R., Tünnermann, A.: All inkjet-printed piezoelectric polymer actuators: Characterization and applications for micropumps in lab-on-a-chip systems, *Organic Electronics* 14 (2013) p. 3423–3429, ISSN 1566-1199.

#### AUTHOR

Oliver Pabst

#### CONTACT

Oliver Pabst

Phone +49 3641 807-360

oliver.pabst@iof.fraunhofer.de

**GESCHÄFTSFELD**  
**BUSINESS FIELD**



# FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN UND SCHICHTEN

## FUNCTIONAL SURFACES AND LAYERS

Das Fraunhofer IOF entwickelt Oberflächenfunktionalisierungen und multifunktionale optische Schichtsysteme auf Kunststoff, Glas, Keramik, Halbleitern und Metall für Wellenlängen vom Röntgen- bzw. Extrem-Ultraviolett bis zum Infrarot-Spektralbereich. Dabei werden vielfältige Anwendungen mit hohem Innovationspotenzial abgedeckt: Von der einfachen optischen Übertragungsfunktion in modernen Strahlquellen und Kommunikationssystemen über Anwendungen in der Medizin, industriellen Fertigung oder Umwelttechnik bis hin zur photovoltaischen oder thermischen Energieerzeugung, Antireflexschichtsysteme sowie Lithographiesysteme. Einen Schwerpunkt bilden hochreflektierende Metalloptiken für extrem kurze Wellenlängen. Hier ist das Fraunhofer IOF dank seines einzigartigen Ausstattungsportfolios in der Lage, Anfragen mit extremen Anforderungen im Hinblick auf Substrate, Gradienten und spektrale Eigenschaften der Schichten zu erfüllen.

Breitbandentspiegelungen für große Einfallswinkel oder auch die Modellierung der optischen Eigenschaften von Silberschichten sind derzeit aktuelle Themen.

Zudem wurden Techniken erarbeitet, die die Erzeugung systematischer, aufgabenspezifischer Modellschichten mit abgestuften Nanorauheiten für hydrophobe und hydrophile Systeme umfasst.

Zur Realisierung hochreflektiver Optiken können statt amorpher Vielschichtstapel auch resonante Wellenleitergitter Verwendung finden.

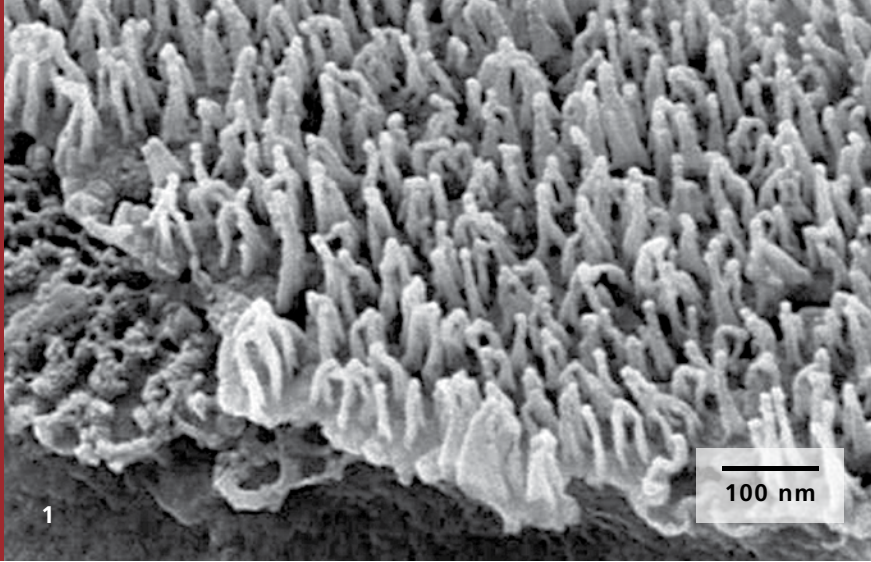
Um den gestiegenen Anforderungen an Mehrschichtabscheidungen für den EUV-Spektralbereich gerecht zu werden, wurde am Fraunhofer IOF in Zusammenarbeit mit der Leybold Optics GmbH ein neues EUV-Sputtersystem – NESSY-3 entwickelt.

The Fraunhofer IOF develops surface functionalizations and multifunctional optical coatings on plastic, glass, ceramics, semiconductors, and metals for wavelengths from X-ray or extreme ultraviolet to infrared wavelengths. This covers a wide range of applications with considerable innovation potential: from simple optical transfer functions in modern beam sources and communication systems through applications in medicine, industrial manufacturing or environmental technology, photovoltaic or thermal energy, anti-reflective coating systems, and lithography systems. One focus is on high reflective metal optics for extremely short wavelengths. The Fraunhofer IOF can satisfy requests with extreme requirements in terms of substrates, gradient or spectral properties of the layers thanks to its unique portfolio of technologies and facilities.

Broadband antireflection coatings for large incident angles and the modeling of optical properties of silver layers are current topics. In addition, techniques have been developed for the generation of systematic, task-specific model layers with graded nanoroughness for hydrophobic and hydrophilic systems.

To realize highly reflective optics, resonant waveguide gratings can be used instead of amorphous multilayer stacks. To meet further requirements of multi-layer depositions, a new EUV sputtering system, NESSY-3, was developed at Fraunhofer IOF in cooperation with the Leybold Optics GmbH.

**LEFT** *Aufdampfanlage ORKA zur Herstellung organischer und anorganischer optischer Schichten. | Evaporation chamber ORKA used for deposition of inorganic and organic optical coatings.*



## DOPPEL-STRUKTUREN ZUR BREITBANDIGEN ENTSPIEGELUNG DOUBLE-STRUCTURE FOR WIDEBAND ANTIREFLECTION PROPERTIES

Für Anwendungen in Kameras, Mikroskopen, medizinischen Geräten und Sensoren werden hochwertige optische Linsen benötigt, deren gekrümmte Oberflächen gut entspiegelt sein müssen. Hier setzt das BMBF-Vereinbarungsjahrprojekt FIONA an, welches im Rahmen des Förderprogramms »Optische Technologien« gefördert wird /1/. FIONA steht für »Farbneutrale Interferenzschichten zur Entspiegelung unter Berücksichtigung organischer Nanostrukturen«.

Wenn die auf eine gekrümmte Linse aufgebrachte Entspiegelung auch im Randbereich noch effektiv im sichtbaren Spektralbereich wirken soll, so muss sie im Mittenbereich eine wesentlich größere spektrale Bandbreite aufweisen. Eine solche Beschichtung kann durch konventionelle Interferenzschichtsysteme kaum realisiert werden. Basierend auf den langjährigen Erfahrungen bei der Erzeugung von plasmageätzten Nanostrukturen in Polymeren werden am Fraunhofer IOF verschiedene Wege beschritten, die spektrale Bandbreite von Entspiegelungen zu erhöhen /2/. Eine neue Möglichkeit zur Breitbandentspiegelung bietet die Kombination verschiedener Strukturen durch mehrfaches aufeinanderfolgendes Beschichten und Plasmaätzen von organischen Materialien. Die Parameter und Materialien müssen dabei so optimiert werden, dass die erste auf dem Substrat angeordnete Struktur bei einem der nachfolgenden Beschichtungs- und Ätzschritte nicht wieder zerstört wird /3/.

Optical lenses with high-end antireflection properties are required for many applications such as cameras, microscopes, medical devices and sensors. The BMBF joint project FIONA which is founded in context of the BMBF program "Optical technologies" is focused on that problem /1/. FIONA means "Colorless interference layers for antireflection by using organic nanostructures".

An antireflective coating can work powerful in the edge regions of a lens only, if the spectral bandwidth of the coating in the center of the lens is much broader than normally required for the visible spectral range. This requirement is difficult to achieve with conventional interference layers. Based on experiences with plasma-etched nanostructures on polymers, several procedures and coating designs are currently investigated at Fraunhofer IOF to broaden the performance of antireflection systems /2/. One of the new opportunities is to combine several nanostructures by repeating the coating and etching of organic materials several times. In that case, process parameters and materials have to be optimized in order to make the deepest structure near to the substrate stable for the downstream operations of coating and etching /3/. In a first experiment, the procedure was tested successfully on the polymer substrate ZEONEX. Fig. 2 shows the improved performance of the new system in comparison to the commonly used AR-structure and a standard AR-interference coating.

1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Doppelstrukturen auf Zeonex . |

Scanning electron microscope image of double structures on Zeonex.



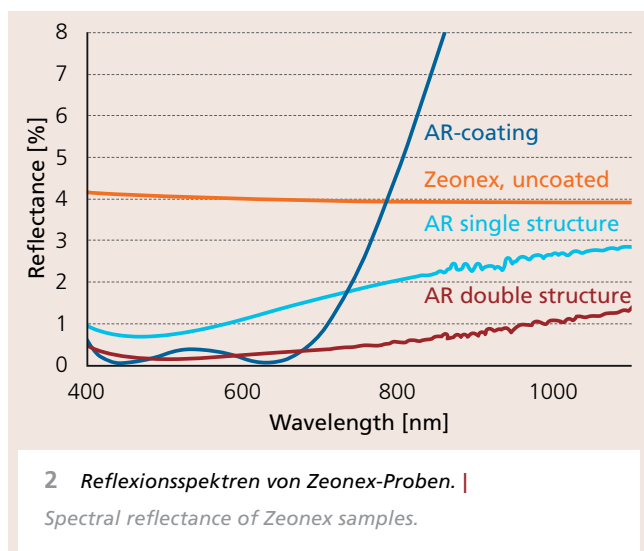
In ersten Experimenten wurde das neue Herstellungsverfahren erfolgreich für das Polymermaterial ZEONEX erprobt. Abb. 2 zeigt, dass die im neuen Prozess hergestellte Doppelstruktur (Abb. 1) eine wesentlich geringere Restreflexion aufweist, als die bisher verwendete einfache Ätzstruktur oder ein Standard-AR-Schichtsystem.

Die Übertragung des Verfahrens auf Glaslinsen setzt die Beherrschung der Schichtabscheidung verschiedener organischer Materialien durch Aufdampfen voraus. Zu diesem Zweck wurde am Fraunhofer IOF im Juli 2013 eine spezielle Vakuum-Aufdampfanlage für Organika in Betrieb genommenen.

The transfer of the procedure to glass lenses requires the mastering of organic thin film preparation by thermal evaporation. The technological basis to realize organic antireflective systems is a new vacuum coating chamber with special equipment for organic compounds which has been taken into operation at Fraunhofer IOF in July.

#### References / Literatur

- /1/ [http://www.photonikforschung.de/fileadmin/Verbundsteckbriefe/8.\\_Plasma/Projektsteckbrief\\_Plasma-Fiona.pdf](http://www.photonikforschung.de/fileadmin/Verbundsteckbriefe/8._Plasma/Projektsteckbrief_Plasma-Fiona.pdf).
- /2/ Schulz, U.: Opt. Express 17, 8704-8708 (2009).
- /3/ Fraunhofer IOF, patent application DE102013106392.6.

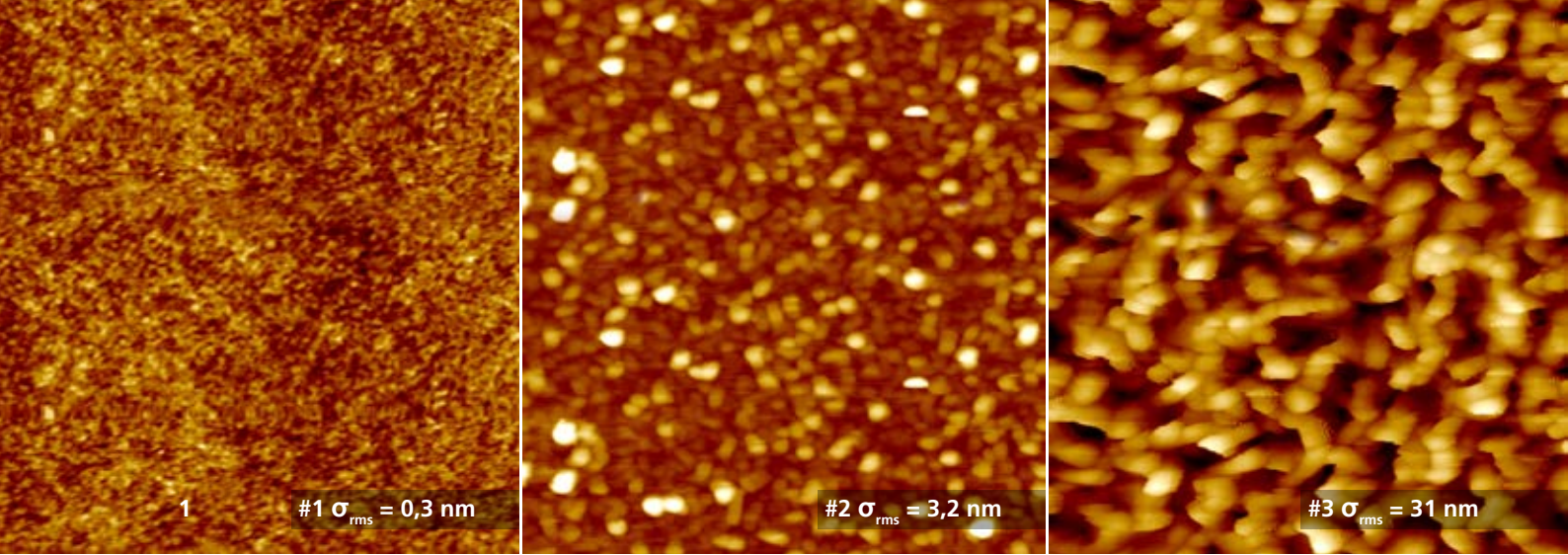


#### AUTHORS

Ulrike Schulz  
Friedrich Rickelt

#### CONTACT

Dr. Ulrike Schulz  
Phone +49 3641 807-344  
[ulrike.schulz@iof.fraunhofer.de](mailto:ulrike.schulz@iof.fraunhofer.de)



## FUNKTIONALE MODELLSCHICHTEN MIT ABGESTUFTEN RAUHEITEN

## FUNCTIONAL MODEL COATINGS WITH GRADED ROUGHNESS

Oberflächen mit besonderen funktionalen Eigenschaften generieren seit Jahren starkes Interesse. Prominente Beispiele dafür sind die Benetzungsphänomene Superhydrophobie /1/ und Superhydrophilie und damit verbundene Effekte wie Selbstreinigung und Antibeschlag. Der Schlüssel zur technischen Realisierung solcher Oberflächen liegt neben den Materialeigenschaften in einer geeigneten Rauheitsstrukturierung. Entwickler entsprechender Technologien benötigen dafür Know-How über Zusammenhänge von Struktur und funktionaler Eigenschaft, um Trial-and-Error-Ansätze zu vermeiden.

Am Fraunhofer IOF wurden deshalb Techniken erarbeitet, die neben den Methoden zur strukturellen und funktionalen Analyse auch die Erzeugung systematischer, aufgabenspezifischer Modellschichten umfassen. Die Tauchbeschichtung mittels Sol-Gel-Synthese erwies sich dabei als attraktive Herstellungsmethode. Damit lassen sich Modellschichten mit definiert abgestuften Nanorauheiten herstellen und Zusammenhänge zwischen Oberflächenstrukturen, funktionalen Eigenschaften und Streulichtverlusten aufklären. Beispielhaft wurden  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schichten auf Glassubstrate aufgebracht und durch thermische Behandlung in Wasser abgestuft aufgeraut (Abb. 1). Durch zusätzliches Aufbringen einer Fluoralkylsilan-Deckschicht kann die Oberfläche der intrinsisch

The interest in specific functional properties has been increasing continuously for at least a decade. Prominent examples are wetting phenomena such as superhydrophobicity /1/ and superhydrophilicity with their related self-cleaning and anti-fog effects. In addition to appropriate chemical compositions, successful technical realization of such surfaces requires specially tailored roughness characteristics. To develop reliable technologies while avoiding experimental trial-and-error approaches, a profound understanding of the relationship between the structure and functional properties is essential.

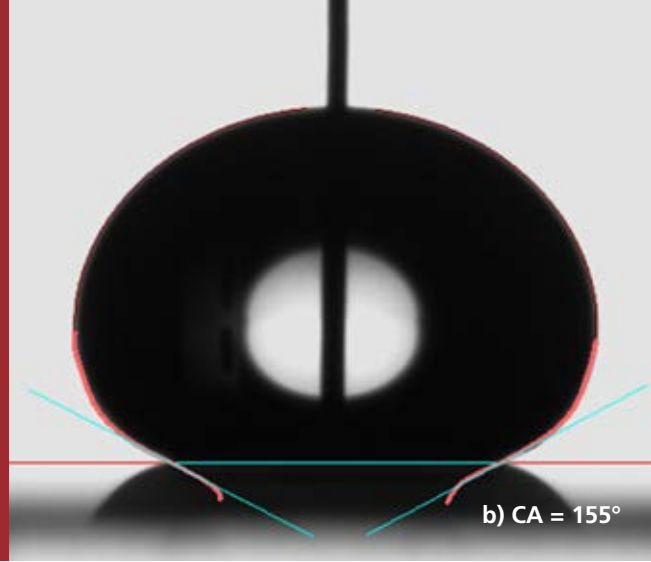
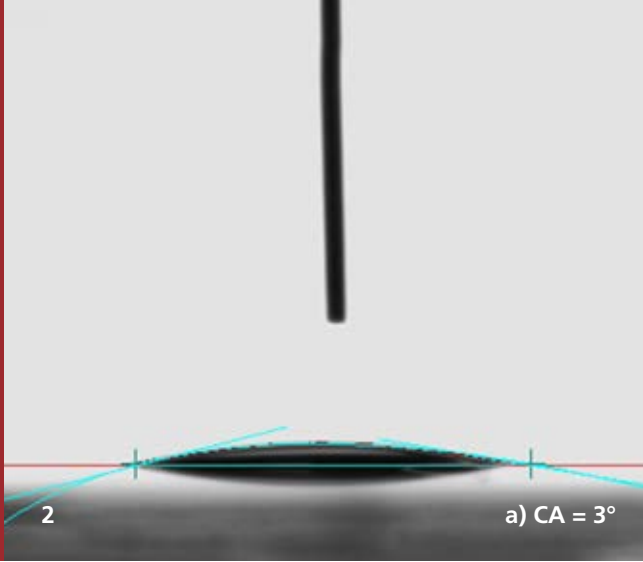
Fraunhofer IOF thus established a comprehensive methodology comprising structural and functional measurement and analysis techniques as well as a fabrication process for systematic and task-related model coating series. Here, sol-gel dip-coating proved to be the favorable process. It enabled the deposition of coatings with graded nanoroughness and hence a correlation between the roughness, functional, and optical properties. We deposited, for example,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -sol-gel coatings on glass substrates with subsequent roughening of the film surface by thermal treatment in water (Fig. 1). Applying an additional, thin fluoroalkylsilane top layer turns the intrinsic hydrophilic  $\text{Al}_2\text{O}_3$  material into a hydrophobic surface. The presented results demonstrate how the wetting phenomena

1 *Topographie von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Sol-Gel-Schichten mit ansteigender Rauheit.* |

*Topography of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -sol-gel coatings with increasing roughness.*

2 *Kontaktwinkel (KW) der Probe #3: a) ohne Deckschicht b) mit hydrophober Deckschicht.* |

*Contact angle (CA) of sample #3: a) without top layer, b) with hydrophobic top layer.*



hydrophilen Schichten anschließend hydrophobisiert werden. Die Ergebnisse zeigen die Verstärkung des jeweiligen Benetzungseffekts mit ansteigender Rauheit bis hin zum extremen Benetzungsverhalten (Abb. 2, 3).

Mit dieser Methode können reproduzierbare Serien von Modellschichten mit abgestuften Nanorauheiten für hydrophobe und hydrophile Systeme unterschiedlicher Ausprägung bei gleichzeitig hoher optischer Qualität / minimierten Streuverlusten erzeugt werden. Darüber hinaus dienen derartige Schichten zur Untersuchung weiterer funktionaler Eigenschaften, wie z.B. der Korrelationen zwischen Rauheit und Haptik in einem gegenwärtigen Verbundprojekt /2/.

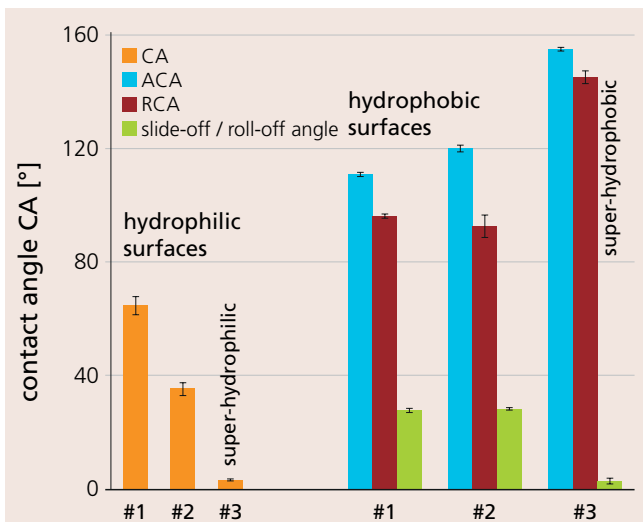
increase with increasing roughness, all the way up to extreme wetting behavior (Figs. 2, 3).

The presented approach enables the fabrication of reproducible series of model coatings with adjustable nanoroughness for both hydrophobic and hydrophilic wetting systems in combination with high optical quality / minimized scattering losses. Furthermore, similar model coatings can also serve as a basis for investigating other functional properties. A current joint project /2/, for example, focuses on studying and correlating roughness and haptic properties.

#### References / Literatur

/1/ Duparré, A., Coriand, L.: Assessment Criteria for Superhydrophobic Surfaces with Stochastic Roughness, *Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion*, Scrivener Publishing LLC, (2013), 193-202.

/2/ Verbundprojekt TOUCH, gefördert durch die Bayerische Forschungstiftung.



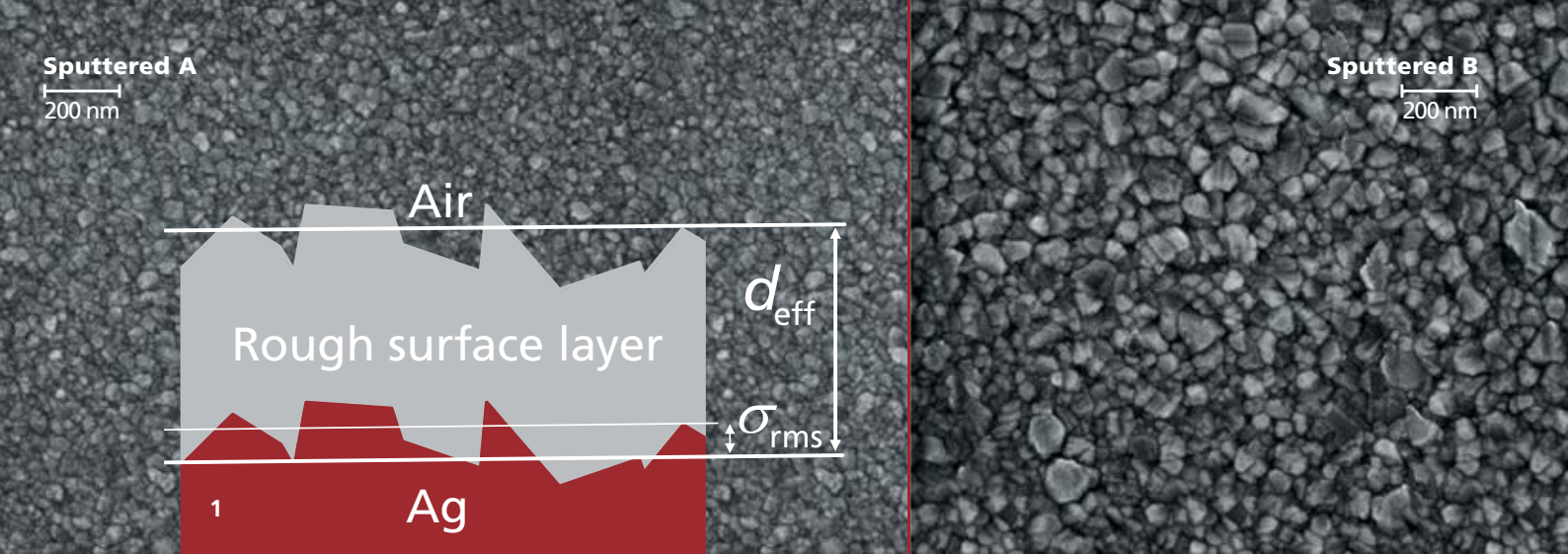
**3** Benetzung: KW für Hydrophilie; Fortschreite-KW (ACA), Rückzugs-KW (RCA) und Abgleit / Abrollwinkel für Hydrophobie. | Wettability: CA for hydrophilicity; advancing CA (ACA), receding CA (RCA) and slide-off / roll-off angle for hydrophobicity.

#### AUTHORS

Nadja Felde  
 Anne-Sophie Munser  
 Pedro Lovato Gomes Jardim  
 Angela Duparré

#### CONTACT

Nadja Felde  
 Phone +49 3641 807-316  
 nadja.felde@iof.fraunhofer.de



## MODELLIERUNG DER OPTISCHEN EIGENSCHAFTEN VON SILBERSCHICHTEN

## MODELING THE OPTICAL CONSTANTS OF SILVER FILMS

In den letzten Jahren hat der Einsatz von metallbasierten Präzisionsschichten für breitbandige Spiegel zugenommen. Gleichzeitig sind deren Anforderungen durch neue Einsatzgebiete wie der Lithographie, der Laser- und Scannertechnik, der spektral aufgelösten optischen Messtechnik und der Astro- und Weltraumtechnik enorm gestiegen. Von besonderer Bedeutung ist die Anwendung in komplexen optischen Systemen wie Teleskopen. Insbesondere hierfür sind Silberspiegel mit höchster Reflexion im gesamten visuellen und nahen bis mittleren infraroten Spektralbereich unverzichtbar geworden. Auch müssen immer mehr Asphären oder Freiformflächen bei größer oder extremer werdenden geometrischen Abmessungen mit höchster Oberflächengüte beschichtet und das Silber gegen äußere terrestrische wie extraterrestrische Umwelteinflüsse geschützt werden.

Das Fraunhofer IOF scheidet geschütztes Silber bereits seit einigen Jahren mittels Bedampfungstechnik ab. Um den neuen optischen und geometrischen Anforderungen, sowie den Ansprüchen hinsichtlich zeitlicher und qualitativer Reproduzierbarkeit gerecht zu werden, wurden solche Systeme auch auf Basis der alternativen Sputterbeschichtungstechnologie entwickelt. Gesputterte Silberschichten weisen jedoch im wichtigen sichtbaren Spektralbereich und insbesondere an der UV nahen Absorptionskante eine geringere Reflexion auf. Um die optischen Eigenschaften des Silbers zu verbessern, erfolgte eine genaue Analyse mittels verschiedener Abscheideparameter hergestellter Silberschichten. Damit konnten optische Eigenschaften und Schichtmorphologie gesputterter

The use of metal-based precision coatings for broadband mirror coatings has increased in recent years. At the same time, the requirements for new fields of technology such as lithography, lasers and scanning, spectral resolved optical measurement technology and astronomical and space technology have also grown. Application in complex optical systems, as found in telescopes, is of particular importance. Consequently, silver mirrors with maximum reflectance within the entire visible and near-infrared up to the intermediate infrared spectral range have become indispensable. In addition, more and more aspheres or freeform surfaces with enlarged or extreme geometrical dimensions of the highest surface quality need to be coated. It is also necessary to protect the silver against terrestrial as well as extraterrestrial environmental influences.

Protected silver coatings have been deposited at Fraunhofer IOF with the evaporation technique for some years. In order to meet the new optical and geometrical requirements and also to satisfy the demands of time and qualitative reproducibility, such systems were also developed on the basis of the sputtering technology. However, in the important visible spectral range and particularly at the UV-near absorption edge, sputtered silver coatings show less reflectance. In order to enhance the optical properties of sputtered silver films, a detailed analysis of silver layers deposited with different deposition parameters was performed. Applying the results of this study, optical properties and coating morphology of sputtered silver coatings as well as

1 *Verschieden raue Silberoberflächen und Modell. | Different rough silver surface and model.*

Silberschichten sowie optische Phänomene und Effekte, wie die Anregung von Oberflächenplasmonen, in einem Modell zusammengefasst werden /1/. Dieses entwickelte Modell (Abb.1) erlaubt die Simulation des Einflusses der Oberflächenrauheit  $\sigma_{rms}$  der Silberoberfläche auf das Reflexionsvermögen geschützter wie auch ungeschützter Silberspiegel, indem eine Oberflächenschicht der Dicke  $d_{eff}$  mit entsprechenden effektiven optischen Konstanten angenommen wird. Mit dieser Hilfe wurden bereits abgeschiedene Systeme konsistent simuliert. Unter Verwendung der gewonnenen Erkenntnisse konnten Abscheidungsprozesse optimiert und somit eine Steigerung der Reflexion gesputterter Silberschichten um ca.1% im UV nahen sichtbaren Spektralbereich erreicht werden (Abb. 2). Mithilfe der ermittelten effektiven optischen Konstanten ist zudem ein in-situ optisches Monitoring des Wachstums der Silberbeschichtung in Reflexion möglich und anwendungsreif geworden /2/.

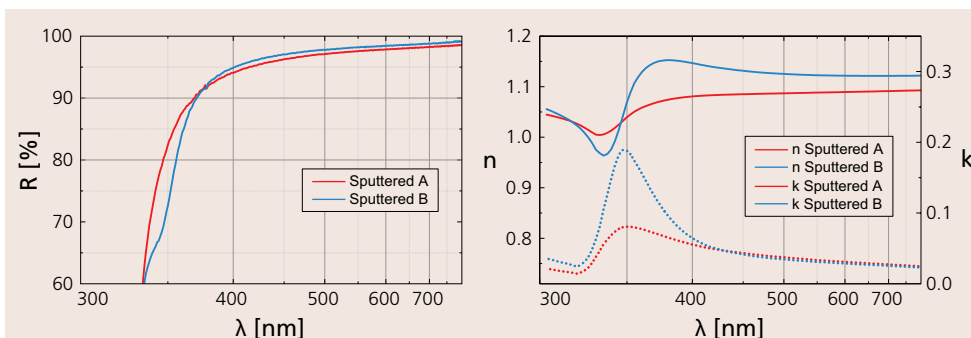
optical phenomena and effects such as excitation of surface plasmons could be integrated in one model.

The developed model allows the simulation of the influence of the silver coating surface roughness  $\sigma_{rms}$  on the reflectivity of protected and unprotected silver mirrors while assuming a surface layer with a thickness of  $d_{eff}$  with suitably effective optical constants. Applying this approach, deposited systems could already be simulated consistently. By using the resulting information, deposition processes could be optimized and the reflectance of sputtered silver coatings improved by about 1% in the near-UV visible spectrum of light. With the determined effective optical constants, in situ optical monitoring of the silver film growth in a reflectance setup also becomes possible and suitable for application.

## Literatur / References

/1/ Jobst, P. J. et al.: Advanced Optical Technologies. Band 3, Heft 1, Seite 91-102, (2014).

/2/ Gäbler, J. et al.: Vakuum in Forschung und Praxis. Band 25, Heft 6, Seite 22–28, (2013).



**2** Links: Reflexionsvermögen zweier gesputterter Silberschichten (A und B); Rechts: Deren ermittelten effektive optische Konstanten. | Left: Reflectance of two sputtered silver coatings (A and B); Right: The effective optical constants.

## AUTHORS

Paul Johannes Jobst<sup>1,2</sup>

Olaf Stenzel<sup>1</sup>

Mark Schürmann<sup>1</sup>

Norbert Modsching<sup>1,2</sup>

Steffen Wilbrandt<sup>1</sup>

Norbert Kaiser<sup>1</sup>

Andreas Tünnermann<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer IOF

<sup>2</sup>Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

## CONTACT

Paul Johannes Jobst

Phone +49 3641 807-327

paul-johannes.jobst@

iof.fraunhofer.de



## NEUE BESCHICHTUNGSANLAGE FÜR HOCHPRÄZISIONS-XUV-OPTIKEN NEW DEPOSITION SYSTEM FOR HIGH-PRECISION XUV OPTICS

Die präzise Abscheidung von hochreflektierenden Mehrschichtsystemen mit lateralem Gradienten auf gekrümmte Substrate stellt eine der großen Herausforderungen bei der Entwicklung von XUV-Optiken dar. Um den Anforderungen an die Mehrschichtabscheidung gerecht zu werden, wurde am Fraunhofer IOF im Zusammenarbeit mit der Leybold Optics GmbH ein Neues EUV-Sputter-System – NESSY-3 entwickelt (Abb. 1, rechts). Derzeit fokussiert sich die Arbeit an dieser Anlage auf laufende F&E-Projekte und stellt einen bedeutenden Schritt in der Entwicklung von XUV-Beschichtungstechnik (Abb. 1) am Fraunhofer IOF dar (Nessy-1 (2002) /1/ und Nessy-2 (2010) /2/).

Das System ist mit sechs rechteckigen Magnetrons von jeweils 250 mm x 125 mm Größe ausgestattet. Die Schichtdicke kann durch die Rotationsgeschwindigkeit der Substrate und die Leistung der jeweiligen Sputterquelle im Sub-Angströmbereich beeinflusst werden. Ein Schicht-dickengradient ist mit einer lateralen Genauigkeit von 0,5 mm auf gekrümmten Substraten mit Durchmessern von bis zu 200 mm realisierbar.

Die ersten Mo/Si/B<sub>4</sub>C- und Cr/Sc/B<sub>4</sub>C-Mehrschicht-Spiegel mit angepassten Grenzflächen wurden im Februar 2013 im Rahmen eines Prozesstests hergestellt, die nun für EUV-Lithographie und Mikroskopie im »Wasserfenster« anwendbar

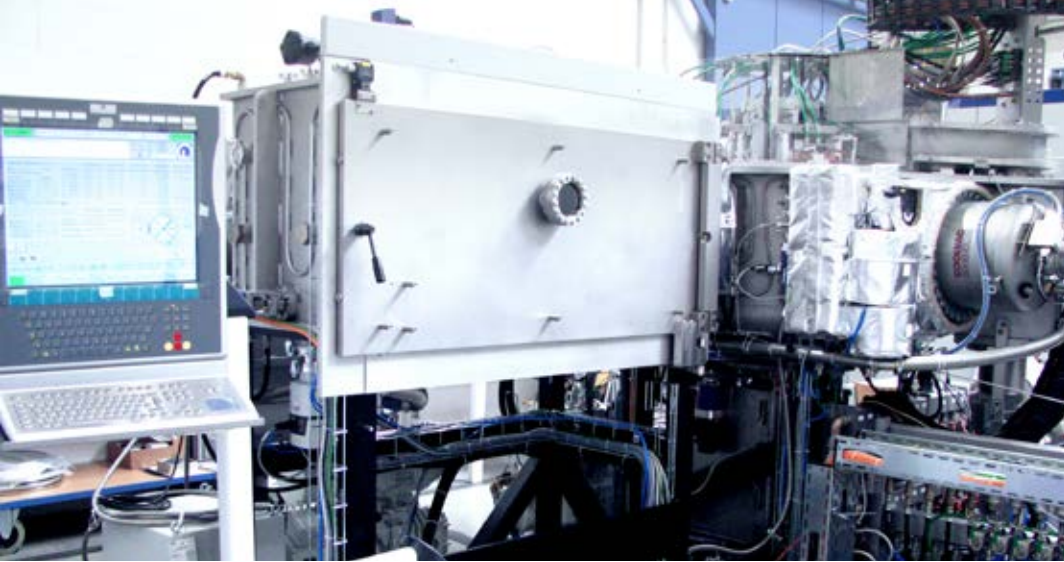
The accurate deposition of high reflective and laterally graded multilayers on ultraprecisely polished curved substrates is one of the major challenges of XUV optics development today. To meet the multilayer coating requirements, a New EUV Sputtering SYstem - NESSY-3 has been developed at the Fraunhofer IOF in collaboration with Leybold Optics GmbH (Fig. 1, right). Currently the Nessy-3 is focusing on running R & D projects and is a logical development step of XUV deposition technique (Fig. 1) at the Fraunhofer IOF (Nessy-1 (2002) /1/ and Nessy-2 (2010) /2/).

The system is equipped with six rectangular magnetrons with sizes of 250 mm x 125 mm each. The layer thickness can be adjusted in the sub Angstrom range by the rotation speed of the substrates and the source power. The gradient of the film thickness with a lateral accuracy less than 0.5 mm can be realized on the curved substrates with diameter up to Ø 200 mm. Substrates are transferred via load lock from the clean room area into the sputtering chamber.

First interface-engendered Mo/Si/B<sub>4</sub>C and Cr/Sc/B<sub>4</sub>C multilayer mirrors for applications in EUV lithography and microscopy in the "water window" were deposited during the process acceptance test (PAT) in Feb. 2013. Normal incidence reflectivity measurements were performed with synchrotron radiation at the PTB Berlin (BESSY II), Germany.

1 Magnetron-Sputtersysteme NESSY-1 (links), NESSY-2 (Mitte) und NESSY-3 (rechts). |

Magnetron sputtering systems NESSY-1 (left), NESSY-2 (middle) and NESSY-3 (right).

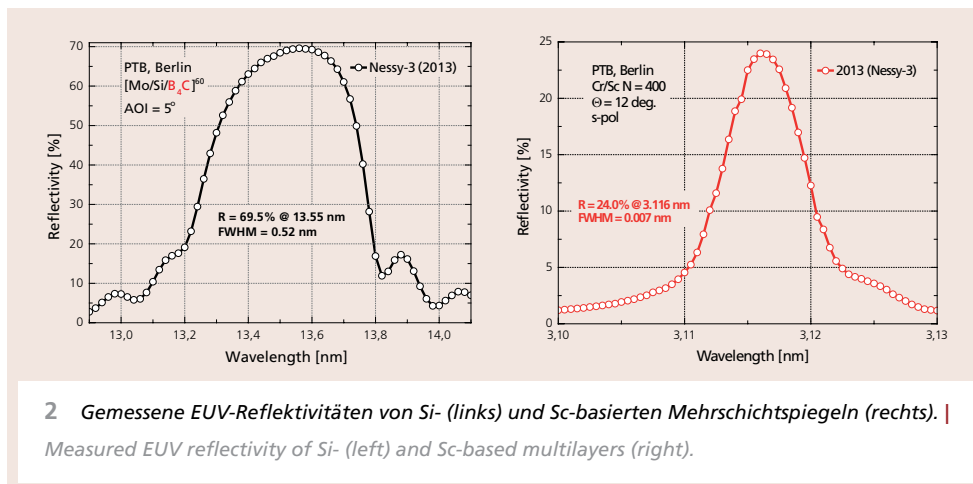


sind. Mittels Synchrotron-Strahlung sind an der PTB in Berlin (BESSY II) Reflexionsmessungen unter senkrechtem Einfall vorgenommen worden. Experimentelle Reflektivitäten von 69,5 % bei einer Wellenlänge von 13,52 nm und 24,0 % bei 3,116 nm für Mo/Si/B<sub>4</sub>C (Abb. 2, links) und Cr/Sc/B<sub>4</sub>C (Abb. 2, rechts) sind bei senkrechtem Einfall schon erreicht worden, ohne dass die vollständige Optimierung des Mehrschicht-Designs und der Abscheidparameter abgeschlossen ist /3/.

Experimental normal incidence reflectivities of 69.5 % at the wavelength of 13.52 nm and 24.0 % at the wavelength of 3.116 nm for Mo/Si/B<sub>4</sub>C (Fig. 2, left) and Cr/Sc/B<sub>4</sub>C (Fig. 2, right) multilayer mirrors have been achieved without full optimization of multilayer design and deposition parameters /3/.

#### Literatur / References

- /1/ Feigl, T., et al.: Fraunhofer IOF Jahresbericht, (2003).
- /2/ Yulin, S., et al.: International Workshop on EUVL, Maui, Hawaii, June 4 - 8, (2012).
- /3/ Yulin, S., et al.: 273th Seminar on VUV&EUV metrology, PTB, Berlin, Oct. 24 - 25, (2013).

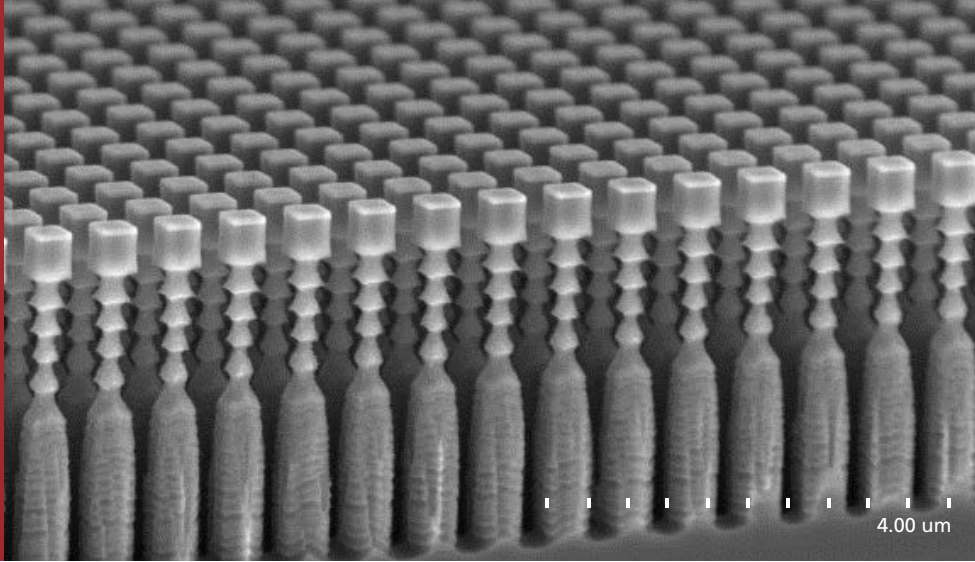


#### AUTHORS

Sergiy Yulin  
Viatcheslav Nesterenko  
Philipp Naujok  
Norbert Kaiser

#### CONTACT

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



## MONOLITHISCHE GITTER FÜR DIE HOCHPRÄZISIONSMETROLOGIE

### MONOLITHIC GRATINGS FOR HIGH-PRECISION OPTICAL METROLOGY

Viele Experimente im Bereich der optischen Hochpräzisionsmetrologie, wie beispielsweise die Realisierung extrem frequenzstabiler Laser, optischer Uhren oder die Detektion von Gravitationswellen erfordern eine Ortsauflösung im Bereich subatomarer Längenskalen /1/. Zum Erreichen dieser Genauigkeiten ist neben einer definierten Effizienz der verwendeten optischen Komponenten, wie z.B. der Spiegel, die Kontrolle der Lichtphase von grundlegender Bedeutung. Thermische Fluktuationen (Rauschen) der Optiken prägen dem Licht eine zusätzliche statistische Phase auf, welche die zu erreichende Sensitivität der Messungen empfindlich stören können.

Zur Reduktion des thermischen Rauschens eignet sich neben der Verringerung der Temperatur auch der Einsatz kristalliner statt amorpher Materialien. Eine Möglichkeit, auf die bei der Realisierung hochreflektiver Optiken etablierten amorphen Vielschichtstapel zu verzichten, bieten resonante Wellenleitergitter, die sich den Effekt resonanter Lichtkopplung zunutze machen. Hierbei stellen insbesondere monolithische T-förmige Strukturen aus kristallinem Silizium einen erfolgversprechenden Ansatz zur Rauschreduktion dar. In zukünftigen Gravitationswellendetektoren kann damit das thermische Rauschen um bis zu eine Größenordnung reduziert werden /2/. Um die Verwendbarkeit dieser rauscharmen Gitter für vielfältige optische Elemente zu ermöglichen, ist eine breitbandige Funktion, beispielsweise eine hohe Winkeltoleranz der Reflektivität not-

Many experiments in the field of high-precision optical metrology, such as the realization of frequency stabilized lasers, optical clocks, or the detection of gravitational waves, require sub-atomic spatial resolutions /1/. In addition to a defined efficiency of the optical components such as mirrors, control of the light's phase is essential for achieving such a high sensitivity. Thermal fluctuations (noise) also impose random phases onto the light which can interfere with the length changes to be detected.

Beside lowering the temperature, crystalline materials can be used to reduce thermal noise. One possibility for the realization of highly-reflective optical components is to apply resonant waveguide gratings which apply the effect of resonant light coupling. They open up a way of avoiding amorphous coating stacks for the realization of high reflectivity optical components. Here, monolithic T-shaped structures made of crystalline silicon are a promising approach. In future gravitational detectors, they enable a reduction of thermal noise by one order of magnitude /2/. A broadband function, for example a high angular tolerance of reflectance, is necessary to enable application of these gratings for various optical components /3,4/. This is feasible with grating structures incorporating a periodicity in two spatial dimensions (Fig. 1), providing the opportunity for the realization of low-noise mirrors, reflective beam splitters, and beam shapers which can significantly enhance the sensitivity of high-precision length measurements.

1 Rasterelektronenmikroskopieaufnahme einer hochreflektiven monolithischen Gitterstruktur aus Silizium. |

Scanning electron microscope image of a high reflectivity monolithic grating structure made of silicon.



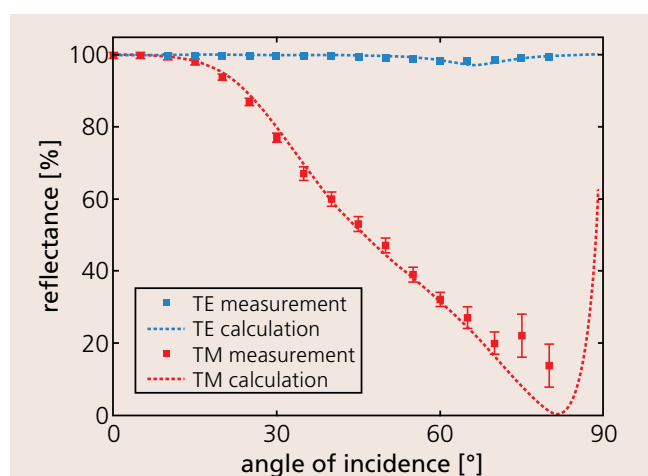
wendig /3,4/. Diese kann durch Gitterstrukturen mit einer Periodizität in zwei Raumdimensionen erreicht werden (Abb. 1). Sie bieten damit die Möglichkeit rauscharme Spiegel, reflektive Strahlteilergritter oder auch Strahlformer zu realisieren, die die Genauigkeit hochpräziser Längenmessungen signifikant steigern können.

Diese Ergebnisse entstanden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Transregio 7 »Gravitationswellen. Quellen. Methoden. Beobachtung« der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

This research is supported by the German Science Foundation (DFG) on the Transregio 7 "Gravitational waves. Sources. Methods. Observation" project.

### References / Literatur

- /1/ Abernathy, M. and the Einstein Telescope Science Team: Einstein gravitational wave Telescope. A conceptual study, <http://www.et-gw.eu/etdsdocument> (2011).
- /2/ Heinert, D., Kroker, S., Friedrich, D., Kley, E.-B., Leavey, S., Martin, I. W., Nawrodt, R., Tünnermann, A., Vyatchanin, S. P., Yamamoto, K.: Calculation of thermal noise in grating reflectors, *Physical Review D* 88 (2013).
- /3/ Kroker, S, Käsebier, T., Kley, E.-B., Tünnermann, A.: Coupled grating reflectors with highly angular tolerant reflectance, *Optics Letters* 38 (2013), p. 3336–3339.
- /4/ Kroker, S, Käsebier, T., Steiner, S, Kley, E.-B., Tünnermann, A.: High efficiency two-dimensional grating reflectors with angularly tunable polarization efficiency, *Applied Physics Letters* 102 (2013).



**2** Winkelabhängige Reflektivität eines monolithischen resonanten Wellenleitergritters aus Silizium mit 2D-Periodizität /2/. | Angle dependent reflectance of monolithic resonant waveguide grating made of silicon /2/.

### AUTHORS

Stefanie Kroker<sup>1</sup>  
Thomas Käsebier<sup>1</sup>  
Ernst-Bernhard Kley<sup>1,2</sup>  
Andreas Tünnermann<sup>1,2</sup>

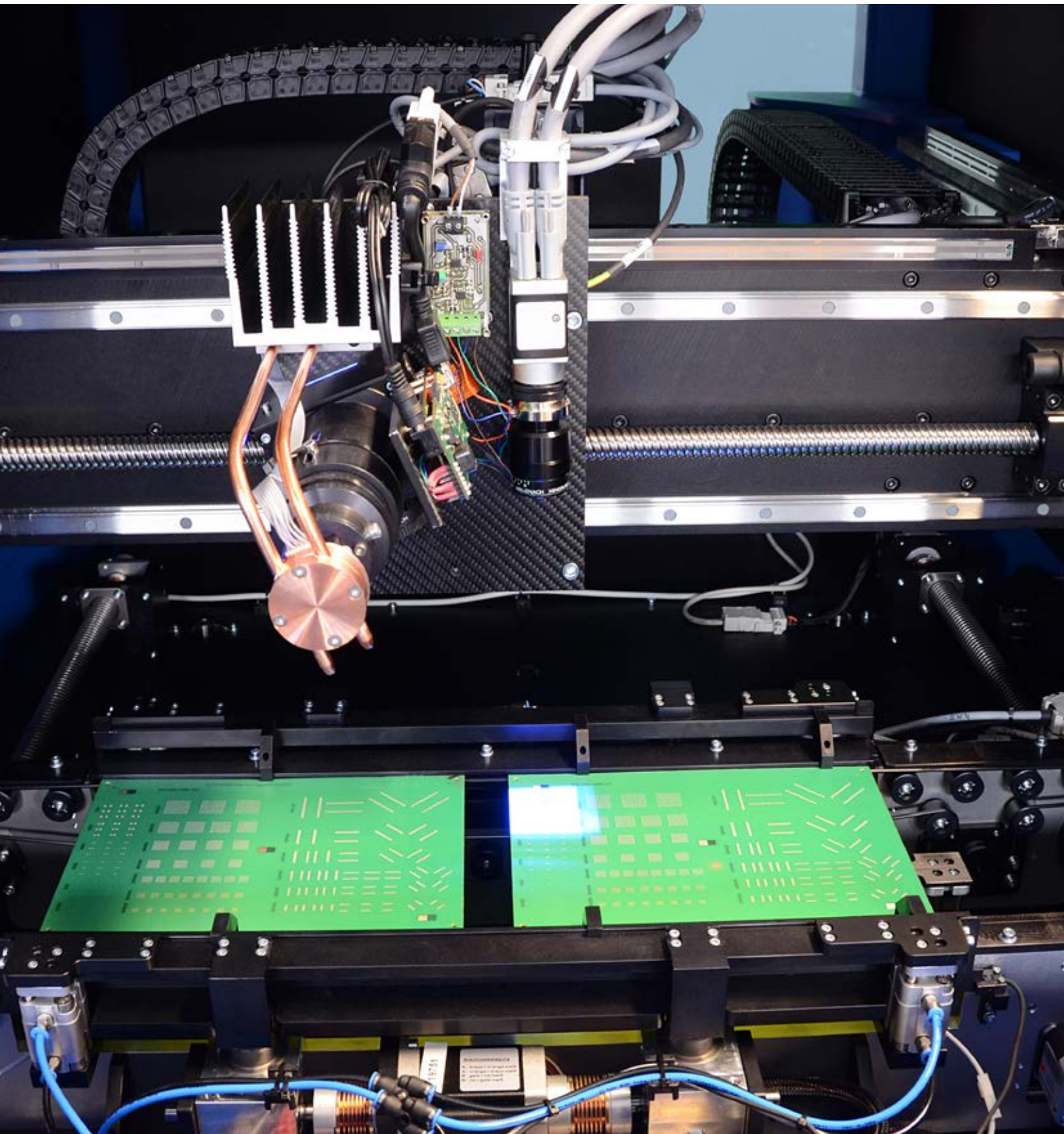
<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>2</sup> Fraunhofer IOF

### CONTACT

Stefanie Kroker  
Phone +49 3641 9-47835  
[stefanie.kroker@uni-jena.de](mailto:stefanie.kroker@uni-jena.de)

GESCHÄFTSFELD  
BUSINESS FIELD



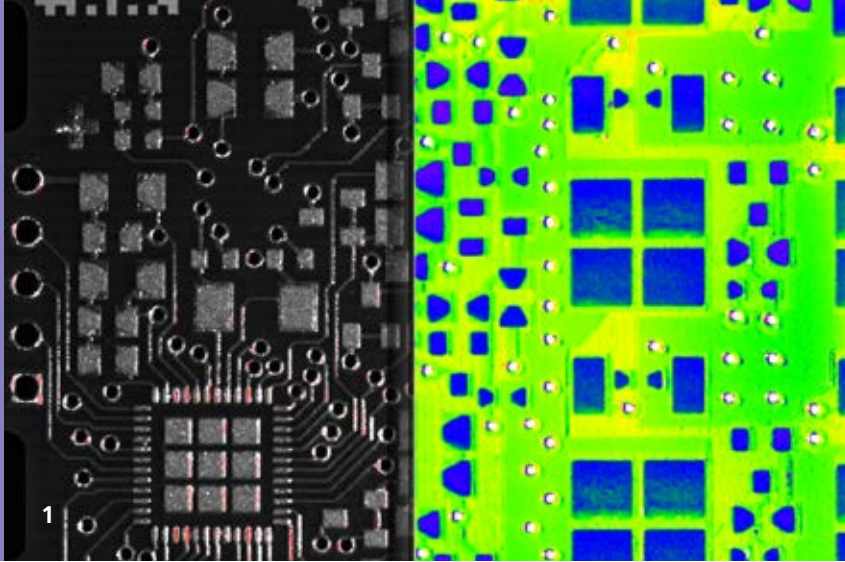
# PHOTONISCHE SENSOREN UND MESSSYSTEME / PHOTONIC SENSORS AND MEASURING SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF entwickelt verschiedenartige optische und optoelektronische Mess- und Sensorsysteme. Die Forschungsarbeiten umfassen neuartige Messmethoden, Sensorprinzipien, Auswerteverfahren sowie Systemlösungen. Dazu nutzt das Fraunhofer IOF modernste optische und miniaturisierte bzw. mikrooptische Komponenten sowie Sende- und Empfangseinheiten (z.B. flache Bildsensoren, bidirektionale Sensoren), Projektionstechniken (Arrayprojektion, LCoS, OLED), Lichtquellen (Femtosekunden-Laser, LEDs), Softwaretechnologien und Rechnerarchitekturen. Einen Schwerpunkt bilden 3D-Messsysteme basierend auf Verfahren der Muster- und Streifenprojektion. Neue technologische Möglichkeiten (fs-Lasern, THz-Detektoren, CT-Systeme) erweitern das Spektrum an tomografischen Messverfahren. Einen weiteren Arbeitsschwerpunkt bilden Systeme zur Schicht- und Oberflächencharakterisierung, darunter streulichtbasierte Messsysteme zur Rauheitsbestimmung, Mikro- und Nanostrukturvermessung oder Defektdetektion an Oberflächen und Schichten sowie zur Charakterisierung von Schichten (Transmission, Reflexion, Streuung, Verlustmechanismen, Schichtdicke). Auf der Grundlage bioinspirierter Ansätze entwickelt das Fraunhofer IOF zudem ultrakompakte multikanalige mikrooptische Bilderfassungssysteme.

Viele der genannten Themen wurden auch in den nachfolgenden Beiträgen zu aktuellen Projekten behandelt, so zum Beispiel für die In-line 3D Inspektion, Streulichtmessung im IR Bereich, Vermessung opto-mechanischer Systeme mittels Computertomographie, Sensoren zur optischen Navigation, Biosensoren, sowie die Charakterisierung photonischer Nanostrukturen.

The Fraunhofer IOF develops a wide range of optical and opto-electronical measurement and sensor systems. Research includes new measuring methods, sensor principles, evaluation, and system solutions. To this end, the IOF uses advanced optical and miniature or micro-optical components, as well as transmitter and receiver units (e.g. flat image sensors, bi-directional sensors), projection techniques (array projection, LCoS, OLED), light sources (femtosecond lasers, LEDs), software technologies, and computer architectures. One focus is on 3D measurement systems based on methods of pattern and fringe projection. Furthermore, the inclusion of tomographic measurement methods was made possible on the basis of new technological opportunities (fs-lasers, THz detectors, CT systems). An additional focal point are systems for coating and surface characterization, including stray light-based measurement systems for roughness determination, micro-and nano-structure measurement, and defect detection on surfaces and layers, as well as for the characterization of layers (transmission, reflection, scattering, loss mechanisms, layer thickness). On the basis of bio-inspired approaches, the IOF also developed ultra-compact multichannel micro-optical imaging systems.

Many of these issues were addressed in articles which followed the project, such as in-line 3D inspection, measuring scattered light in the IR range, measuring opto-mechanical systems by means of CT, sensors for optical navigation, biosensors, and the characterization of photonic nanostructures.



## IN-LINE 3D-LOTPASTENSENSOR INLINE 3D SOLDER PASTE SENSOR

Verfahren der industriellen Qualitätskontrolle, z.B. bei der Leiterplatteninspektion, sollen idealerweise ohne Unterbrechung des Produktionsprozesses ablaufen. Am Fraunhofer IOF wurde zusammen mit einem mittelständischen Unternehmen für Prüftechnik in der Elektronikindustrie die zweite Generation eines streifenprojektionsbasierten Sensors zur Vermessung des Lotpastenauftrags auf Leiterplatten innerhalb des Fließbandprozesses entwickelt, dessen Höhe und Volumen Kenngrößen für die Bearbeitungsqualität sind. Gegenüber der ersten Generation wurde eine deutliche Steigerung der Inspektionsgeschwindigkeit erzielt. Die Bildaufnahme erfolgt nun mit einer Rate von 180 Hz. Dadurch wurde die Bildaufnahmezeit um den Faktor zwölf reduziert. Statt eines einzelnen Messfeldes stehen jetzt modular drei Messfelder mit 40 mm x 40 mm, 30 mm x 30 mm, bzw. 20 mm x 20 mm zur Verfügung.

Mit dem neuen streifenprojektionsbasierten Hochgeschwindigkeitssensor kann die Oberfläche flacher Messobjekte jetzt mit einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von 90 cm<sup>2</sup>/s dreidimensional vermessen werden. Dabei beträgt die reine Bildaufnahmezeit lediglich 33 ms bei einer Zykluszeit von ca. 183 ms. Die restlichen 150 ms werden für den Weitertransport des Sensors durch ein Führungssystem beansprucht. In dieser Zeit findet gleichzeitig die Berechnung der 3D-Messdaten statt. Diese erfolgt zeitoptimiert durch parallele Prozessornutzung. Bei nicht bewegtem Sensor und entsprechend schnellerem Durchlauf der Messobjekte können somit potenziell noch höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten erzielt werden. Damit sind hervorragende Voraussetzungen

Industrial quality inspection increasingly requires methods which do not interrupt the production process. This, for example, is the case in conductor board production where the height and volume of the solder paste are characteristic parameters concerning processing quality. Together with a medium-sized electronics business for test engineering in the electronics industry in Thuringia, Fraunhofer IOF developed the second generation of a fringe projection based sensor for the inline solder paste measurement of conductor boards. In contrast to the first generation, a considerable improvement of the inspection velocity was achieved. Image recording is now performed with a frame rate of 180 Hz. Thus image recording time is reduced by factor of twelve. Instead of one measurement field, three fields sized 40 mm x 40 mm, 30 mm x 30 mm and 20 mm x 20 mm are now available on a modular basis.

With the new fringe projection based high-speed sensor, the surface of flat measurement objects can be reconstructed in three dimensions with a processing velocity of 90 cm<sup>2</sup>/s. The pure image recording time is just 33 ms and the total cycle time is 183 ms. The remaining 150 ms are necessary for the transportation of the sensor by a mechanical conduction system. This time is similarly used for the calculation of the 3D measurement points, optimized by parallel processor use. If the sensor is not moved with faster throughput of measurement objects, even higher processing velocities can be obtained. The conditions for the real-time quality check of flat measurement objects are thus met. The new sensor consists of a fringe projector and a high-resolution camera (Fig. 2). It is perpendicularly arranged over the horizontally placed

1 Foto Leiterplatte (links), Messresultat mit farbcodierten Höhenwerten (rechts). |

Photograph of a conductor board (left), measurement result with color-coded height values (right).

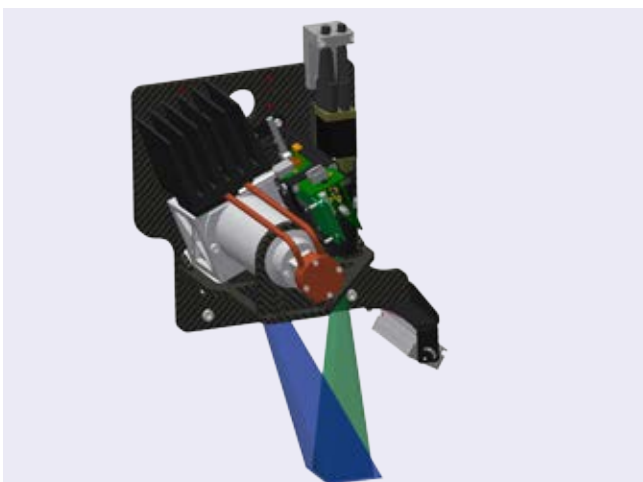
für die real-time Qualitätskontrolle von flachen Messobjekten gegeben.

Der neue Sensor besteht aus einem Streifenprojektor und einer hochauflösenden Kamera (Abb.2). Er befindet sich senkrecht über dem waagrecht liegenden Messobjekt und wird für die Realisierung unterschiedlicher Messpositionen durch ein mechanisches Führungssystem auf zwei waagerechten Achsen bewegt (Abb. Seite 66).

Die Realisierung der Bildfeldgröße und der damit verbundenen lateralen Auflösung am Messobjekt von  $10\ \mu\text{m}$  bis  $20\ \mu\text{m}$  wird durch einen Wechsel der Optiken erzielt. Die geometrische Anordnung der optischen Elemente ist dabei so ausgelegt, dass die Entfernung zwischen Sensor und Messobjekt unverändert bleibt und keine weiteren Anpassungen am Sensor erfolgen müssen. Die Messgenauigkeit der Höhenbestimmung ist besser als  $5\ \mu\text{m}$ . Abbildung 1 zeigt eine Leiterplatte und das Ergebnis der Höhenmessung.

measurement object, and is moved by a mechanical conduction system on two horizontal axes for realization of different measurement positions (Fig. page 66).

The realization of the measurement field size and the corresponding lateral spatial resolution at the measurement object between  $10\ \mu\text{m}$  and  $20\ \mu\text{m}$  is achieved by changing the lenses. The geometric arrangement of the optical components is realized such that the distance between sensor and object remains equal. Hence no further adaptations of the sensor are necessary. The measurement accuracy of the height determination is better than  $5\ \mu\text{m}$ . Fig. 1 shows a conductor board and the result of the height measurement.



**2** Schematischer Aufbau / Messprinzip Lotpastensensor. |  
Schematic construction / measurement principle of the solder  
paste sensor.

## AUTHORS

Peter Kühmstedt

Matthias Heinze

Ingo Schmidt

Roland Ramm

Gunther Notni

Jörg Schambach<sup>1</sup>

Robert Hieronymus<sup>1</sup>

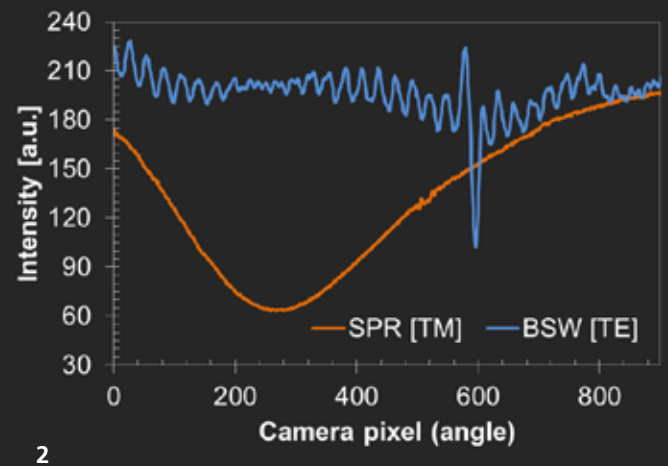
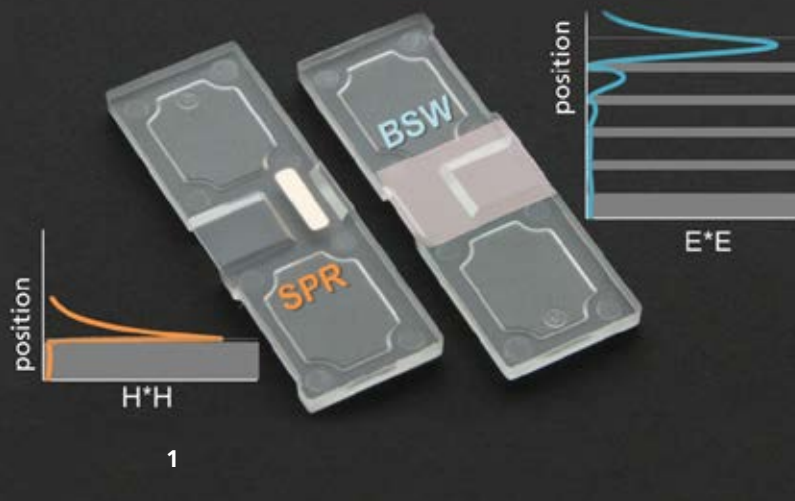
<sup>1</sup> GÖPEL electronic GmbH

## CONTACT

Dr. Peter Kühmstedt

Phone +49 3641 807-230

[peter.kuehmstedt@iof.fraunhofer.de](mailto:peter.kuehmstedt@iof.fraunhofer.de)



## SENSOREN AUF BASIS VON BLOCH OBERFLÄCHENWELLEN BLOCH SURFACE WAVE SENSORS

Die Biosensorik auf der Basis von Oberflächen-Plasmonen-Resonanz (SPR) ist als die Standardmethode für die markierungsfreie Analytik molekularer Interaktionen etabliert. Ein Ansatz zu einer derartigen optischen Analyse ist die winkelaufgelöste Messung der Reflexion einer dünnen Metallschicht mit anschließender Analyse der Resonanzposition /1/. Dabei wird die Leistungsfähigkeit des Systems u.a. durch die Absorptionsverluste im Metall limitiert, die eine relativ große Breite der Resonanz verursachen. Diese Breite wird stark reduziert, wenn man anstelle von Metallen Oberflächenwellen an dielektrischen photonischen Kristallen für die Sensorik nutzt. Sensoren basierend auf diesen Blochschen Oberflächenwellen (Abb. 1) können leistungsfähiger als SPR Sensoren sein /2/.

Am Fraunhofer IOF werden dielektrische Dünnschichtsysteme optimiert, um optimale Nachweisgrenzen bei der Sensorik zu erreichen. Die Herstellung der Schichtsysteme erfolgt mittels Plasmaionen-gestützter Bedampfung im Hochvakuum sowohl auf Glas- als auch auf Polymersubstraten, wobei die zuletzt genannten als Einwegartikel in der Biosensorik verwendet werden sollen. Mittels der IOF Technologie konnten Systeme mit niedriger Dämpfung /3/ und extrem schmalen Resonanzen hergestellt und analysiert werden. /4/.

Neben der Nutzung als markierungsfreie Messmethode wird der Blochwellenansatz auch mit der Fluoreszenzanalytik

Biosensors based on surface plasmon resonance are the established standard tool for label-free analysis of biomolecular interactions. One approach for optical analysis is to measure the angularly resolved reflectivity of a thin metal layer with subsequent determination of resonance position /1/. The performance of such systems is limited by the absorption losses in the metal that cause a broadening of the resonance curve. An enormous decrease of resonance width can be obtained when utilizing surface waves guided at the surface of truncated dielectric photonic crystals. Such Bloch surface wave sensors (Fig. 1) can potentially outperform their plasmonic counterpart /2/.

Dielectric thin film stacks supporting Bloch surface waves (BSW) are designed at Fraunhofer IOF in order to obtain superior sensing properties. Plasma ion assisted deposition under high vacuum conditions is utilized for depositing these stacks onto glass or polymer substrates, the latter being intended as disposable chips for biosensing applications. Low loss sensor stacks /3/ exhibiting very narrow resonances have been prepared and analyzed /4/.

Besides label-free sensing, the BSW approach is combined with fluorescence based analysis (Fig. 3). The high energy density at the stack's surface, i.e. at the position of the desired fluorophores, enables enhancement of both fluorescence

1 Polymerchips für SPR und BSW Sensorik mit Diagrammen der Energiedichteverteilung im Schichtsystem. |

Polymer chips for SPR and BSW sensing with diagrams of the energy distribution inside the stack.

2 Winkelaufgelöste Reflexion gemessen für SPR (TM polarisiert) und BSW (TE polarisiert). |

Angle-resolved reflectivity obtained for SPR (TM polarized) and BSW (TE polarized).

kombiniert (Abb. 3). Die hohe Energiedichte an der Oberfläche des Schichtsystems, also an der Position der nachzuweisenden Moleküle, gestatte die Verstärkung von sowohl Anregung als auch Emission der Fluoreszenz und damit eine hohe Detektionseffizienz. Dies soll eine Kombination der zeitaufgelöster Beobachtung von Bindungskinetiken (markierungsfrei) mit der hohen Empfindlichkeit der Fluoreszenzdetektion ermöglichen.

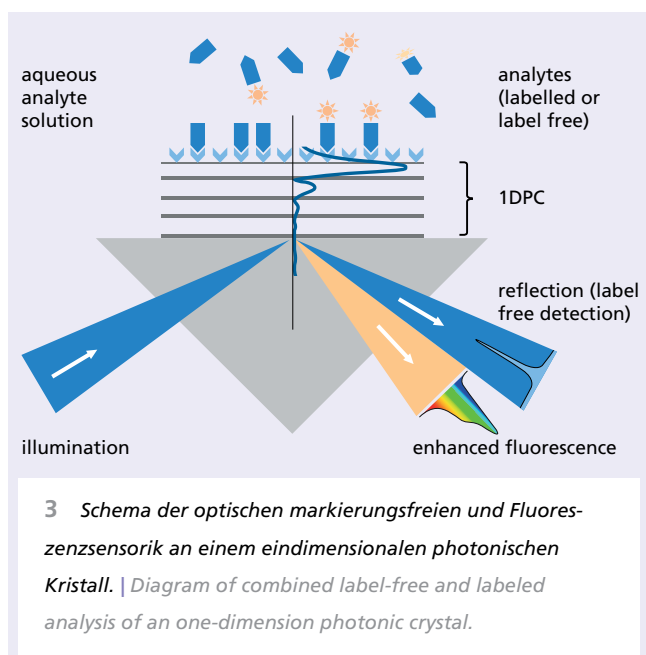
Die Arbeiten wurden im Rahmen des Europäischen Projekts »BILOBA« (318035) gefördert.

excitation and emission to improve detection efficiency. This should enable the combination of time-resolved observation of binding kinetics in a label-free mode with the sensitivity of fluorescence based analysis.

The authors gratefully acknowledge funding provided by the European Commission as part of the "BILOBA" project (Grant 318035).

#### References / Literatur

- /1/ Danz, N., Kick, A. et al., Eng. Life Sci. 11 (2011) 566-572.
- /2/ Sinibaldi, A., Danz, N. et al., Sens. Act. B 174 (2012) 292-298.
- /3/ Michelotti, F., Sinibaldi, A. et al., Opt. Lett. 38 (2013) 616-618.
- /4/ Danz, N., Sinibaldi, A. et al., Biomed. Tech. 57 (2012) 581-587.

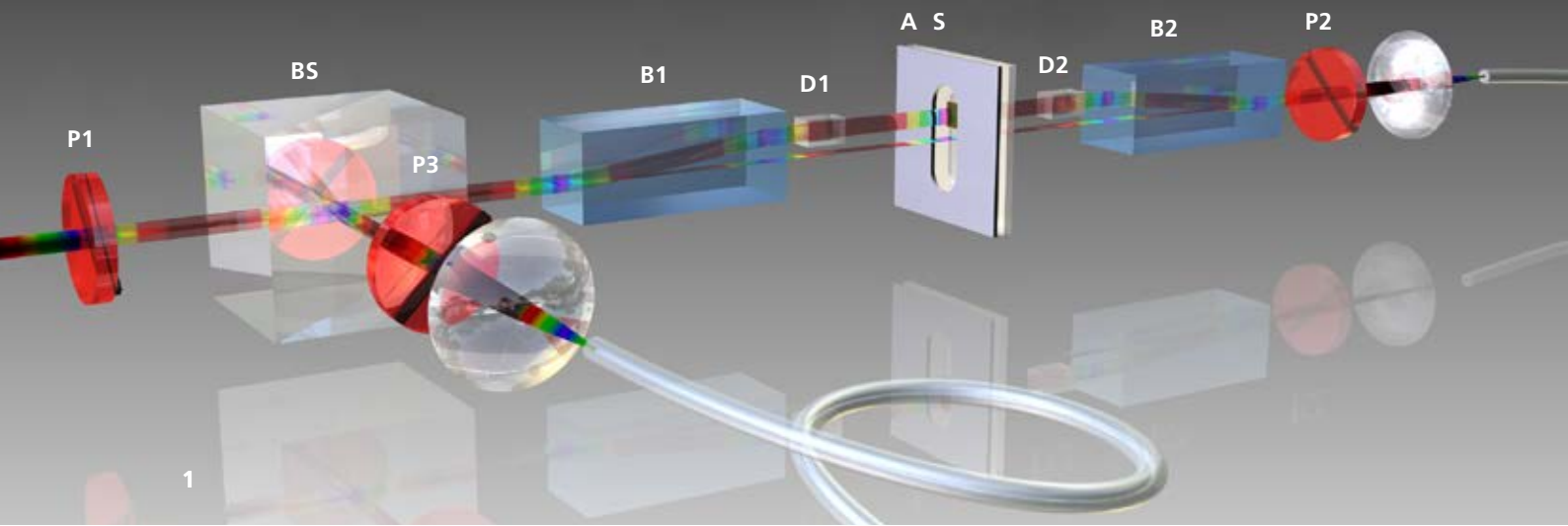


#### AUTHORS

Riccardo Rizzo  
Peter Munzert  
Ralf Rosenberger  
Dirk Michaelis  
Bernd Höfer  
Ulrike Schulz  
Norbert Danz

#### CONTACT

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



# CHARAKTERISIERUNG KOMPLEXER PHOTONISCHER NANOMATERIALIEN

## CHARACTERIZATION OF COMPLEX PHOTONIC NANOMATERIALS

Das Design und die Entwicklung von zweidimensionalen nanostrukturierten Materialien haben ein neues Feld in der Materialwissenschaft geschaffen: So genannte Metaoberflächen treten als eine neue Klasse von integrierten photonischen Elementen hervor, die aus einer oder wenigen Schichten subwellenlängengroßer plasmonischer Nanostrukturen zusammengesetzt sind. Ein bekanntes Anwendungsbeispiel hierfür ist die farblich selektive Bildformung, die durch auf Metaoberflächen basierenden Hologrammen demonstriert wurde /1/. Im Hinblick auf die wachsende Komplexität heutiger Metaoberflächen wird der Mangel an umfassenden leistungscharakterisierenden Methoden zu einem kritischen Problem, welches die Entwicklung dieses Feldes zu realen Anwendungen behindert.

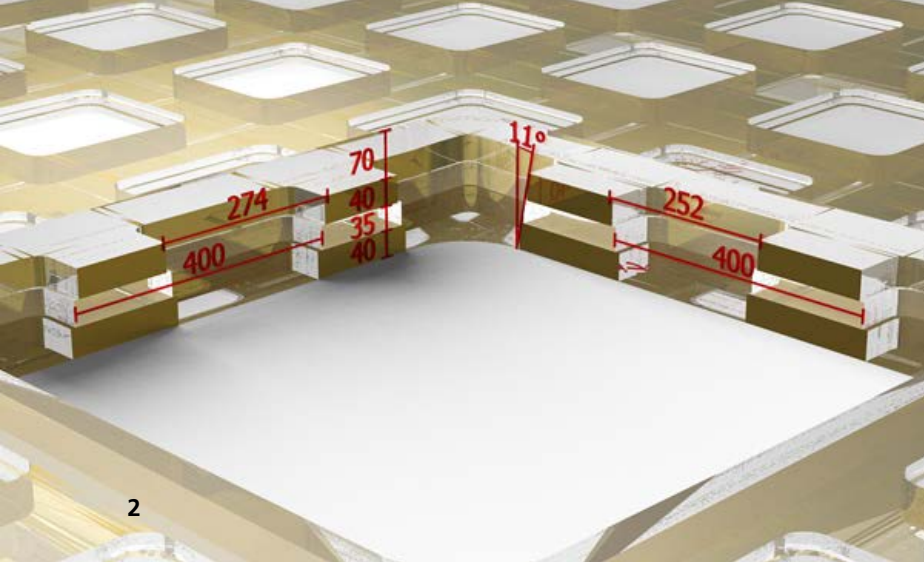
Um diese Lücke zu schließen und die optischen Fähigkeiten der Metaoberflächen in einem breiten Spektralbereich zu bewerten, wurde eine vielseitig anwendbare experimentelle Technik entwickelt, die einen Zugang zu den komplexen Transmissions- und Reflexionskoeffizienten optischer Metaoberflächen bietet. Ein ursprüngliches Polarisationsinterferometer /2/ wurde hierzu deutlich verbessert und erweitert, so dass nun eine gleichzeitige Messung der Transmission und Reflexion im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich möglich ist (Abb. 1).

The design and creation of two-dimensional nanostructured materials have created a new paradigm in material science: so-called metasurfaces have emerged as a new class of integrated photonic elements featuring only a single or few surface layers composed of sub-wavelength plasmonic nanostructures. A prominent example is spectrally selective image formation demonstrated on computationally encoded metasurfaces using the principles of digital holography /1/. In view of the growing structural complexity of contemporary metasurfaces, the lack of comprehensive experimental methods to assess and characterize their performance becomes a critical issue, hampering the development of this field towards real-world applications. As a prerequisite to assessing the broadband optical performance of metasurfaces, we introduced a versatile experimental technique to provide experimental access to the complex transmission and reflection coefficients of optical metasurfaces. We significantly improved and extended our original approach exploiting the principles of white light Fourier-transform spectral interferometry /2/. Our interferometric setup presented in Figure 1 is a polarization interferometer upgraded for simultaneous measurements in transmission and reflection. The two arms of the interferometer are formed and recombined with the help of calcite beam displacers, allowing us to use the technique of white

1 Interferometrischer Aufbau. P1, P2, P3 - Polarisatoren. BS - Strahlteiler. B1, B2 - Kalzit-Kristalle. D1, D2 - Verzögerungselemente. A - Blende. S - Probe. | Interferometric setup. P1, P2, P3 - Polarizers. BS - Beam splitter. B1, B2 - Beam displacers. D1, D2 - Delay elements. A - Aperture. S - Sample.

2 Schema einer typischen Fischnetz-Metaoberfläche. Längenangaben in nm. | Diagram of a typical fishnet metasurface. Length specifications in nm.





Die zwei Arme des Interferometers werden dabei mithilfe doppelbrechender Kalzitkristalle gebildet und wieder zusammengeführt, so dass zur Bestimmung des Phasenunterschieds die Technik der Weißlicht-Fourier-Transformationsspektroskopie im Frequenzraum angewendet werden kann. Die Genauigkeit der Methode wird durch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Interferenzsignalerfassung bestimmt, die besser als 0,02 rad bei einer Transmission bzw. Reflexion von mindestens 5% ist.

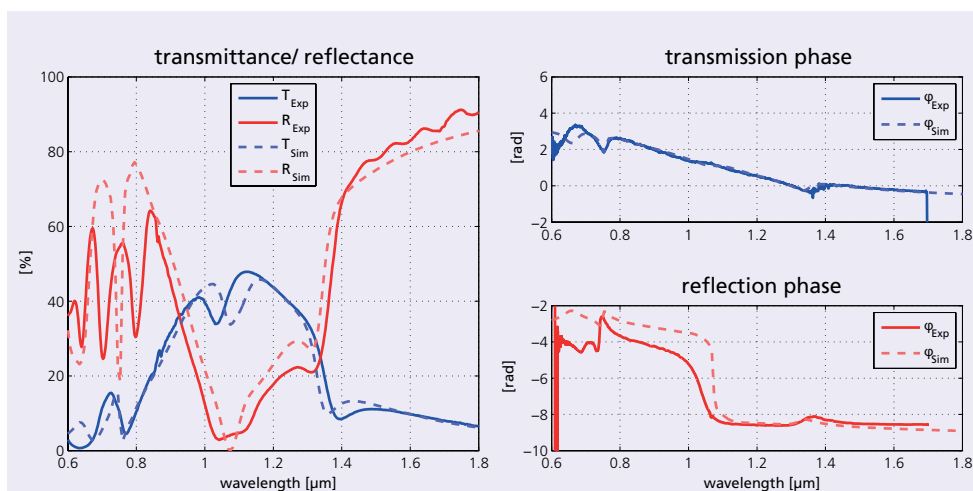
In Abb. 3 sind als Beispiel die gemessenen Werte einer Fischnetz-Metaoberfläche gezeigt. In Bezug auf die Zuverlässigkeit und Genauigkeit konnte anhand dieses Leistungstests gezeigt werden, dass diese Methode einer üblichen numerischen Modellierung überlegen und für eine große Auswahl von fast beliebigen optischen Medien anwendbar ist. Zusätzliche Erweiterungen dieser Methode, wie Charakterisierung polarisationsdrehender Metaoberflächen können direkt ergänzt werden /3/.

light Fourier transform spectroscopy in the frequency domain. The accuracy of the method is determined by the signal to noise ratio of the interference signal acquisition, which is better than 0.02 rad for transmittance (reflectance) of at least 5%.

Figure 3 presents an example of measured phases in transmission and reflection on a fishnet-metasurface used as a basic element in multicolor metasurface based hologramm /1/. In terms of reliability and accuracy, this performance benchmark was shown to be superior to common numerical modeling of complex nanostructures and is applicable to a wide range of optical media. Further extensions of our method, e.g. to address polarization-rotating metasurfaces, can be directly implemented /3/.

#### References / Literatur

- /1/ Walther, B., et al., Adv. Mater. 24, 6251–6251 (2012).
- /2/ Pshenay-Severin, E., et al., J. Opt. Soc. Am. B 27, 660–666 (2010).
- /3/ Helgert, C., et al., Nano Letters 11, 4400-4404 (2011).



3 Gemessene und simulierte Transmissions- und Reflexionswerte. | The measured and simulated transmission and reflection values.

#### AUTHORS

Matthias Falkner<sup>1</sup>

Ekaterina Pshenay-Severin<sup>1</sup>

Christian Helgert<sup>1</sup>

Thomas Pertsch<sup>1</sup>

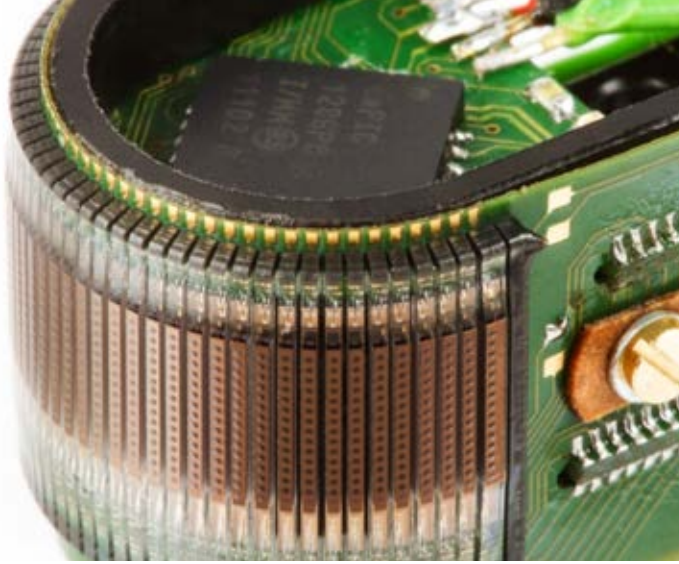
<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

#### CONTACT

Matthias Falkner

Phone +49 3641 9-47844

matthias.falkner@uni-jena.de



## KOMPAKTER MEHRKANALIGER SENSOR ZUR OPTISCHEN NAVIGATION CURVED ARTIFICIAL COMPOUND EYES FOR AUTONOMOUS NAVIGATION

Die Facettenaugen von Insekten bestehen aus einem Mosaik von optischen Einheiten, die im Vergleich zu Einzelaperturaugen durch ihre vielfältige Morphologie ein ausgedehntes Blickfeld bei vernachlässigbaren Aberrationen und Verzeichnungen erreichen. Zudem haben sie eine höhere zeitliche Auflösung, während die benötigte räumliche Bildauflösung gegen die geringe Größe ausgewogen erscheint. Der Aufbau der Facettenaugen entspricht den spezifischen ökologischen Anforderungen an die optische Navigation wie zum Beispiel Kollisionsvermeidung, Starten und Landen, sowie an weitere optomotorische Reflexe, die keine hohe Dichte von Photorezeptoren benötigen. Eine weitere Stärke ist die lokale Anpassung der Empfindlichkeit, die es ermöglicht die Intensität des Umgebungslichtes in einem großen Dynamikbereich zu kompensieren.

Ausgehend vom natürlichen Vorbild wurden in Kooperation mit EPF Lausanne, Université de la Méditerranée Marseille und Universität Tübingen künstliche Facettenaugensysteme (Curved Artificial Compound-Eyes) mit unterschiedlicher Morphologie realisiert (Abb. 1) und an autarken Robotern getestet <sup>1/</sup>. Im Fraunhofer IOF wurde das mehrkanalige Abbildungssystem konstruiert und in einem kostengünstigen Waferlevel-Prozess hergestellt. Mittels einer mehrstufigen Montagetechnologie erfolgte danach das präzise ausgerichtete Fügen der entstandenen Optik-Stapel auf angepasste Opto-ASICs und auf einem flexiblen Leitungsträger (Abb. 2). Nach dem elektrischen Kon-

Insect compound eyes consist of a mosaic of optical units whose composition matches the specific ecological demands. Compared to vertebrate camera eyes, they offer a panoramic field of view (FOV) with low aberrations and negligible distortion and show superior temporal resolution while trading high spatial resolution for diminutive size. Compound eyes possess local sensory adaptation mechanisms capable of compensating for large changes in light intensity at the photoreceptor level. This is likely an adaptation to visually controlled navigation including tasks such as collision avoidance, take-off, landing, and other optomotor responses which do not require a high density of photoreceptors.

Inspired by its natural antetype, diverse morphologies of curved artificial compound eyes (CURVACE) have been realized in collaboration with EPF Lausanne, Université de la Méditerranée Marseille, and Universität Tübingen (Fig. 1) and were tested on robotic stages <sup>1/</sup>. The optical design and the cost-effective wafer-level fabrication of the multi-aperture imaging system were carried out at Fraunhofer IOF. The precise, aligned mounting of the microoptics onto custom opto-ASICs and a flexible printed circuit board was achieved by a multi-level assembly technology in planar configuration (Fig. 2). Subsequent to the application of electrical contacts and their encapsulation, the sensors pixel groups were separated by precision cutting without touching the flexible

<sup>1</sup> *Zylindrisch geformter optischer Navigationssensor (Krümmungsradius 6,35 mm).* |

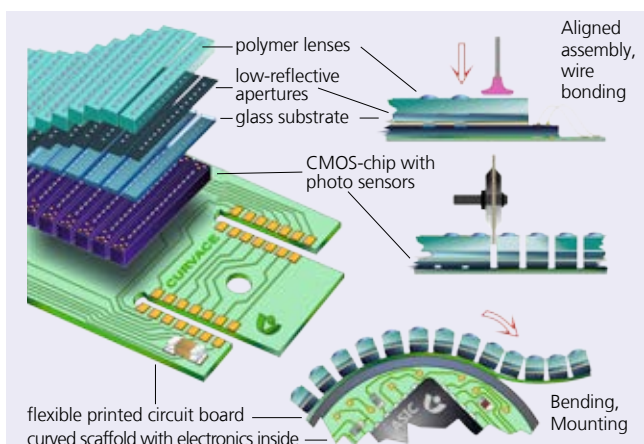
*Cylindrical curved multi-aperture navigation sensor (radius of curvature 6.35 mm).*

taktieren und dem Verguss der Module wurden die einzelnen Pixelgruppen des Modulverbundes in einem Präzisionssägeschnitt separiert, ohne dabei das flexible Substrat zu beschädigen. Die so entstandene biegbare Baugruppe wurde auf einem starren Träger mit definierter Krümmung befestigt, in dessen Innenwölbung die Signal-Nachverarbeitung und assistierende MEMS-Sensorik platziert ist.

Der optische Navigationssensor ist durch eine verzeichnungsfreie Abbildung des Blickfelds von  $180^\circ \times 60^\circ$  und die Verwendung eines autoadaptiven Photorezeptor-Konzeptes gekennzeichnet, dass die Detektion des optischen Flusses in einem Beleuchtungsstärke-Bereich von  $10^{-7} - 10^{-3} \text{ W/cm}^2$  ermöglicht. Die hohe zeitliche Auflösung von 300 Hz erlaubt die präzise Bestimmung der Eigenbewegung relativ zur Umgebung. Mögliche Einsatzgebiete sind autark agierende Fahr- und Flugzeuge, Controller für die Mensch-Maschine-Kommunikation, sowie die Prothetik und intelligente Bekleidung.

Gefördert durch EU-Kommission: FET 237940.

Weitere Informationen: [www.curvace.org](http://www.curvace.org)



**2 Aufbau- und Verbindungstechnologie zur Realisierung von CURVACE-Systemen.** | *Assembling procedure to generate CURVACE systems.*

PCB. The resulting bendable units were set up onto rigid scaffolds whose concavity accommodates signal processing and assisting MEMS sensors.

The optical navigation sensor is characterized by a gapless registration of a field of view of  $180^\circ \times 60^\circ$  with low distortion and uses neuromorphic auto-adaptive photo-detectors which enables the detection of the optical flow in a wide illuminance range of  $10^{-7} - 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ . The high temporal resolution of 300 Hz allows for a precise determination of the device's ego motion against its environment. Such curved visual sensors may be useful for autarkic terrestrial and aerial vehicles, prosthetic devices, surveillance, motion capture systems, and intelligent garments. Artificial compound eyes may also foster the development of visual algorithms for novel human-machine interfaces.

Financial support: EU FET 237940.

Further information: [www.curvace.org](http://www.curvace.org)

## References / Literatur

/1/ Floreano, Pericet-Camara, Viollet, Ruffier, Brückner, Leitell, Buss, Menouni, Expert, Juston, Dobrzynski, L'Eplattenier, Reckenwald, Mallot, Franceschini: Miniature curved artificial compound eyes, Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America 110 (23), 9267ff, (2013).

## AUTHORS

Robert Leitell  
Wolfgang Buß  
Andreas Brückner

## CONTACT

Dr. Robert Leitell  
Phone +49 3641 807-375  
[robert.leitell@iof.fraunhofer.de](mailto:robert.leitell@iof.fraunhofer.de)



## METROLOGIE OPTOMECHANISCHER ELEMENTE MIT COMPUTERTOMOGRAPHIE

## METROLOGY OF OPTO-MECHANICAL UNITS USING COMPUTED TOMOGRAPHY

Das Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF entwickelt optische Systeme für eine Vielzahl von Anwendungen. Das Spektrum reicht von winzigen Beleuchtungseinheiten bis zu großen Abbildungsspiegeln für die Raumfahrt. Durch die enge Verbindung optischer und feinmechanischer Methoden können komplexe und leistungsstarke optomechanische Elemente entworfen werden. Die metrische Prüfung komplexer Komponenten und Systeme ist aber häufig problematisch. Die Röntgen-Computertomographie (CT) eröffnet hierbei Lösungsmöglichkeiten.

In der CT wird ein Messobjekt mittels Röntgenstrahlung aus einer Vielzahl von Winkeln durchstrahlt. Aus den Durchstrahlungsbildern lässt sich ein vollständiges Volumenmodell des Objektes rekonstruieren. Das Fraunhofer IOF verfügt über eine CT-Anlage vom Typ  $\nu\text{tome|x}$  des Herstellers phoenix x-ray (Abb. 1). Durch die Kegelstrahl-Anordnung und zwei wechselbare Röntgenquellen erreicht die Anlage eine große Flexibilität hinsichtlich der Größe und des Materials der Messobjekte. Die Größe des kleinsten Volumenelements (Voxelgröße) wird durch die Position des Messobjektes zwischen Strahlenquelle und Detektor festgelegt und dient als Maßstab für die metrische Analyse des Volumenmodells. Die Auflösungsgrenze beträgt  $\geq 1 \mu\text{m}$ . In den digitalen Volumenmodellen stellen Grauwerte die Röntgenabsorption in den Volumenelementen dar. Materialien wie

The Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering develops optical systems in a wide range of applications. The scope ranges from tiny lighting units to large aerospace mirrors. The close combination of methods in optics and precision mechanics allows the design of complex and high-performance opto-mechanical elements. The dimensional inspection of complex components and systems, however, is often problematic. X-ray computed tomography (CT) offers a way to solve these inspection problems.

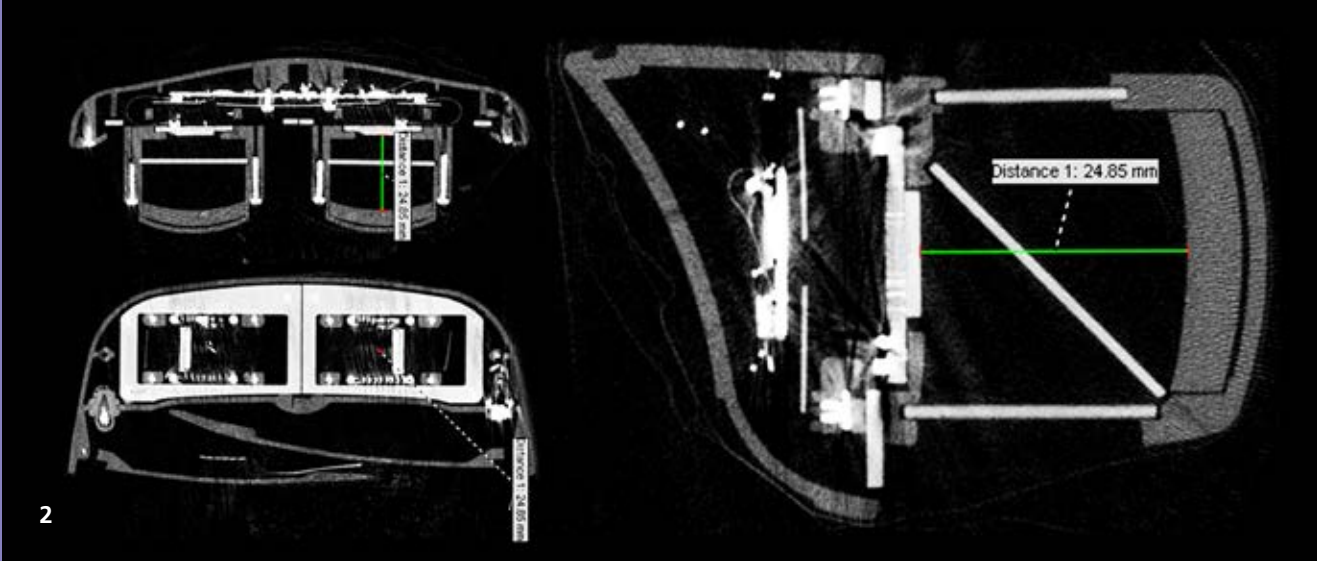
A sample is radiated by X-rays from a plurality of different angles in a CT scan. A complete volume model of the sample is then reconstructed from the set of radiographs. The CT system at Fraunhofer IOF is of the  $\nu\text{tome|x}$  type produced by phoenix x-ray (Fig. 1). The system achieves high flexibility regarding the size and the material of samples by its cone beam arrangement and the two X-ray tubes. The size of the smallest volume element (voxel size) is determined by the samples position between the X-ray tube and the detector. It is used as a dimensional scale in metrological analysis. The lower limit of the voxel size is  $\geq 1 \mu\text{m}$  in the  $\nu\text{tome|x}$  system.

The gray values in the volume model represent the X-ray absorption at the specific volume element. Materials like polymers, glass, aluminium and steel can thus be separated

1 *Kegelstrahl CT-Anlage  $\nu\text{tome|x}$  am Fraunhofer IOF. | Cone beam CT system  $\nu\text{tome|x}$  at Fraunhofer IOF.*

2 *Analyse des Montagezustandes einer HMD-Brille mittels Computertomographie. |*

*Analysis of a binocular HMD regarding its assembly state using computed tomography.*



Kunststoff, Glas, Aluminium und Stahl lassen sich dadurch voneinander unterscheiden. Anhand der Grauwertübergänge zwischen den Materialien können deren Oberflächen mit Sub-Voxelgenauigkeit bestimmt werden.

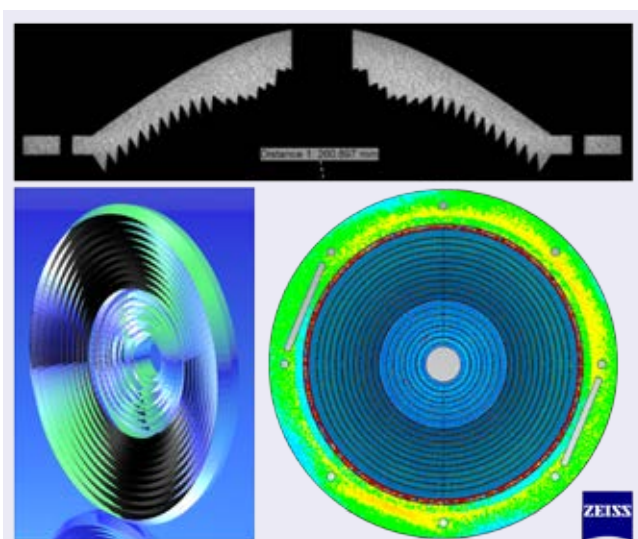
Nach der Messung können die vollständige Oberfläche oder Teiloberflächen im Volumenmodell bestimmt werden. Hieran können folgende metrische Auswertefragestellungen analysiert werden:

- Form und Maßhaltigkeit von Komponenten (Abb. 2)
- Vergleich mit dem CAD-Modell
- Lagebeziehungen in Baugruppen (Abb. 3)
- Kontrolle der Füge- und Montageprozesse
- Simulation der IST-Zustände von Komponenten und Baugruppen.

from each other. Analyzing the gray values across the material borders allows the determination of material surfaces with sub-voxel accuracy.

The whole sample surface or parts of it can be determined and extracted from the volume model after the measurement. They are used to analyze a variety of dimensional measurement issues such as:

- form and dimensions of components (Fig. 2)
- comparison to the CAD model
- relative position of assembled elements (Fig. 3)
- control of assembling processes
- simulation of the actual state of components and assemblies.



**3** *Metrische Analyse einer Fresnel-Freifformlinse mittels CT und farblicher 3D-Vergleich der Oberfläche gegen das CAD-Modell. | Metrical analysis of a fresnel freeform lens and colored 3D comparison of its surface versus the CAD model.*

#### AUTHORS

Roland Ramm  
 Peter Kühmstedt  
 Ingo Schmidt  
 Gunther Notni

#### CONTACT

Roland Ramm  
 Phone +49 3641 807-213  
 roland.ramm@iof.fraunhofer.de



## STREULICHTUNTERSUCHUNG VON OBERFLÄCHEN UND SCHICHTEN IM IR LIGHT SCATTERING ANALYSIS OF SURFACES AND COATINGS IN THE IR

Die Messung und Analyse von Streulicht an optischen Komponenten ist von enormer Bedeutung für die Entwicklung leistungsfähiger optischer Systeme. Informationen zum winkelaufgelösten Streulichtverhalten ermöglichen Computer-gestützte Störlichtanalysen schon in der Designphase. Aufgrund der Vielzahl möglicher Streulichtmechanismen besteht ein dringender Bedarf an direkten Messungen bei den jeweiligen Anwendungswellenlängen. Die am Fraunhofer IOF entwickelten Streulichtmesssysteme bilden dafür mit ihrer hohen Sensitivität und verfügbaren Wellenlängen vom extrem ultravioletten bis in den infraroten Spektralbereich eine wichtige Grundlage /1/. Zur Unterdrückung von Störlicht in komplexen optischen Systemen werden Strahlfallen (Baffle) und schwarze, diffuse Absorberschichten eingesetzt. Die Schwarzbeschichtungen der Firma Acktar zeichnen sich durch besonders niedrige Restreflexion aus und wurden bereits in verschiedenen Systemen implementiert /2/. Während die Streulichtverteilung solcher Schwarzbeschichtungen im sichtbaren Bereich und bei kleinen Einfallswinkeln oft nahezu ideal diffus ist, kann dies für längere Wellenlängen und streifenden Einfall nicht automatisch vorausgesetzt werden. Insbesondere sensitive Streulichtmessungen im mittleren Infrarot (ca. zwischen 3  $\mu\text{m}$  und 5  $\mu\text{m}$ ) stellten jedoch bisher international eine weitgehend ungelöste Herausforderung dar.

Measuring and analyzing light scattering from optical components is crucial to the development of high-end optical systems. Information about the scattering distribution enables computer-based stray light analysis to be performed during the design phase. Because of the large variety of possible scatter mechanisms, there is an urgent demand for direct measurements at the relevant wavelengths of application. The instruments for scatter measurements developed at Fraunhofer IOF with their high sensitivities and the available wavelengths from the extreme ultraviolet to the infrared regions are an important basis for this purpose /1/.

Baffles and black diffusing absorber coatings are used to suppress stray light in complex optical systems. Acktar black coatings exhibit particularly low residual reflectance and have been implemented in various instruments /2/. Even though the scattering distribution is perfectly diffuse in the visible range and at near normal incident angles, this cannot automatically be presumed for longer wavelengths and oblique incidence. However, scatter measurements in the mid-infrared range (between 3  $\mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$ ) still constituted a widely unresolved challenge.

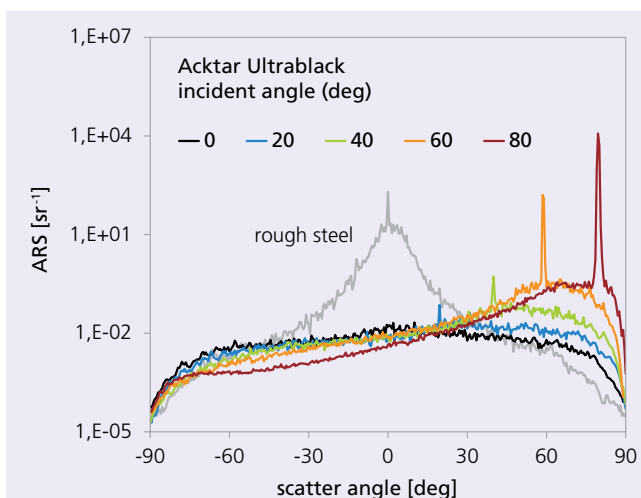
1 *IR Spektrometer für BepiColombo Mission – Optisches System vom Fraunhofer IOF I3I in Kooperation mit Kayser-Threde und DLR, Schwarzbeschichtung von Acktar. | IR spectrometer for BepiColombo space mission – optical assembly by IOF I3I in cooperation with Kayser-Threde and DLR, black coating by Acktar.*

2 *Instrument zur Messung von winkelaufgelöstem Streulicht. | Instrument for angle-resolved light scattering measurements.*



Für Untersuchungen an Schwarzbeschichtungen im mittleren IR-Bereich in Zusammenarbeit mit Acktar wurde die Streulichtmesstechnik nun bedeutend vorangetrieben. Bei  $4,6\ \mu\text{m}$  wurde eine Sensitivität von  $10^{-5}\ \text{sr}^{-1}$  erreicht, was einem totalen Streulicht von 100 ppm oder einer Oberflächenrauheit von 2 nm entspricht. Dies ermöglicht nun erstmals die umfassende Streulichtcharakterisierung optisch glatter bis strukturierter Oberflächen, Schichten und Materialien im mittleren IR-Bereich.

Die Ergebnisse von Streulichtuntersuchungen an Acktar Ultrablack Folie bei  $4,6\ \mu\text{m}$  im Vergleich mit einer unbehandelten rauhen Stahloberfläche sind in Abb. 1 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass durch die Beschichtung bei moderaten Einfallswinkeln selbst bei dieser Wellenlänge eine ideal diffuse Wirkung erzielt wird. Bei großen Einfallswinkeln tritt zunehmend eine spekulare Komponente auf, die jedoch auf einen schmalen Bereich um die spekulare Richtung begrenzt ist. Durch Einbeziehung dieser Daten kann Störlicht in optischen Systemen für IR-Anwendungen nun besser modelliert, kontrolliert und unterdrückt werden.



**3** Winkelaufgelöstes Streulicht einer diffusen Absorberschicht (Acktar Ultrablack) bei  $4,6\ \mu\text{m}$ . | Angle-resolved scattering of a diffuse absorber coating (Acktar Ultrablack) at  $4.6\ \mu\text{m}$ .

The scatter measurement methodology has now been considerably refined for investigations of black coatings in the mid-IR in cooperation with Acktar. At  $4.6\ \mu\text{m}$ , a sensitivity of  $10^{-5}\ \text{sr}^{-1}$  has been achieved, corresponding to a total scatter level of 100 ppm or a surface roughness of about 2 nm. This now enables thorough investigations of the mid-IR scattering of optical and structured surfaces, coatings and materials.

The results of scatter measurements of Acktar Ultrablack foil at  $4.6\ \mu\text{m}$  are shown in Fig. 1 together with the scattering distribution of an uncoated rough steel surface. The results reveal that a nearly perfectly diffuse scattering distribution is achieved at moderate angles of incidence. At larger angles of incidence, a distinct specular component is observed, which is, however, confined to a small region around the specular direction. These data provide valuable information that can be used to model and suppress stray light in optical systems for IR applications.

#### References / Literatur

- /1/ Schröder, S., Trost, M., Herffurth, T., Finck, A., Duparré, A., Proc. SPIE 84950V-1 (2012).
- /2/ Kralik, T., Katsir, D.: Proc. SPIE 7298, 729813 (2009).
- /3/ Gebhardt, A. et. al.: Proc. SPIE 78080Q (2010).

#### AUTHORS

Sven Schröder  
 Mattias Hauptvogel  
 Lars Mejnertsen<sup>1</sup>  
 Dina Katsir<sup>2</sup>  
 Angela Duparré

<sup>1</sup> Imperial College London, UK

<sup>2</sup> Acktar Ltd., Kiryat Gat, Israel

#### CONTACT

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

**GESCHÄFTSFELD**  
**BUSINESS FIELD**





# LASERTECHNIK

## LASER TECHNOLOGY

Im Geschäftsfeld Lasertechnik werden neue Festkörperlasersysteme und Lichtquellen mit erweitertem Emissionsbereich (EUV bis THz), sowie Prozesse zur Laser-Mikro-Materialbearbeitung entwickelt. Arbeitsschwerpunkte sind die Leistungsskalierung von Faserlasersystemen in den Multi-Kilowatt-Bereich unter Erhaltung beugungsbegrenzter Strahlqualität, die Erschließung neuer Wellenlängenbereiche unter Anwendung von Methoden der nichtlinearen Optik, die Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse bis hin zu Attosekunden-Pulsdauern sowie die Führung und Formung von Laserstrahlung höchster Leistung und Intensität. Zudem führt das Zentrum Untersuchungen zur Laser-Materie-Wechselwirkung bis hin zur Prozessentwicklung durch. Auf beiden Gebieten – der Faserlaserentwicklung und der Präzisionsbearbeitung unter Anwendung von ultrakurzen Laserpulsen – gehört das Fraunhofer IOF zu den forschungstärksten Arbeitsgruppen weltweit.

CO<sub>2</sub>-Laser basierte Beschichtungsverfahren finden bei der Herstellung von Komponenten für Hochleistungs-faserlaser Verwendung. Auch wurde die stimulierte Raman Streuung in Faserlasern durch einen neuen technologischen Ansatz signifikant reduziert. Dadurch können höhere Ausgangsleistungen von CW-Faserlasern erreicht werden.

Kurzpulslaser werden zum Beispiel in der Materialbearbeitung eingesetzt oder zur Strukturierung von Dünnschichtsolarzellen genutzt.

Attosekunden Laser werden zur Erforschung von Vorgängen in Atomen und Molekülen benötigt.

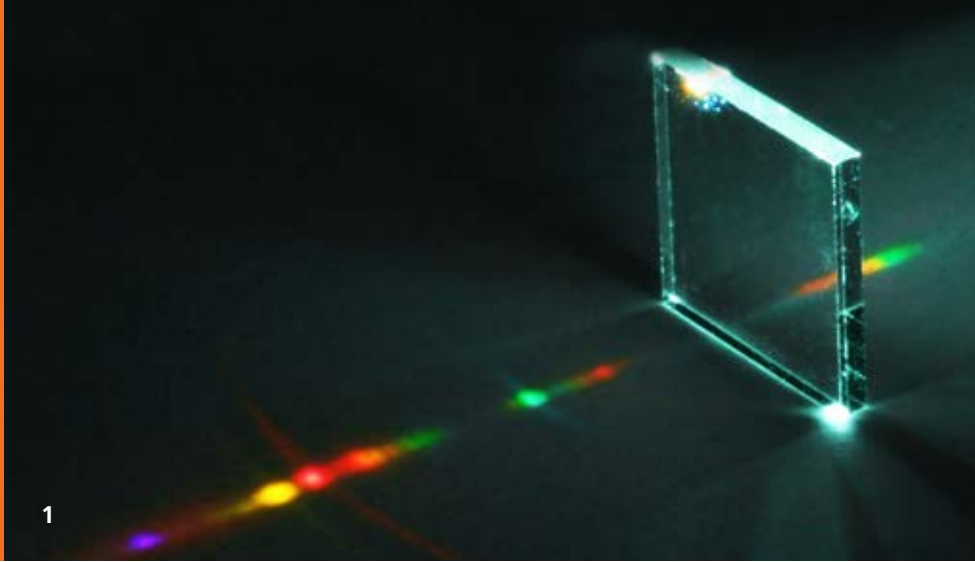
New solid-state laser systems and light sources with an extended emission region (EUV to THz) as well as processes for laser micro-machining are developed in the laser technology business field. Areas of expertise include the power scaling of fiber laser systems in the multi-kilowatt range while maintaining diffraction-limited beam quality, the opening up of new wavelength ranges using methods of nonlinear optics, the generation of ultra short light pulses down to attosecond pulse durations, and the guiding and shaping of laser radiation of highest performance and intensity. The Fraunhofer IOF also conducts research on laser-matter interaction through to process development. In both areas – fiber laser development and precision machining using ultra-short laser pulses – the Fraunhofer IOF is one of the strongest research groups worldwide.

CO<sub>2</sub>-laser-based coating processes are used in the manufacture of components for high power fiber lasers. Unwanted stimulated Raman scattering in fiber lasers was also significantly reduced with a new technological approach for achieving higher output power in cw fiber lasers.

Short-pulse lasers are used, for example, in material processing or for patterning thin-film solar cells.

Attosecond lasers are used for the research of processes in atoms and molecules.

**LEFT** *Metalstegpolarisator aus Molybdän für Terahertz-Anwendungen. | Metal bar polarizer of molybdenum for terahertz applications.*



## ULTRAKURZPULSLASER FÜR DIE INDUSTRIELLE MASSENFERTIGUNG ULTRASHORT LASER PULSES FOR EFFECTIVE SERIES PRODUCTION

Ultrakurze Laserpulse mit Pulsdauern im Bereich weniger Piko­sekunden ( $10^{-12}$  s) oder darunter ermöglichen die Bearbeitung nahezu aller Werkstoffe mit höchster Präzision. Durch eine geeignete Wahl von Pulsdauer, Pulsenergie und Fokussierung wird das Material so schnell und so stark erhitzt, dass es direkt verdampft. Puls für Puls werden feinste Bereiche in der Größe von nur wenigen Nanometern abtragen. Dadurch wird eine schmelzfreie, »kalte« Bearbeitung ohne thermische oder mechanische Schädigung erreicht. Die prinzipiellen Vorteile dieser Bearbeitung konnten bereits vor rund 20 Jahren eindrucksvoll demonstriert werden. Eine wirtschaftliche, industrielle Nutzung war jedoch bis auf wenige Ausnahmen nicht möglich. Während die Ultrakurz­puls­laser zunächst nicht robust und leistungs­stark genug waren, mussten angepasste Prozesse erst noch entwickelt werden, um Lasersysteme mit hohen Pulswiederholraten und hohen mittleren Leistungen effizient einsetzen zu können.

In gemeinsamer Forschung von Bosch, Trumpf, der Universität Jena und dem Fraunhofer IOF gelang es, ultrakurze Laserpulse von einem Instrument in der Forschung zu einem erfolgreichen Werkzeug in der Serienproduktion zu machen. Diese Arbeiten wurden von Bundespräsident Joachim Gauck mit dem Deutschen Zukunftspreis 2013 ausgezeichnet.

Das Anwendungspotential dieser Technologie ist außerordentlich hoch. Von Diamanten über harte Gläser, Stahl und Halb-

Ultrashort laser pulses with a duration of a few picoseconds ( $10^{-12}$  s) or below provide an efficient way of precisely processing a wide range of materials. By cleverly selecting the right pulse duration, pulse energy, and focusing, the material is heated so quickly and forcefully that it is instantly vaporized. Gradually, every pulse ablates tiny regions just a few nanometers in depth. This enables a melt-free, "cold" ablation without thermal or mechanical damage to the surroundings. While the principle advantages of ultrashort laser pulses for precise materials processing were already impressively demonstrated about 20 years ago, economical, industrial use has been impossible in most cases. On the one hand, there was a lack of robust, reliable, and powerful ultrashort pulse laser systems, while on the other adapted processes exploiting the full potential of high average power and high repetition rate laser systems still required development.

In a joint research approach, Bosch, Trumpf, the Friedrich Schiller University Jena, and Fraunhofer IOF succeeded in turning the ultrashort pulse laser into an effective series production tool. For their collective efforts, they were awarded the German Future Prize 2013 by German President Joachim Gauck.

The application potential of this technology is enormous. From diamond, glasses, and steel, to semiconductors, ceramics, and sensitive plastics – virtually any material can be structured with the highest precision. This enables the manufacture of new

1 *Volumen-Bragg-Gitter in fused silica (Kieselglas).* | *Volume-Bragg gratings in fused silica.*

leiter bis hin zu Keramiken und empfindlichsten Kunststoffen – praktisch alle Materialien lassen sich präzise und schädigungsarm bearbeiten. So lassen sich neue Produkte fertigen, die bislang nur äußerst schwierig oder gar nicht herzustellen waren. Aktuelle Anwendungsbeispiele betreffen das Bohren extrem feiner Düsen für Benzin-Direkteinspritzventile, das Schneiden gehärteter Gläser für Displays in Smartphones oder das Strukturieren biokompatibler Stents.

Am Fraunhofer IOF und IAP werden derzeit eine ganze Reihe neuer Anwendungsmöglichkeiten erforscht. Diese reichen von der Photovoltaik bis hin zu chirurgischen Anwendungen in der Augenheilkunde. In Gläsern oder Kristallen lassen sich lokal die Brechzahl modifizieren und dadurch optische Funktionalitäten erzielen; selbst räumlich aufgelöste, künstlich doppelbrechende Strukturen sind möglich. In Fasern können effektive Bragg-Gitter als leistungsbeständige Filter oder hochempfindliche Sensorelemente realisiert werden. Aber auch das lokale Bonden transparenter Gläser und Kristalle wird durch ultrakurze Laserpulse möglich. Hier spielt die gezielte Wärmeakkumulation nachfolgender Pulse eine entscheidende Rolle. So lassen sich Bruchfestigkeiten im Bereich der Gläser selbst erreichen und sogar Materialien mit stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten fügen.

products which had previously proved exceedingly difficult – or impossible – to produce. Current application examples include the drilling of extremely fine nozzles for gasoline injection valves, the cutting of strengthened glass for smartphone displays, and the structuring of better-tolerated stents.

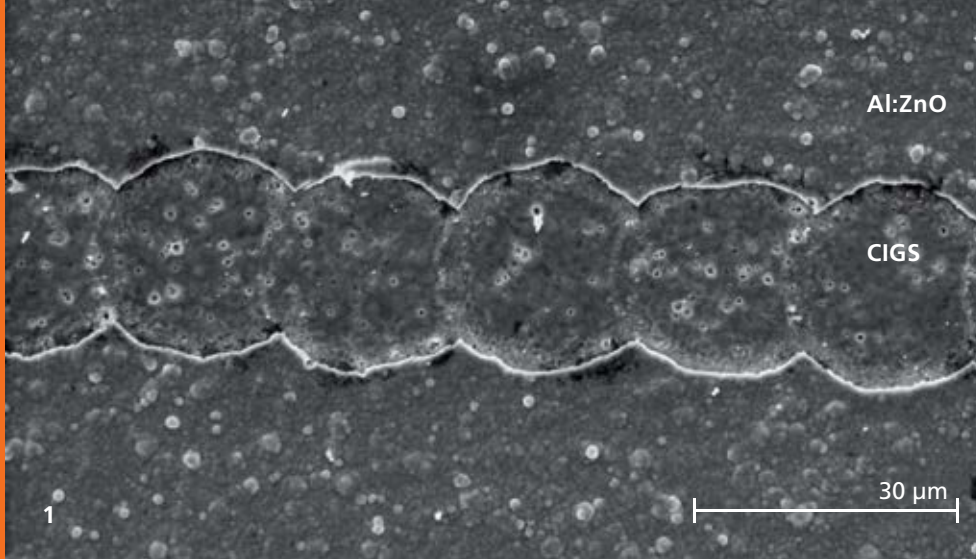
Presently, various potential new applications are being investigated at the Fraunhofer IOF and the IAP. These span the range from photovoltaics to laser surgery in ophthalmology. Additionally, the refractive index can be precisely modified within the bulk of glasses and crystals to implement optical functionalities – even highly spatially resolved artificial birefringence can be generated. Efficient Fiber-Bragg gratings can be inscribed for applications as high-power filters or mirrors or as highly sensitive sensing elements. Furthermore, even the local bonding of transparent glasses and crystals becomes possible using ultrashort laser pulses. Here, the heat accumulation of successive laser pulses is used to obtain ultimate breaking strengths in the order of the bulk material itself. Even the bonding of dissimilar materials with different thermal expansion coefficients is feasible.

#### **AUTHORS**

Stefan Nolte  
Andreas Tünnermann

#### **CONTACT**

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



## ULTRAKURZPULSLASER – STRUKTURIERUNG VON DÜNNSCHICHTSOLARMODULEN ULTRASHORT PULSE LASER STRUCTURING OF THIN-FILM SOLAR MODULES

Solartechnologie insbesondere Dünnschichtsolartechnologie gilt als einer der Eckpfeiler zukünftiger Konzepte für erneuerbare Energien. Unter den zurzeit eingesetzten Materialien ist Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) einer der vielversprechendsten Kandidaten. Mit Hilfe dieser Halbleiterverbindung konnten bereits Konversionseffizienzen größer ab 20 % für Einzelzellen demonstriert werden /1/. CIGS-Solarmodule basieren auf einem ein bis zwei Mikrometer dickem Mehrschichtsystem. Zwischen den einzelnen Abscheidungsschritten werden dabei Trenngräben eingebracht, welche die Schichten in einzelne Zellen aufteilen und diese in Serie verschalten (Abb. 3). Diese integrierte Serienverschaltung ermöglicht eine hohe Modulspannung bei kleinem Modulstrom und reduziert dadurch die Widerstandsverluste. Die Verschaltungszone kann nicht zur Energiegewinnung beitragen und wird aus diesem Grund auch als »tote Zone« bezeichnet. Heute werden zur Verschaltung überwiegend mechanisch abtragende und damit auch verschleißende Werkzeuge verwendet, welche sehr breite und unregelmäßige Trenngräben erzeugen.

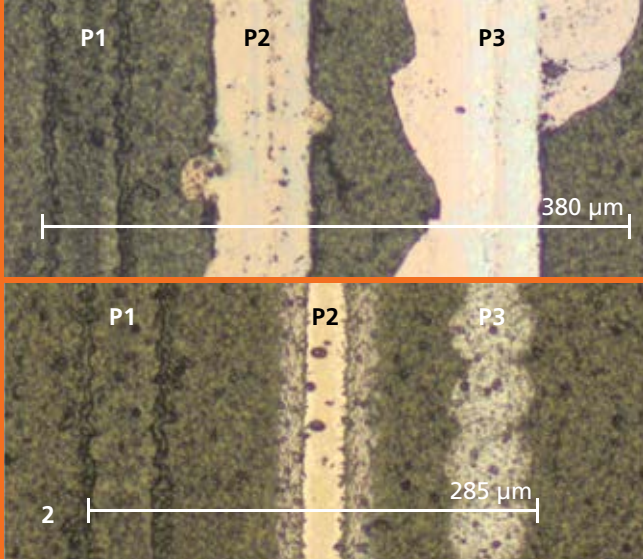
Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojektes »Tailored for next PV (T4nPV)« werden ultrakurze Laserpulse als Alternative zur mechanischen Bearbeitung eingesetzt. Innerhalb der

Solar technology, and in particular thin-film solar technology, is considered one of the cornerstones of future renewable energy solutions. Among the currently used materials, copper indium gallium diselenide (CIGS) is one of the most promising candidates. Using this semiconductor compound, conversion efficiencies higher than 20% have already been demonstrated at the cell level /1/. CIGS solar modules are based on a multi-layer system one to two microns in thickness. During deposition, trenches are inserted that divide the layers into separated cells and interconnect them in series (fig. 1). This series connection allows high module voltages at low module currents and therefore reduces resistance losses. The interconnection zone cannot contribute to energy generation and is therefore called the "dead zone". Today, mechanical abrasion and thus wearing tools are mainly used for interconnection, causing very broad and irregular trenches.

As part of the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) funded collaborative project entitled "Tailored for next PV (T4nPV)", ultrashort laser pulses were used as an alternative to mechanical processing. Within these studies, CIGS thin-film modules have been structured in a fraction of the time previously required and with significantly increased precision /2/. Using laser pulses with less than 10 ps duration

1 Mittels ultrakurzer Laserimpulsen erzeugter P3 Gräben. | Generated P3 trench using ultrashort laser pulses.

2 Konventionell hergestellte P2 und P3 Gräben (oben) im Vergleich zur komplett laser-strukturierten Probe (unten). | Conventional fabricated P2 and P3 trenches (top) in comparison with the completely laser-structured interconnection zone (bottom).



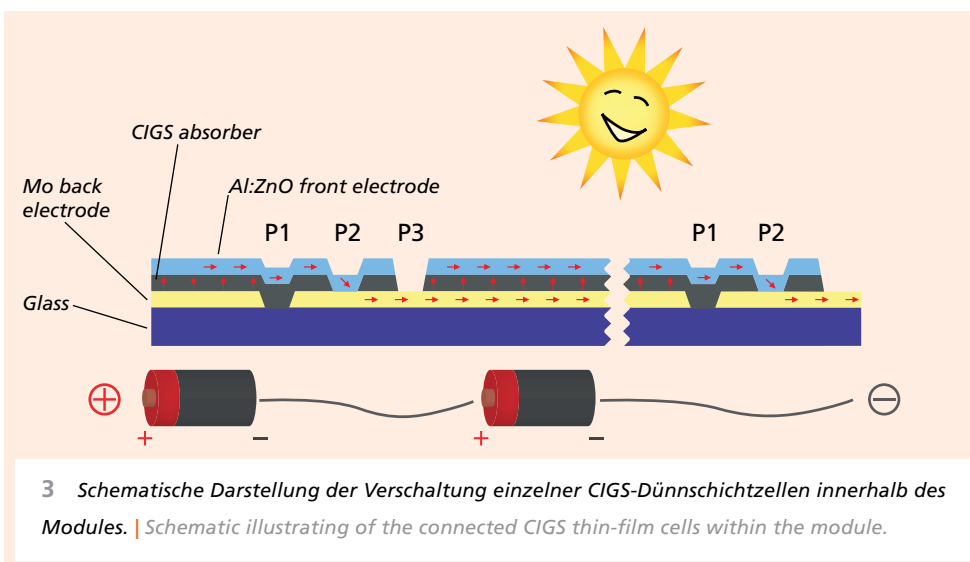
hierzu durchgeführten Untersuchungen ist es gelungen CIGS-Dünnschichtmodule in einem Bruchteil der bisher benötigten Zeit und deutlich erhöhter Präzision zu strukturieren /2/. Mit Hilfe von Laserimpulsen mit einer Pulslänge kleiner 10 ps und einer Wellenlänge von 515 nm können selektiv Schichtdicken von wenigen 100 nm abgetragen werden, ohne dass angrenzende Gebiete thermisch geschädigt werden. Hierdurch ist es möglich mikroskopische Schnitte innerhalb des CIGS-Schichtsystems vorzunehmen, die in ihren elektrischen Eigenschaften den mechanischen Referenzen entsprechen und aufgrund der erhöhten Präzision eine weitere Verkleinerung der toten Zone ermöglichen (Abb. 2). Parallel zu den durchgeführten Experimenten wurde ein theoretisches Modell erarbeitet, welches die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse beschreibt. Mit dessen Hilfe lassen sich in Hinblick auf das vorliegende Materialsystem Aussagen über die optimalen Laserparameter treffen.

and a wavelength at 515 nm, layer thicknesses of about a few 100 nm can be removed selectively without thermal damage to nearby areas. Due to the increased precision, microscopic cuts inside the CIGS layer system can be provided which match the mechanical references in their electrical properties and allow further miniaturization of the "dead zone" (fig. 3). In parallel with the experiments, a theoretical model was developed which describes the underlying physical processes. Regarding the specific material system, this model allows a prediction of the optimum laser parameters.

#### References / Literatur

/1/ Jackson, P. et al.: Prog. Photovolt; Res. Appl., 19, (2011), 894-897.

/2/ Letsch, A. et al.: Laser Technik Journal, 10, (2013), 16-19.



#### AUTHORS

Gabor Matthäus<sup>1</sup>

Thomas Peschel<sup>2</sup>

Stefan Nolte<sup>1</sup>

Andreas Tünnermann<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

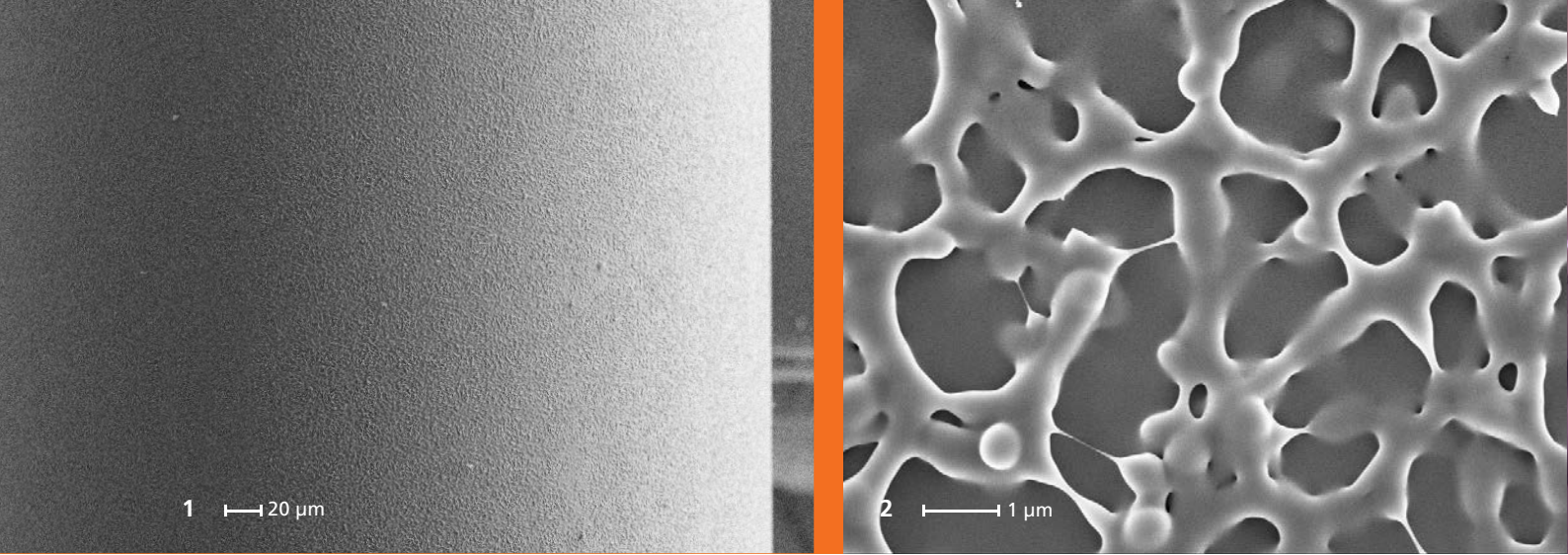
<sup>2</sup> Fraunhofer IOF

#### CONTACT

Dr. Thomas Peschel

Phone +49 3641 807-335

thomas.peschel@iof.fraunhofer.de



## CO<sub>2</sub>-LASERBASIERTES FASER- BESCHICHTUNGSVERFAHREN CO<sub>2</sub>-LASER-BASED FIBER COATING PROCESS

Die Erzeugung und Übertragung von Laserleistungen höchster Brillanz mittels optischer Lichtwellenleiter erfordert, dass die Propagation der Strahlung auf genau definierte Querschnitte innerhalb der optischen Faser beschränkt bleibt. Diese Voraussetzung gilt auch für den sicheren und ausfallsfreien Betrieb von optischen Fasern in Lichtleitkabeln. Häufige Ursache der Zerstörung von Lichtleitkabeln im kW-Bereich ist neben der mechanischen Überlastung ein nicht vernachlässigbarer Leistungsanteil im Fasermantel, der das Faser-Coating thermisch überlastet und zum Abbrennen der Faser führt. Eine sehr effiziente Möglichkeit, Laserstrahlung aus dem Fasermantel und damit auch räumlich vor dem Beginn des Faser-Coatings zu entfernen, ist die Störung oder Aufhebung der Totalreflexion auf einer definierten Faserlänge. Die erforderliche Länge ist abhängig von der numerischen Apertur (NA) der propagierenden Laserstrahlung. Bei Laserleistungen im kW-Bereich können auch Leistungsanteile im Fasermantel so hoch sein, dass nur eine geeignete Entfernung dieser Strahlung vor einer Faserzerstörung schützt. Dieser oftmals auch als Mantelmodenabstreifer (Cladding light stripper) bezeichnete, modifizierte Teil der Glasfaser, muss nicht nur die Leistung aus dem Fasermantel entfernen, sondern auch eine ausreichende Leistungsstabilität aufweisen.

The generation and transmission of laser power in optical fibers with the highest brilliance requires the spatial restriction of the propagated laser radiation on precisely defined areas inside the waveguide. This is also an essential prerequisite for the safe and faultless operation of optical fiber cables. A frequent cause of the destruction of optical fiber cables in the kW range, beside the mechanical strain, is a significant laser power portion in the fiber cladding which thermally overloads the fiber coating and leads to fiber burn-off. A very efficient method of removing laser radiation from the fiber cladding with sufficient spatial distance before the fiber coatings begins is the disturbance or abolition of the total reflection over a defined fiber length. The required length is dependent on the numerical aperture of the propagated laser radiation. With laser powers in the kW range, power portions can also be so high in the fiber cladding that only one suitable removal process of this radiation protects the optical fiber against destruction. This modified part of the glass fiber, frequently also termed cladding light stripper, must not only remove the undesired laser radiation from the fiber cladding but also show sufficient laser power stability. At Fraunhofer IOF, a coating process was developed on the basis of a carbon dioxide laser, using which the evaporation residue of fused silica on any optical fibers or other curved/plane

**1 & 2** REM-Aufnahmen einer mit Kieselglasschmuck beschichteten optischen Faseroberfläche. |

REM images of an optical fiber surface with evaporation residue of fused silica.

**3** Mantelmodenabstreifer (Länge ca. 80 mm) im Leistungstest bei einer eingekoppelten optischen Leistung von ca. 210 W. | Cladding light stripper (length: ~80 mm) during the power test with a laser input power of approximately 210 W.



Am Fraunhofer IOF wurde ein Beschichtungsprozess auf Basis eines Kohlendioxid-Lasers entwickelt, mit dem Kieselglas-schmuck auf beliebigen optischen Fasern oder auch anderen planen/gekrümmten Oberflächen abgeschieden werden kann und anschließend in die Oberfläche partiell eingeschmolzen wird (Abb. 1+2). Dazu wird Material aus einem Kieselglas-Target mit Hilfe eines CO<sub>2</sub>-Lasers auf der optischen Faser abgeschieden, ähnlich dem Laserstrahlverdampfen (PLD), allerdings bei Normalatmosphäre.

Die beschichteten optischen Fasern wurden hinsichtlich ihrer erzielten optischen Dämpfung, der numerischen Apertur, der optischen Leistungsstabilität und der mechanischen Festigkeit charakterisiert.

So wurde zum Beispiel in einem Versuchsaufbau mit einer beschichteten Vollkernfaser eine optische Laserleistung von ca. 210 W mit einer NA von 0,46 eingekoppelt (Abb. 3). Die abgestreifte Leistung betrug ca. 90 % über eine beschichtete Faserlänge von ca. 80 mm. Ohne zusätzliche Kühlung betrug die Temperatur auf der Faseroberfläche max. 135 °C über einen Zeitraum von zwei Stunden. Die Zug- und Biegefestigkeit gegenüber einer unbeschichteten Faser verringert sich und ist abhängig vom Grad der Verschmelzung mit der Faseroberfläche. Aus der Dichte der abgeschiedenen Kieselglasschicht und dem Verschmelzungsgrad mit der Faseroberfläche lassen sich spezifische Strukturen erzeugen, die eine Optimierung der abgestreiften Laserstrahlung ermöglichen.

surfaces can be deposited and afterwards partially melted in the surface (fig. 1+2). For this purpose, material of a fused silica target is deposited with a CO<sub>2</sub> laser on the optical fiber, similarly to pulsed laser deposition (PLD) but under normal atmosphere. The coated or deposited optical fibers were characterized with regard to their achieved optical attenuation, numerical aperture, optical power stability, and mechanical strength.

Thus, for example, an optical laser power of approximately 210 W was coupled into a deposited coreless fiber with an numerical aperture 0.46 in an experimental setup (fig. 3). The stripped laser power amounted to approximately 90% over a coated fiber length of about 80 mm. Without additional cooling, the temperature on the fiber surface was a maximum 135°C over a period of two hours. The tensile strength and bending strength compared with an uncoated fiber decreases and depends on the degree of the fusion with the fiber surface. From the density of the extracted fused silica layer and the fusion degree with the fiber surface different, specific structures can be generated which enable optimization of the stripped laser radiation.

This work is (partially) funded by the Thuringian Ministry for Economy, Labour and Technology (TMWAT, Project No. 2011 FGR 0103) with a European Social Fund (ESF) grant.

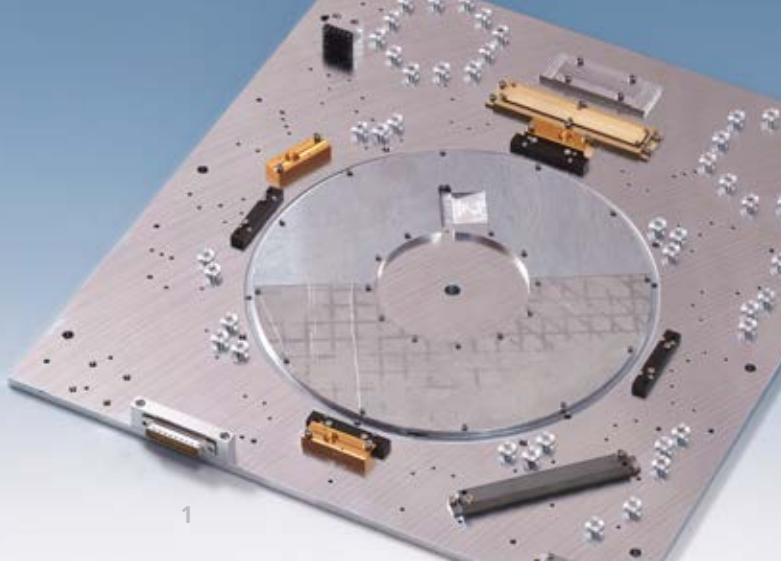
#### **AUTHORS**

Steffen Böhme  
Kathleen Hirte<sup>1</sup>  
Christian Hupel  
Simone Fabian  
Thomas Schreiber  
Ramona Eberhardt

<sup>1</sup> TU Ilmenau)

#### **CONTACT**

Steffen Böhme  
Phone +49 3641 807-305  
steffen.boehme@iof.fraunhofer.de



## UNTERDRÜCKUNG VON STIMULIERTER RAMAN STREUUNG IN FASERLASERN SUPPRESSION OF STIMULATED RAMAN SCATTERING IN FIBER LASERS

Faserlaser sind in der Materialbearbeitung, z.B. in der Automobilindustrie zum Schneiden und Schweißen von Fahrzeugteilen, nicht mehr wegzudenken. Ihr Marktanteil wächst kontinuierlich. In den letzten zehn Jahren ist die Ausgangsleistung von grundmodigen Ytterbium-dotierten Faserlasern rapide angestiegen. Nichtlineare Effekte in den Fasern behindern allerdings eine weitere Skalierung ihre Ausgangsleistung. Bei einem CW-Faseroszillator spielt dabei die Stimulierte Raman Streuung (SRS) eine wesentliche Rolle. Es handelt sich dabei um einen Streueffekt von Photonen an optischen Phononen, der zu einem Leistungsverlust bei der Laserwellenlänge führt. Die Schwelle für SRS ist von der Faserlänge und der Leistungsdichte im Signalkern der Faser abhängig. Daher werden heutzutage für Faserlaser mit Ausgangsleistungen im kW Bereich sogenannte „Large Mode Area (LMA)-Fasern“ mit deutlich größeren Signalkernen, verglichen mit herkömmlichen Fasern, verwendet. Trotzdem ist SRS weiterhin einer der leistungsbegrenzenden Faktoren von CW-Faserlasern.

Am Fraunhofer IOF in Jena wurden daher im Rahmen des BMBF-Projektes 13N11972 (PT-VDI, TEHFA) Untersuchungen an Faserlasern durchgeführt, um die Schwelle von SRS zu höheren Leistungen zu verschieben. In einem Experiment wurde bei einem monolithischen Faserlaser, bestehend aus fasergekoppelten Pumpdioden, einem Pumplichtkoppler mit Signaldurchführung, einem hochreflektierendem Faser-Bragg-Gitter (FBG), einer Ytterbiumdotierten Doppelkernfaser und einem

Fiber lasers have become indispensable in material processing, one example being cutting and welding processes in the automotive industry. Their market share is continuously growing, and the output power of diffraction limited ytterbium doped fiber lasers has grown rapidly in the last ten years. Nonlinear effects in fibers, however, limit further power scaling. Stimulated Raman Scattering (SRS) plays an important role in a cw fiber oscillator. Photons are scattered on optical phonons, resulting in a power loss at the laser wavelength. The SRS threshold depends on the fiber length and power density in the signal core of the fiber. Large Mode Area (LMA) fibers with a significantly larger signal core compared to conventional fibers are therefore currently used for fiber lasers with output powers in the kW range. Nevertheless, SRS is still a factor limiting output power in cw fiber lasers.

As part of BMBF project no. 13N11972 (PT-VDI, TEHFA), studies on increasing the SRS threshold to higher output powers have been carried out at Fraunhofer IOF. Using a monolithic fiber laser consisting of fiber coupled pump diodes, a pump light combiner with signal transmission, a high reflecting Fiber Bragg Grating (FBG), an ytterbium doped double clad fiber, and a low reflecting FBG (LR grating), the influence of the spectral width of the LR grating on the amount of SRS has been investigated. The reflectivity of LR gratings with spectral widths of 0.04 nm, 0.5 nm, and 1.5 nm (FWHM), respectively, was 10%. It could be shown that the amount

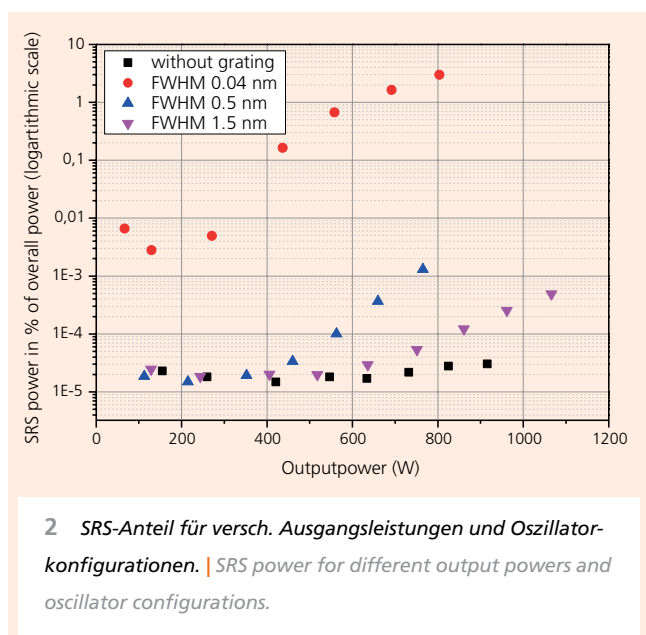


niedrig reflektierendem FBG (LR-Gitter), die spektrale Breite des LR-Gitters variiert und der Einfluss auf den Anteil von SRS bezüglich der Gesamtleistung untersucht. Alle LR-Gitter hatten eine Reflektivität von 10 %. Ihre spektrale Breite lag bei 0,04 nm, 0,5 nm bzw 1,5 nm (FWHM). Es konnte dabei gezeigt werden, dass mit den breiteren LR-Gittern der Anteil von SRS im verwendeten Versuchsaufbau um mehrere Größenordnungen gesenkt werden konnte (siehe Abbildung 2) /1/. Diese Erkenntnisse sind direkt in die Realisierung eines monolithischen 1 kW Faserlasers eingeflossen, bei dem trotz einer 34 m langen aktiven Faser die Unterdrückung von SRS im Vergleich zur Signalwellenlänge bei 50 dB lag. Basierend auf diesen Ergebnissen wird nun eine weitere Skalierung der Ausgangsleistung von Faserlasern am IOF vorangetrieben.

of SRS reduces by several orders of magnitude using broad LR gratings (see figure 2) /1/, which enabled the feasibility of a monolithic 1 kW fiber laser with a suppression of SRS compared to the signal wavelength of 50 dB despite a 34 m active fiber. Based on this result, further power scaling of fiber lasers will be investigated at Fraunhofer IOF.

#### References / Literatur

/1/ Liem, A. et al.: Experimental analysis of the influence of the spectral width of out-coupling Fiber Bragg Gratings to the amount of Stimulated Raman Scattering in a cw kW fiber oscillator, Advanced Solid State Photonics 2013, Paris, France, poster JTh2A.32.



#### AUTHORS

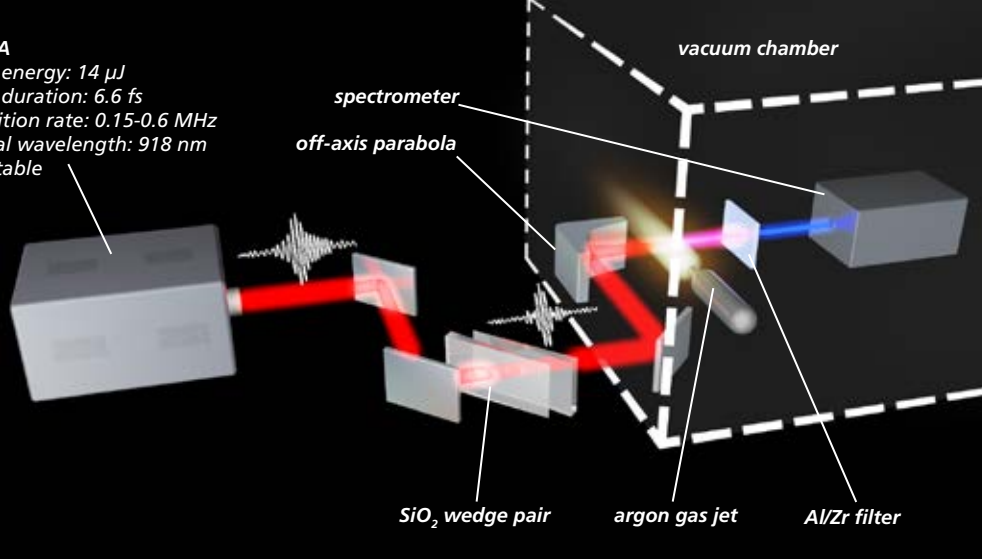
Andreas Liem  
Erik Freier  
Christian Matzdorf  
Volker Reichel  
Thomas Schreiber  
Ramona Eberhardt  
Andreas Tünnermann

#### CONTACT

Dr. Andreas Liem  
Phone +49 3641 807-397  
andreas.liem@iof.fraunhofer.de

**OPCPA**  
 pulse energy: 14  $\mu\text{J}$   
 pulse duration: 6.6 fs  
 repetition rate: 0.15-0.6 MHz  
 central wavelength: 918 nm  
 CEP stable

1



## ISOLIERTE ATTOSEKUNDENPULSE BEI HOHEN REPETITIONSRATEN ISOLATED ATTOSECOND PULSES AT HIGH REPETITION RATES

Die Erforschung der Vorgänge in Atomen und Molekülen stellt außergewöhnlich hohe Anforderungen an die verwendeten Messmethoden. Eine Schlüsselrolle für diese Anwendung kommt der Erzeugung höherer Harmonischer (engl.: High Harmonic Generation, HHG) zu, die es erstmals ermöglicht, in die ultrakurzen Zeitskalen der Bewegung von Elektronen vorzudringen. Dazu werden intensive Infrarotpulse von nur wenigen optischen Zyklen Dauer auf ein Edelgas fokussiert und in isolierte Attosekundenpulse konvertiert. Diese stellen ein entscheidendes Werkzeug für die Untersuchung der Elektronendynamik in Atomen dar. Die Pulswiederholraten dieser Quellen von bisher maximal 3 kHz sind jedoch zu klein für Messungen mit hohem Signal-zu-Rauschverhältnis sowie für mehrdimensionale Messungen. Die erstmalige Erzeugung isolierter Attosekundenpulse bei Pulswiederholraten im Megahertzbereich stellt daher einen wesentlichen Meilenstein dar /1/. Dies eröffnet bisher nicht dagewesene Möglichkeiten in der Attosekundenphysik.

Grundlage dieser Entwicklung ist ein extrem breitbandiges optisch-parametrisches Verstärkersystem mit hoher Durchschnittsleistung /2/. Dieses erzeugt Infrarotpulse von 6,6 fs Pulsdauer bei bis zu 1 MHz Repetitionsrate. Im Experiment wurden diese Pulse in einem Argon-Gasstrahl bei bis zu 0,6 MHz Wiederholrate in kohärente XUV-Strahlung konver-

tiert. The research on atomic and molecular processes demands for sophisticated measurement schemes. A key role in this regard is taken on by the process of high harmonic generation (HHG), which, for the first time, provides access to the ultrashort timescale of electronic motion. Intensive few-cycle infrared pulses are focused into a noble gas jet. This leads to nonlinear conversion to isolated attosecond pulses in the extreme ultraviolet (XUV) spectral range. These pulses are then used as a tool for the study of electron dynamics in atoms and molecules. However, due to the low repetition rates of current sources up to a maximum of 3 kHz, measurements with a high signal-to-noise ratio and multi-dimensional acquisition schemes are not possible within reasonable time frames. A major milestone to overcome this limitation is the generation of isolated attosecond pulses at megahertz-level repetition rates /1/. This enables unprecedented opportunities for the further evolution of attosecond physics.

Foundation of this development is a high average power octave-spanning optical-parametric amplifier system /2/ enabling 6.6 fs infrared pulses at up to 1 MHz repetition rate. By focusing these pulses into an argon gas jet at up to 600 kHz repetition rate (fig. 1), coherent XUV radiation has been generated and characterized for different settings of carrier envelope phase (CEP) using an XUV spectrometer (fig. 2). For a certain setting ( $\phi_0 + \pi/2$ ), a spectral continuum in the XUV is obtained.

1 **Experimenteller Aufbau.** Pulse aus einem optisch-parametrischen Verstärker werden auf einen Edelgasstrahl fokussiert. | *Experimental setup.* Pulses of an optical parametric amplifier are focused onto a noble gas jet.

tiert (Abb. 1) und anschließend für verschiedene Träger-Einhüllenden-Phasen (CEP) mit einem XUV-Spektrometer charakterisiert (Abb. 2). Bei richtiger Wahl der CEP ( $\varphi_0 + \pi/2$ ) entsteht ein kontinuierliches Spektrum, welches die Erzeugung isolierter Attosekundenpulse belegt. Eine numerische Simulation des Prozesses konnte die experimentellen Ergebnisse reproduzieren <sup>/1/</sup>. Dementsprechend kann eine Pulsdauer im Bereich von 340 as und ein Kontrast von ca. 6 : 1 abgeschätzt werden.

Die Erzeugung isolierter Attosekundenpulse stellt höchste Anforderungen an die Stabilität der Lasersysteme und Kontrolle des elektrischen Feldes, welche durch kontinuierliche Entwicklungen in der Ultrakurzpulslasertechnologie am Fraunhofer IOF und IAP bei neuartigen Laserparametern erfüllt werden konnte. Die vorgestellte Entwicklung legt die Grundlage für die Steigerung der Zeitauflösung etablierter Verfahren wie räumlich- oder winkelaufgelöste Photoemissionsspektroskopie sowie Koinzidenzmessungen bis in den Attosekundenbereich. Dies ermöglicht völlig neue Einblicke in die inneren elektronischen Vorgänge von Atomen und Molekülen.

## Literatur / References

<sup>/1/</sup> Krebs, M. et al. Nat. Photon. 7, 555–559 (2013).

<sup>/2/</sup> Rothhardt, J. et al. Opt. Express 20, 10870–8 (2012).

This is evidence for the generation of isolated attosecond pulses. A numerical simulation reproduced the experimental results very well <sup>/1/</sup> and allows for estimating a pulse duration on the order of 340 as and a contrast of about 6 : 1.

The generation of isolated attosecond pulses imposes highest requirements on stability of the laser systems and control of the electrical field, which has been enabled at unprecedented laser parameters due to continuous developments in ultrashort pulse laser technology at the IOF and IAP. The presented approach is a promising foundation for the extension of current applications like spatially or angular resolved photoemission spectroscopy and coincidence experiments to attosecond time resolution. This will enable an unprecedented insight into the electron dynamics, and thus, the inner workings of atoms and molecules.

## AUTHORS

Manuel Krebs<sup>1</sup>

Steffen Hädrich<sup>1,2</sup>

Stefan Demmler<sup>1</sup>

Jan Rothhardt<sup>1,2</sup>

Amelle Zaïr<sup>3</sup>

Luke Chipperfield<sup>4</sup>

Jens Limpert<sup>1,2</sup>

Andreas Tünnermann<sup>1,2,5</sup>

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik,

Friedrich-Schiller-Universität Jena

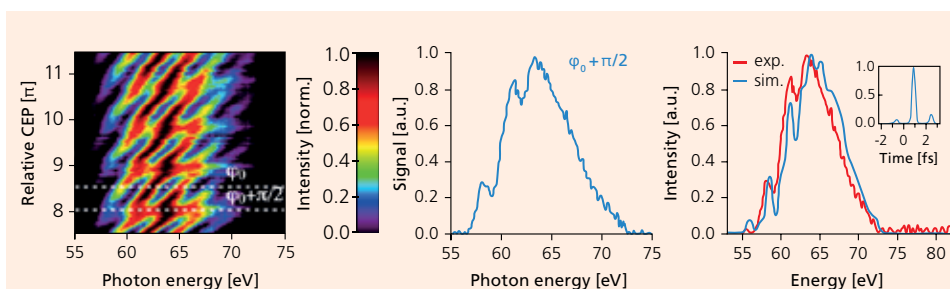
<sup>2</sup> Helmholtz-Institute Jena

<sup>3</sup> Blackett Laboratory,

Imperial College London

<sup>4</sup> Max-Born Institute for Nonlinear Optics and Short Pulse Spectroscopy

<sup>5</sup> Fraunhofer IOF



**2** Gemessene XUV-Spektren bei verschiedenen CEP. Kontinuierliche Spektren (bei  $\varphi_0 + \pi/2$ ) entsprechen isolierten Attosekundenpulsen. | XUV spectra scanned for different CEPs. Continuous spectra (at  $\varphi_0 + \pi/2$ ) correspond to isolated attosecond pulses.

## CONTACT

Manuel Krebs

Phone +49 3641 9-47817

manuel.krebs@uni-jena.de



# FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

## FRAUNHOFER GROUP LIGHT & SURFACES

### Kompetenz durch Vernetzung

Sechs Fraunhofer-Institute kooperieren im Verbund Light & Surfaces. Aufeinander abgestimmte Kompetenzen gewährleisten eine schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an die Erfordernisse in den verschiedensten Anwendungsfeldern zur Lösung aktueller und zukünftiger Herausforderungen, insbesondere in den Bereichen Energie, Umwelt, Produktion, Information und Sicherheit. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Marktes ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten zum Nutzen der Kunden.

### Kernkompetenzen des Verbunds

- Beschichtung & Oberflächenfunktionalisierung
- Laserbasierte Fertigungsverfahren
- Laserentwicklung
- Materialien der Optik & Photonik
- Mikromontage & Systemintegration
- Mikro- & Nanotechnologien
- Kohlenstofftechnologie
- Messverfahren & Charakterisierung
- Ultrapräzisionsbearbeitung
- Werkstofftechnologien
- Plasma- & Elektronenstrahlquellen

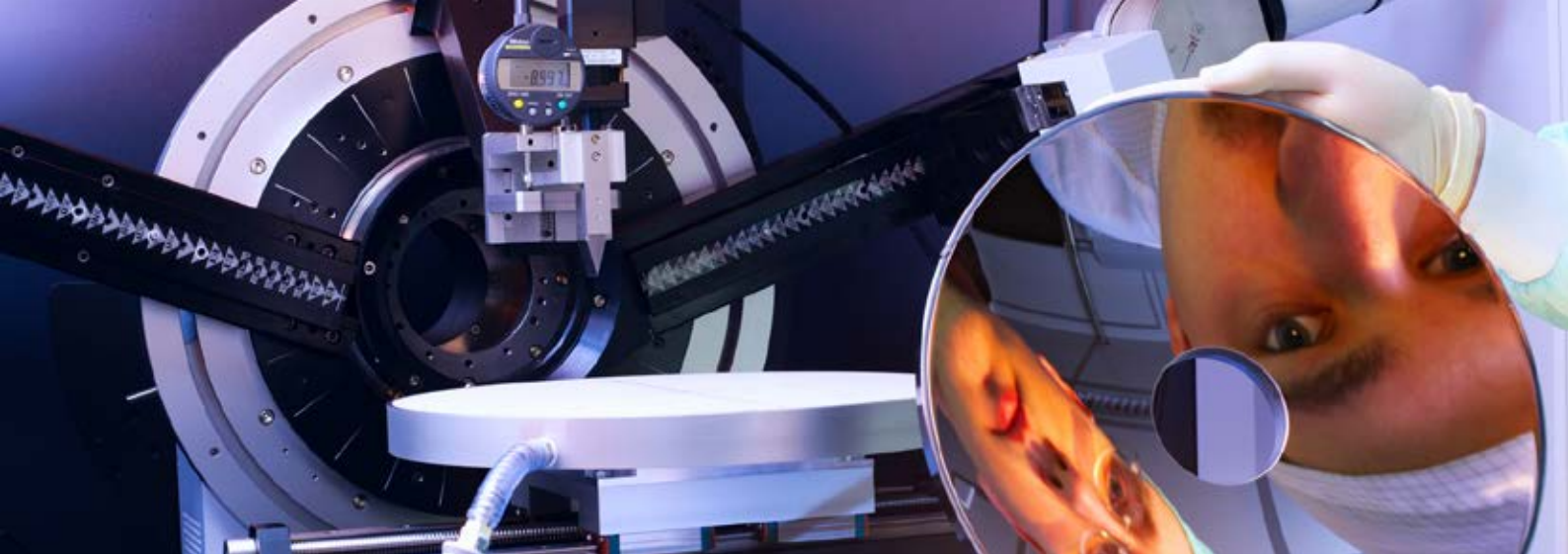
### Competence by networking

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

### Core competences of the group

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

[www.light-and-surfaces.fraunhofer.de](http://www.light-and-surfaces.fraunhofer.de)



### **Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP**

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

[www.fep.fraunhofer.de](http://www.fep.fraunhofer.de)

### **Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS**

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

[www.iws.fraunhofer.de](http://www.iws.fraunhofer.de)

### **Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP**

Electron beam technology, sputtering technology, plasma activated high-rate deposition and high-rate PECVD are the core areas of expertise of Fraunhofer FEP. The business units include vacuum coating, surface modification and treatment with electrons and plasmas. Besides developing layer systems, products and technologies, another main area of work is the scale-up of technologies for coating and treatment of large areas at high productivity.

[www.fep.fraunhofer.de](http://www.fep.fraunhofer.de)

### **Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS**

The Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology is known for its innovations in the business areas joining and cutting as well as in the surface and coating technology. Our special feature is the expertise of our scientists in combining the profound know-how in materials engineering with the extensive experience in developing system technologies. Every year, numerous solution systems have been developed and have found their way into industrial applications.

[www.iws.fraunhofer.de](http://www.iws.fraunhofer.de)

**Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF**

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

[www.iof.fraunhofer.de](http://www.iof.fraunhofer.de)

**Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM**

Fraunhofer IPM entwickelt und realisiert optische Sensor- und Abbildungssysteme. Bei den vorwiegend laserbasierten Systemen sind Optik, Mechanik, Elektronik und Software ideal aufeinander abgestimmt. Die Lösungen sind besonders robust ausgelegt und jeweils individuell auf die Bedingungen am Einsatzort zugeschnitten. Insbesondere in den Gebieten Messtechnik, Oberflächenanalytik, optische Materialien, 3D-Scanner, digitale Holographie, schnelle Kameras für die Inline-Messtechnik und die Terahertz-Technologie verfügt das Institut über fundiertes Know-How.

[www.ipm.fraunhofer.de](http://www.ipm.fraunhofer.de)

**Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF**

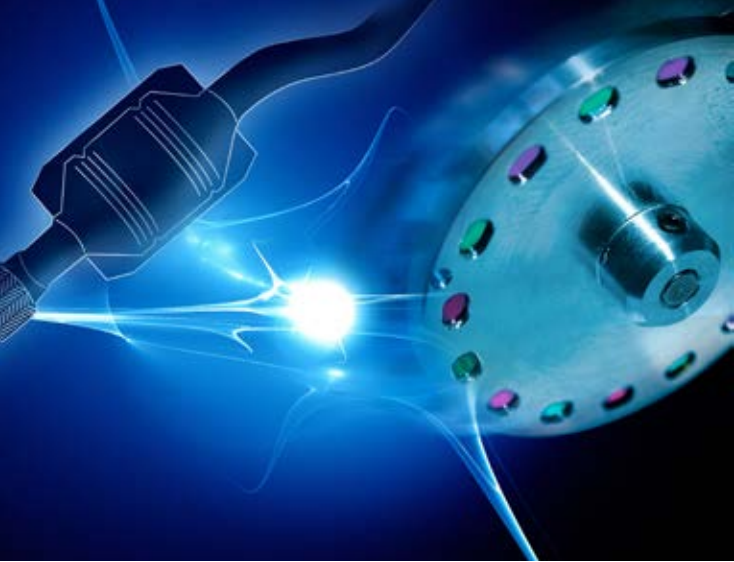
The Fraunhofer IOF develops solutions with light to cope foremost challenges for the future in the areas energy and environment, information and security, as well as health care and medical technology. The competences comprise the entire process chain starting with optics and mechanics design via the development of manufacturing processes for optical and mechanical components and processes of system integration up to the manufacturing of prototypes. Focus of research is put on multifunctional optical coatings, micro- and nano-optics, solid state light sources, optical measurement systems, and opto-mechanical precision systems.

[www.iof.fraunhofer.de](http://www.iof.fraunhofer.de)

**Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM**

Fraunhofer IPM develops and builds optical sensor and imaging systems. These mostly laser-based systems combine optical, mechanical, electrical and software components to create reliable and complete solutions of robust design that are individually tailored to suit the conditions at the site of their application. Particular strengths are in the fields measurement systems, surface analytics, optical materials, 3D scanners, digital holography, fast cameras for inline metrology, and terahertz technology.

[www.ipm.fraunhofer.de](http://www.ipm.fraunhofer.de)



### **Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT**

Das Fraunhofer-Institut für die Lasertechnik ILT ist ein weltweit gefragter FuE Partner in der Vorlaufs- und Vertragsforschung auf dem Gebiet seiner Geschäftsfelder 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](http://www.ilt.fraunhofer.de)

### **Fraunhofer-Institut für Schicht und Oberflächentechnik IST**

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

[www.ist.fraunhofer.de](http://www.ist.fraunhofer.de)

### **Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT**

The Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT is worldwide one of the most important development and contract research institutes of its specific fields. Our technology areas cover the following topics: laser and optics, medical technology and biophotonics, laser measurement technology, and laser materials processing. This includes laser cutting, caving, drilling, welding, and soldering as well as surface treatment, micro processing and rapid manufacturing. Furthermore, the Fraunhofer ILT is engaged in laser plant technology, process control, modeling as well as in the entire system technology.

[www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

### **Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST**

As an industry oriented R&D service center, the Fraunhofer IST is pooling competencies in the areas film deposition, coating application, film characterization, and surface analysis. Scientists, engineers, and technicians are busily working to provide various types of surfaces with new or improved functions and, as a result, help create innovative marketable products. The institute's business segments are: mechanical and automotive engineering, aerospace, tools, energy, glass and facade, optics, information and communication, life science and ecology.

[www.ist.fraunhofer.de](http://www.ist.fraunhofer.de)

# DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

## THE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 67 Institute und Forschungseinrichtungen. Rund 23 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2 Milliarden Euro. Davon fallen rund 1,7 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen 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

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

At present, the Fraunhofer-Gesellschaft maintains 67 institutes and research units. The majority of the more than 23,000 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of 2 billion euros. Of this sum, more than 1.7 billion euros is generated through contract research. More than 70 percent of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. Almost 30 percent is contributed by the German federal and Länder governments in the form of base funding, enabling the institutes to work ahead on solutions to problems that will not become acutely relevant to industry and society until five or ten years from now.

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

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



Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

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

[www.fraunhofer.de](http://www.fraunhofer.de)

so by promoting innovation, strengthening the technological base, improving the acceptance of new technologies, and helping to train the urgently needed future generation of scientists and engineers.

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

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

# NAMEN, DATEN, EREIGNISSE

## NAMES, DATA, ACTIVITIES



## Besondere Gäste | Special Guests

### Ministerpräsidentin Christine Lieberknecht

Freistaat Thüringen, Germany

### Besuch Deutscher Honorarkonsuln aus Nordamerika

### Delegation Chinesische Akademie der Wissenschaften

### Delegation Chinese Space Experts via Europa Akademie

### Delegation Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP), China

### Delegation der Humboldt-Stipendiaten

### Besuch Hamamatsu Cluster

### Japanese Scientists Junior Experts Exchange Program

### Verband der Technik- und Wissenschaftsjournalisten

### Armando Albertazzi

Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brazil

### Andrew Brown, Philip Stahl

SPIE Direktoren

### Federico Capasso

Harvard School of Engineering and Applied Sciences, Boston, USA

### Helmut Dosch

DESY, Hamburg, Germany

**LEFT** *Großes Interesse an der Arrayprojektion bei der Langen Nacht der Wissenschaften 2013. | Great interest in the array projection at the Long Night of Sciences 2013.*

### Hiro-o Hamaguchi

College of Science, National Ciao Tung University, Taiwan

### Francesco Michelotti

SAPIENZA Università di Roma, Rome, Italy

### Dragomir Neshev

The Australian National University, Canberra, Australia

### Junyoung Park, SangHeeKim, Yeungshik Kim

Gumy City, Korea

### Markus Pollnau

University of Twente, Enschede, Netherland

### Jeff Squier

Colorado School of Mines, USA

### Peter Z. Takacs

Brookhaven National Laboratory, Brookhaven, NY, USA

### Mitsuo Takeda

Utsunomiya University, Utsunomiya, Tochigi, Japan

## Internationale Kooperationen I

### International Co-operations

#### Armenia

Yerevan State University, Hovhannes Haroyan

#### Australia

Centre of Ultrahigh bandwidth Devices for Optical Systems (CUDOS), MQPhotonics Research Centre, Department of Physics and Astronomy, Macquarie University, Sydney, Michael Withford

## NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Nonlinear Physics Center, Australian National University,  
Canberra, Dragomir Neshev and Yuri Kivshar

### Austria

Institut für Quantenoptik, Universität Wien, Vienna,  
Philip Walter

### Brazil

University of Porto Alegre, Institute for Physics,  
Flavio Horowitz

### Canada

Énergie, Matériaux et Télécommunications Research Center,  
Institut national de la recherche scientifique (INRS), Varennes,  
Roberto Morandotti

Centre d'optique, photonique et laser (COPL), Université Laval,  
Québec, Réal Vallée

Department of Electrical and Computer Engineering, University  
of Toronto, Peter Herman

### Chile

Optical Physics Group, University of Santiago, Mario Molina

### France

Université Jean Monnet Saint-Etienne, Olivier Parriaux

École Polytechnique, Paris, Gérard Mourou

Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay  
(ICMMO), Laboratoire de Physico-Chimie de L'Etat Solide  
(LPCES), Université de Paris Sud 11, Orsay, Matthieu Lancry

University Bordeaux 1, Bruno Bousquet

Photonics Group, XLIM, Limoges, Frederic Louradour

### Great Britain

Imperial College London, Molly M. Stevens

Centre for Quantum Optics, Bristol University, Jeremy O'Brien

### Greece

Optical Solitons Group, Crete University, Heraklion,  
Nikolaos Efremidis

### Indonesia

Institute for Technology Bandung, Aleksander Iskander

### Iran

Physics Department, Sharif University of Technology, Teheran,  
Abdollah Longari

### Israel

Technion, Haifa, Abraham Marmor

Nonlinear Solid-State Optics Group, Technion, Haifa,  
Mordechai Segev

Physics Department, Tel Aviv University, Victor Fleurov

### Italy

SAPIENZA Università di Roma, Francesco Michelotti

Insubria University, Paolo Di Trapani

Politecnico di Torino, Emiliano Descrovi

Università di Torino, Federico Bussolino

Classical Optics Group, Politecnico Milano, Stefano Longhi

### Japan

Tohoku University, Sendai, Toshikuno Kaino

### Mexico

Quantum Optics Group, Instituto Nacional de Astrofísica,  
Óptica y Electrónica, Puebla, Hector Moya-Cessa

Nonlinear Optics Group, Universidad de las Americas, Puebla,  
Victor Vysloukh

### Singapore

Quantum Optics Group, Singapore University, Kwek Chuang

### Spain

Nonlinear Optics Group, ICFO, Barcelona, Yaroslav Kartashov

### Switzerland

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Dario Floreano

IMT University Neuchâtel, Hans-Peter Herzog

Ecole Polytechnique Federal Lausanne, Laboratoire d'optique  
biomedicale, Lausanne, Theo Lasser

### Taiwan

Optical Sciences Center, National Central University, Jhongli,  
Wei-Kun Chang

## USA

CREOL, Orlando, FL, James Harvey

Ohio State University, Allen Yi

Clemson University/School of Materials Science and Engineering, Kathleen Richardson

Department of Physics, Colorado School of Mines, Golden, Jeff Squier

Nonlinear Photonics Group, CREOL, Orlando, Demetrios Christodoulides

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Scott Skirlo

College of Optics and Photonics, CREOL & FPCE, University of Central Florida, Orlando, Martin Richardson and Kathleen Richardson

Nonlinear Optics Group, Wesleyan University, Middletown, Tsampikos Kottos

## Messebeteiligungen 2013 I

### Fairs Participations 2013

#### Photonics West

5.–7.2.2013, San Francisco, USA

#### HANNOVER MESSE

8.–12.4.2013, Hannover, Germany

#### LASER World of PHOTONICS

13.–16.5.2013, München, Germany

#### Control

14.–17.5.2013, Stuttgart, Germany

#### SENSOR+TEST

14.–17.5.2013, Nürnberg, Germany

#### International Paris Air Show

17.–23.6.2013, Paris Le Bourget, France

#### Mikrosystemtechnik - Kongress und Ausstellung

14.–16.10.2013, Aachen, Germany

## K – Kunststoffmesse Düsseldorf

16.–23.10.2013, Düsseldorf, Germany

## Aus- und Weiterbildung I

### Education and further training

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

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

## Vorlesungen I Lectures

Dr.-Ing. Erik Beckert

### Optikmontage

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Norbert Kaiser

### Beschichtungstechnologie

#### Nanooptik

Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann / Dr. Olaf Stenzel

### Thin Film Optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

### Atom- und Molekülphysik

#### Laser Physics

### Experimentelle Methoden der optischen Spektroskopie

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

### Angewandte Photonik

Seminar für Doktoranden der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. habil. Uwe Detlef Zeitner  
**Micro- and Nano-Technology**  
**Introduction to Optical Modelling**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

### Conferences – Workshops – Events

**Workshop LED und Lichtsteuerung**  
26. Februar 2013, Fraunhofer-Forum Berlin

**17th European OptiLayer Workshop on Optical Coatings  
for Modern Applications**  
11.–13. März 2013, Fraunhofer IOF, Jena

**Photonik-Akademie 2013**  
17.–22. März 2013, Jena

**Application Panel "Advanced Solid State Lasers and Fiber  
Lasers"**  
14. Mai 2013, Laser Messe München

**Application Panel "Advanced Solid State Lighting"**  
15. Mai 2013, Laser Messe München

**Kick-off Meeting 3Dsensation**  
05. Juni 2013, Fraunhofer IOF Jena

**MikroSystemTechnik KONGRESS 2013 - »Von Bauele-  
menten zu Systemen«**  
14.–16. Oktober 2013, Aachen

**V2013 - Workshop - VAKUUMBESCHICHTUNG UND  
PLASMA-OBERFLÄCHENTECHNIK**  
14.–17. Oktober 2013, Dresden

**Kick-off Meeting Strategiephase 3Dsensation**  
19. November 2013, Fraunhofer IOF Jena

**Lange Nacht der Wissenschaften**  
29. November 2013, Beutenberg Campus Jena

**Treffen Beauftragte für Chancengleichheit der FhG**  
5. Dezember 2013, Hotel Esplanade Jena

**OTTI-Fachforum »Oberflächenfunktionalisierung für die  
Optik« - Beschichtung und Strukturierung**  
9.–10. Dezember 2013, Regensburg

### Preise | Prices

**Deutscher Zukunftspreis des Bundespräsidenten,**  
Stefan Nolte

**Thüringer Forschungspreis für Angewandte Forschung  
2013,** Gunther Notni und Peter Kühmstedt

**WLT Preis,** Andreas Brückner

**Hugo-Geiger-Preis,** René Berlich

**MOC Award,** Andreas Bräuer

**Hershel Rich Technion Innovation Award,**  
Alexander Szameit

**Ausgezeichneter Ort im Land der Ideen**  
Efficient Design Team

**Promotionsstipendium der Carl-Zeiss Stiftung,**  
Christian Gaida

**Lehrpreis der Physikalisch Astronomischen Fakultät (PAF),**  
Herbert Gross

**Postdoc-Stipendium der Carl-Zeiss Stiftung,**  
Tino Eidam

**Examenspreis der Fakultäts für beste Masterarbeit,**  
Sina Saravi

**Heptagon - Sven Bühling - Forschungsförderpreis,**  
Julia Zeuner

**Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung für die beste  
Promotion auf dem Gebiet der optischen Messtechnik,**  
Jens Thomas

**Green Photonics Sonderpreis Thüringen (STIFT)**  
Tobias Ullsperger

**Wissenschaftspreis für Lebenswissenschaften und Physik  
des Beutenberg Campus Jena e.V.,** Alexander Szameit

**"Biophotonic Solutions Outstanding Research Award"  
auf der Photonics West 2013,** AG Jens Limpert

**"Best Student Oral Presentation" auf der Photonics West  
2013 , 1. Preis:** Hans-Jürgen Otto

"Best Student Oral Presentation" auf der Photonics West 2013 , 2. Preis: Christoph Jocher

"Best Student Oral Presentation" auf der Photonics West 2013 , 2. Preis: Sven Breitkopf

Best Student Paper, Laserworld "Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications", 2. Platz: Martin Baumgartl

LASE 2013 - Frontiers in Ultrafast Optics Photonics West 2013, San Francisco (USA), Best Student Paper Competition, 3. Platz: Robert Kammel

LASE 2013 - Frontiers in Ultrafast Optics Photonics West 2013, San Francisco (USA), Best Student Paper Competition, 3. Platz: Sören Richter

Student Poster Award, 546. WE-Heraeus-Seminar on "Light in disordered Photonic Media", Bad Honnef, Germany, 1. Platz: Julia Zeuner

Ideenwettbewerb des Fraunhofer Symposiums »Netzwerk«, Franz Beier , Peter Lutzke

### Bachelorarbeiten I Bachelor Theses

Nils Becker  
Nichtdispersive, ultrakurze Pulse  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/13

Thomas Bolz  
Untersuchungen zum Richten von Wirkmaschinenadeln  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 01/13

Johannes Gäbler  
Entwicklung und Charakterisierung eines Messeinsatzes zur simultanen Erfassung des Transmissions- und Reflexionsvermögens im visuellen Spektralbereich für Hochvakuum-Bedampfungsprozesse  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 10/13

Christian Gerloff  
Entwicklung und Erprobung einer Rotationsachse für die Tapervorrichtung zur unbegrenzten Drehung (> 360 Grad) optischer Fasern um deren Achse  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/13

Nico Hagen  
Realisierung der Steuerungs- und Evaluierungssoftware eines Justage-, Test- und Mikromontagesystems für Multiaperturobjektive  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 09/13

Christoph Hebig  
Entwicklung eines Programms zur Erstellung eines Strahlendatensatzes aus Nahfeld-Goniophotometrie-Aufnahmen  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 10/13

Kathleen Hirte  
Deposition von Kieselglas auf optischen Fasern mittels CO<sub>2</sub>-Laser zur Erzeugung einer spezifischen Beschichtung  
Technische Universität Ilmenau, 08/13

Vanessa Liebold  
Untersuchung zur Löslichkeit aufgedampfter Siliziumdioxid Schichten  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 06/13

Andreas Mann  
Entwurf und Realisierung eines Array-Projektors zur Streifenprojektion  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 09/13

Marina Merker  
Experimentelle Untersuchungen zur Durchtrennung des Glaskörpers mittels Femtosekundenlaser  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2013

Anne-Sophie Munser  
Benetzungsverhalten und Streulichtverluste von Sol-Gel-Schichten mit abgestuften Rauheiten  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/13

Tobias Reusch  
Mechanische Konstruktion und Umsetzung eines modularen Justage-, Test- und Mikromontagesystems für Multiaperturkameras  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 09/13

Martin Schlenker  
Oberflächenmessung mit einem chromatischen konfokalen Sensor  
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 09/13

## NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Anja Schöneberg

**Untersuchung von bildgebenden oberflächenstrukturierten Phasenelementen mit starker Unterdrückung der nullten Beugungsordnung**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 10/13

Johannes Seidel

**Entwicklung von Algorithmen für das Justierdrehen gefasster Linsenbaugruppen**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 08/13

Lukas Stein

**Two-dimensional optical tweezing in a fluid environment for emulating statistical mechanics**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 08/13

Yera Ussembayev (M.Sc. Photonics)

**Design and fabrication of different plasmonic gold nanostructures for the laser-based cell manipulation**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2013

Thomas Witt

**Untersuchung und Korrektur von Aberrationen der intraokularen Femtosekundenlaser – Chirurgie mittels adaptiver Optik**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2013

Alexander Zimmer

**Farbige Solarzellen - Simulation, Realisierung und Charakterisierung**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 10/13

### Diplomarbeiten | Diploma Theses

Enrico Hilpert

**Struktur und Reaktivität von außenstromlos abgeschiedenen Nickel-Phosphor-Schichten**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/13

### Masterarbeiten | Master Theses

Eamon Jalal Ahmed

**Free Form Optics - Modeling and Design**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/13

Jan Bernert

**Verbesserung der plasmonischen Eigenschaft polykristalliner Goldschichten**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07/13

Shan Du

**Optical properties of alumina - aluminum fluoride mixture coating prepared by evaporation**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 10/13

Nadja Felde

**Methoden zur Untersuchung haptischer Eigenschaften funktionaler optischer Oberflächen**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/13

Sven Gorski (Lehramt)

**Zeitliche Formung ultrakurzer Pulse für die Anwendung in der Laserchirurgie**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2013

Armin Hoffmann

**Zeitliche Pulskompression hochenergetischer Ultrakurzpulsfaserlaser**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2013

Yuliya Khanukaeva

**All-fiber narrowband tunable laser source for coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/13

Svyatoslav Kharitonov

**Characterization of nanooptical components for light-wave communication**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07/13

Marco Kienel

**Passive Coherent Beam Combining of Temporally Cascaded Pulses**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/13

Eugene Kim

**Below 50 nm Barium Titanate nanoparticles for biological applications**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/13

Roman Kiselev

**Loss compensation in nanooptical components for lightwave communication**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/13



Stefan Meyer

**Mask Aligner based Fabrication of Optical Gratings utilizing Diffractive Proximity Lithography**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/13

Stefan Mittwoch

**Inkjet-Druck kapazitiver Strukturen für mikrofluidische Anwendungen**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 05/13

Martin Pertenais

**Development of a Vein Viewer System based on a Bidirectional OLED Micro-Display**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/13

Kathrin Rieken

**Characterization of ICP Cr Etching Processes for the Fabrication of Microoptical Gratings**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/13

Erik Schmidt

**Justieralgorithmen zur Zentrierung von Zylinderoptiken für das Justierdrehen und Justierfräsen**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 07/13

Christiane Schubert

**Grundmodeanregung in hoch multimodigen Verstärkerfasern mittels Fasertaper**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 12/13

Gitta Simon

**Dreidimensionale Gruppierung von plasmonischen Strukturen**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/13

Miguel Sison

**Investigation of plasmonic black holes**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 03/13

Dmitry Sivun

**Investigation of Hankel-type surface plasmon polaritons**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 04/13

Maximilian Strecker

**Spektrale Verbreiterung schmalbandiger cw-Lasersignale zur Verschiebung der Schwelle von stimulierter Brillouin-Streuung**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 10/13

Anne Suckow

**Design und Charakterisierung eines elektronischen Clusterauges**

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, 02/13

Xiaolong Wang

**Lifetime investigation of fluorescence particles interacting with plasmonic structures**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/13

Marian Wiemuth

**Experimentelle Untersuchungen zur Leichtbauoptimierung von hohlstrukturierten Metallspiegeln durch Rapid Prototyping**

Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst Göttingen, 07/13

**Dissertationen | Dissertations**

Dr. rer. nat. Luisa Coriand

**Roughness, wetting, and optical properties of functional surfaces**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/13

Dr. rer. nat. Kevin Füchsel

**Nanostrukturierte Halbleiter-Isolator-Halbleiter Solarzellen**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/13

Dr. rer. nat. Christoph Gödeker

**Schichtdesign unter Berücksichtigung von optischen und mechanischen Eigenschaften**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 08/13

Dr. rer. nat. Robert Keil

**Quantum random walks in waveguide lattices**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/13

Dr. rer. nat. Christiane Präfke

**Vakuumgedampfte organisch-anorganische Hybridschichten für den UV-Schutz von Bisphenol-A-Polycarbonat**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/13

Dr. rer. nat. Carsten Schmidt

**Mode dynamics in coupled disk optical microresonators**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/13

Dr. rer. nat. Enrico Seise

**Kohärentes Kombinieren Ultrakurzer Laserpulse**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/13

Dr.-Ing. Alexander Steinmetz

**Short and Ultrashort Pulses from Fiber-Amplified and Passively Q-Switched Microchip Lasers**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/13

### Schutzrechte | Intellectual Property

#### Patentanmeldungen 2013 | Patent Applications 2013

Beier, M.; Gebhardt, A.; Schmidt, E; Litschel, R.

**Verfahren zur zielgerichteten Justierung von optischen Bauelementen zu einer Bezugsachse**

DE 10 2013 004 738.2

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

**Vorrichtung und Verfahren zum berührungslosen Messen von Oberflächenkonturen**

DE 10 2013 208 466.8

Eckstein, H.-C.; Zeitner, U.D.

**Elektromagnetische Strahlung streuendes Element**

DE 10 2013 003 441.8

Gäbler, D.; Kaiser, N.; Ohl, A. (INP Greifswald); Köpp, D. (INP);

Foest, R. (INP); Harhausen, J. (INP)

**Plasma-ionengestütztes Beschichtungsverfahren und Plasmasonde**

DE 10 2013 110 722.2

Kley, E.-B.; Steglich, M. (IAP); Käsebieber, T. (IAP)

**Strahlungsabsorber auf Siliziumbasis**

DE 10 2013 108 288.2

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

**Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung einer Oberfläche**

DE 10 2013 013 791.8

Lange, N.; Wippermann, F.

**Elektrostatischer Aktor mit Auslegerelektrode zur Verringerung der notwendigen elektrischen Spannung und Anpassung des Auslenkungsverhaltens durch Minimierung des Elektrodenabstands**

DE 10 2013 209 804.9

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

Baumgartl, M. (IAP)

**Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung von ultrakurzen Strahlungspulsen**

DE 10 2013 017 755.3

Lutzke, P.; Schmidt, I.

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

DE 10 2013 012 939.7

Nolte, S. (IAP); Gabor, M. (IAP); Bergner, K. (IAP)

**Verfahren und System zum Bearbeiten eines Objekts mit einem Laserstrahl**

DE 10 2013 204 222.1

Notni, G.; Kühmstedt, P.

**Vorrichtung und Verfahren zum bestimmen räumlicher Koordinaten von Oberflächen makroskopischer Objekte**

DE 10 2013 201 061.3

Oberdörster, A.

**Bildverflechtung ohne Speicherpuffer**

DE 10 2013 209 240.7

Oberdörster, A.; Brückner, A.

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

DE 10 2013 200 059.6

Oberdörster, A.

**Mehrkanaloptik- Bildaufnahmeverrichtung**

DE 10 2013 226 789.4

Schulz, U.; Kaiser, N.; Munzert, P.; Ludwig, H. (IAP)

**Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht auf einem Substrat und Substrat mit einer Entspiegelungsschicht**

DE 10 2013 103 075.0

Schulz, U.; Kaiser, N.

**Verfahren zur Bestimmung der Feuchtebarriere von dünnen Schichten**

DE 10 2013 104 846.3

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

**Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht**

DE 10 2013 106 392.6

Sieler, M.; Schreiber, P.

**Projektionsdisplay zur Erzeugung virtueller Bilder mittels Multiaperturanordnung**

DE 10 2013 206 614.7

Sieler, M.; Schreiber, P.; Riedel, A.

**Multiaperturprojektionsdisplay zur Anordnung und Verfahren zur distanzabhängigen Darstellung unterschiedlicher Bildinhalte**

DE 10 2013 208 625.3

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

**Polymere optische Komponenten mit integrierten mechanischen Strukturen mit thermisch induzierter, axialer Positionsänderung**

DE 10 2013 209 814.6

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

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

DE 10 2013 209 819.7

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

**Komponente zur Falschlichtunterdrückung an mehrkanaligen Kameramodulen und Verfahren zu deren Herstellung**

DE 10 2013 209 246.6

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

**Polymere optische Komponenten mit integrierten mechanischen Strukturen für axiale Positionsänderung mittels elektrostatischer Aktoren mit Auslegerelektrode**

DE 10 2013 209 829.4

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

**Polymere optische Komponenten mit integrierten mechanischen Strukturen für eine axiale Positionsänderung mittels elektrostatischer Aktoren mit Formelektrode**

DE 10 2013 209 823.5

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

**Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung einer Struktur aus aushärtbarem Material durch Abformung**

DE 10 2013 207 243.0

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

**Multiaperturvorrichtung und Verfahren zur Erfassung eines Objektbereichs**

DE 10 2013 222 780.9

**Patenterteilungen 2013 | Patent Assignations 2013**

Beckert, E.; Banse, H.; Zakel, E. (PacTech); Fettke, M. (PacTech)

**Verfahren zum Fügen justierter diskreter optischer Elemente**

US 8,431,477 B2

Dannberg, P.; Duparré, J.; Brückner, A.; Bräuer, A.

**Bilderfassungssystem und Verfahren zur Herstellung mindestens eines Bilderfassungssystems**

KR 10-127507-6

Duparré, J.; Dannberg, P.; Wippermann, F.; Bräuer, A.

**Waferlevelnlinsen ohne Glassubstrat bzw. transparenten Träger im optischen Pfad**

US 8,432,625 B2

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

**Vorrichtung zur optischen Abbildung**

DE 10 2009 047 361 B4

Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Bitzer, M. (ORAFOL Fresnel Optics GmbH)

**Kameramodul, hierauf basierendes Array und Verfahren zu dessen Herstellung**

EP 1 779 166 B1

KR 10 -122865-8

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

**Beugungsgitter und Verfahren zu dessen Herstellung**

DE 10 2012 101 555 B4

Füchsel, K.; Schröder, S.; Pulsack, J.

**Schichtsystem für eine transparente Elektrode und Verfahren zu dessen Herstellung**

DE 10 2012 015 457 B3

Kaless, A.; Schulz, K.; Kaiser, N.; Scheler, M.; Munzert, P.

**Verfahren zur Herstellung eines strahlungsabsorbierenden optischen Elements und strahlungsabsorbierendes optisches Element**

EP 1 786 945 B1

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

**Vorrichtung und Verfahren zum Verstärken von Lichtimpulsen**

EP 2 384 526 B1

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Schimpf, D. (IAP)  
**Vorrichtung zum Verstärken von Lichtimpulsen**  
DE 10 2008 047 226 B4

Michaelis, D.; Wächter, C.; Danz, N.  
**Strahlformer zur effizienten Erzeugung von beliebigen, flächenhaften Abstrahlprofilen von Flächenlichtquellen oder Lichtquellen in reflektierenden Hausungen**  
US 8,469,549 B2

Munzert, P.; Scheler, M.; Kaiser, N.; Schulz, U.  
**Verfahren zur Herstellung einer Nanostruktur an einer Kunstoberfläche**  
EP 2 083 991 B8  
JP 5 268 931 B2

Pradarutti, B. (IAP); Notni, G.; Riehemann, S.  
**Verfahren und Vorrichtung zum schnellen Messen von Proben mit geringem optischem Wegunterschied mittels elektromagnetischer Strahlung im Terahertz-Bereich**  
DE 10 2007 011 820 B4

Reinlein, C.; Beckert, E.; Peschel, T., Damm, C.  
**Adaptiver Spiegel und Verfahren zu dessen Herstellung**  
US 8,480,243 B2

Sieler, M.; Schreiber, P.; Förster, E.  
**Projektionsdisplay und dessen Verwendung**  
JP 5 327 658 B2

Sieler, M.; Schreiber, P.; Förster, E.  
**Projektionsdisplay und Verfahren zum Anzeigen eines Gesamtbilds**  
KR 10-132517-4

Schenk, C.; Risse, S.; Harnisch, G.; Peschel, T.; Bauer, R.  
**Mittels aerostatischer Lagerelemente geführter Tisch für Vakuumanwendungen**  
DE 10 2008 019 681 B4  
JP 5 227 876 B2

Schulz, U.; Gäbler, D.; Kaiser, N.; Ohl, A. (INP); Steffen, A. (INP)  
**Plasmaionenquelle für eine Vakuumbeschichtungsanlage**  
DE 10 2011 103 464 B4

Trost, M. (IAP); Herffurth, T. (IAP); Schröder, S.  
**Verfahren zur hochempfindlichen Streulichtmessung**  
DE 10 2012 106 322 B3

Trost, M.; Schröder, S. (IAP); Hauptvogel, M.; Notni, G.; Duparré, A.; Feigl, T.  
**Vorrichtung und Verfahren zur winkelaufgelösten Streulichtmessung**  
DE 10 2012 005 417 B4

Tünnermann, A.; Kalkowski, G.; Eberhardt, R.; Nolte, S. (IAP)  
**Verfahren zum Lasergestützten Bonden, derart gebundene Substrate und deren Verwendung**  
JP 5 342 460 B2

Wippermann, F.; Duparré, J.; Bräuer, A.; Brückner, A.  
**Vorrichtung, Bildverarbeitungsvorrichtung und Verfahren zur optischen Abbildung**  
KR 10-127996-6  
JP 5 379 241 B2

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Optischer Schichtstapel und Verfahren zu dessen Herstellung**  
DE 10 2009 055 083 B4  
EP 2 433 169 B1  
US 8,587,882 B2

Zeitner, U.D.; Stürzebecher, L.; Harzendorf, T.; Völkel, R.; Vogler, U.  
**Anordnung zur Abstandsmessung mit diffraktiver Struktur**  
DE 10 2012 103 008 B3

Zeitner, U.D.; Stürzebecher, L.; Harzendorf, T.; Völkel, R.; Vogler, U.  
**Verfahren und Sensoreinheit zur Abstandsmessung in einer lithografischen Vorrichtung und lithografische Vorrichtung**  
DE 10 2012 103 007 B3

Zeitner, U.D.; Schets, S. (eZono); Sobrino, E.V. (eZono)  
**Ultraschallsonde und Verfahren zur optischen Detektion von Ultraschallwellen**  
DE 10 2006 033 229 B2

Zeitner, U.D.; Eckstein, H.-C.; Schmid, W. (Osram)  
**Kantenemittierender Halbleiterlaser**  
US 8,363,688 B2

Zeitner, U.D.; Eckstein, H.-C.; Schmid, W. (Osram)  
**Kantenemittierender Halbleiterlaser mit Phasenstrukturen**  
ZL200980130080.X

## Markenerteilungen 2013 | Trademarks 2013

### 3Dsensation

DE 30 2013 042 128.0

### efficient design

DE 30 2013 038 291.9

## Gebrauchsmustererteilungen 2013 | Utility Model 2013

Kley, E.-B.; Schulze, M. (IAP)

### Optisches Element mit einer Antireflexbeschichtung

DE 20 2011 110173 U1

## Wissenschaftliche Publikationen | Scientific Publications

### Bücher | Books

Beier, Matthias; Gebhardt, Andreas; Platzdasch, Anne;

Guyenot, Volker; Eberhardt, Ramona

### Hochgenaue Referenzflächenbearbeitung asphärischer, zylindrischer und prismatischer Optikkomponenten

Jahrbuch für Optik und Feinmechanik (2013) S. 99-122, ISBN 978-3-00-041353-7

Brückner, Andreas

### Multi Aperture Cameras

Tigran Galstian (Ed.), Smart Mini Cameras, CRC Taylor&Francis (2013) p. 239-298, ISBN 978-1466512924

Cerami, L.; Mazur, E.; Nolte, S.; Schaffer, C.B.

### Femtosecond Laser Micromachining

Ultrafast Nonlinear Optics (Scottish Graduate Series) (2013) 287-322, Springer Verlag Berlin, ISBN 978-3-319-00016-9

Duparré, Angela; Coriand, Luisa

### Assessment criteria for superhydrophobic surfaces with stochastic roughness

K.L. Mittal (ed.) Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion, Hoboken: Wiley-VCH Verlag (2013) p. 193-202, ISBN 978-1-118-47292-7

Flämmich, Michael; Danz, Norbert

### Optical characterisation of OLED emitters from radiation pattern analyses

Alastair Buckley (Ed.), Organic light-emitting diodes (OLEDs): materials, devices and applications, University of Sheffield, Woodhead Publishing Ltd. (2013) p. 319-359, ISBN 978-0-85709-425-4

Helgert, Christian, Pertsch, Thomas

### Deterministic amorphous metamaterials and their optical far-field response

Amorphous Nanophotonics (2013) , Springer Verlag Berlin, 10:3642324746, ISBN 978-3-642-32474-1

Schulz, Ulrike; Schaffer, Robert W.

### Optical coatings on plastic for antireflection purposes

Angela Piegari/Francois Flory (Ed.), Optical thin films and coatings: From materials to applications, Woodhead Publishing (2013) p. 321-342, ISBN 978-0-85709-594-7

## Zeitschriften | Journals

Ackermann, Roland; Kammel, Robert; Merker, Marina; Kamm, Andreas; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

### Optical side-effects of fs-laser treatment in refractive surgery investigated by means of a model eye

Biomedical Optics Express 4 (2013) 2, 220-229

Alaee, R.; Menzel, C.; Hübner, U.; Pshenay-Severin, E.; Bin Hasan, S.; Pertsch, T.; Rockstuhl, C.; Lederer, F.

### Deep-Subwavelength Plasmonic Nanoresonators Exploiting Extreme Coupling

Nano Lett. (2013) 13 (8), 3482--3486

Angelini, Angelo; Enrico, Emanuele; De Leo, Natascia;

Munzert, Peter; Boarino, Luca; Michelotti, Francesco; Giorgis, Fabrizio; Descrovi, Emiliano

### Fluorescence diffraction assisted by Bloch surface waves on a one-dimensional photonic crystal

New Journal of Physics 15 (2013) 073002

Bartl, Dominik; Ametowobla, Mawuli; Schmid, F.; Letsch,

Andreas; Hafner, Margit; Nolte, Stefan; Tünnermann, Andreas

### Probing timescales during back side ablation of Molybdenum thin films with optical and electrical measurement techniques

Optics Express 21 (2013) 14 p. 16431-16443

Bartl, Dominik; Michalowski, Andreas; Hafner, Margit; Letsch, Andreas; Nolte, Stefan; Tünnermann, Andreas

### Time-resolved study of back side ablated molybdenum thin films by ultrashort laser pulses

Applied Physics A: Materials Science & Processing 110 (2013) 1 p. 227-233

- Baumgartl, Martin; Abreu-Afonso, Javier; Diez, Antonio; Rothhardt, Manfred; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas  
**Environmentally stable picosecond Yb fiber laser with low repetition rate**  
 Applied Physics B: Lasers and Optics 111 (2013) 1, 39-43
- Bidinger, J.; Ackermann, R.; Cattaneo, G.; Kammel, R.; Nolte S.  
**A feasibility study on fs-laser thrombolysis**  
 Photomed. Laser Surg. (2013) 32 (1), 17-22
- Bingel, Astrid; Fücksel, Kevin; Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas  
**Pulsed DC magnetron sputtering of transparent conductive oxide layers**  
 Chinese Optics Letters 11 (2013) Suppl. 1 S10201
- Bingel, Astrid; Fücksel, Kevin; Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas  
**ZnO:Al films prepared by inline DC magnetron sputtering**  
 Advanced Optical Technologies (2013) DOI: 10.1515/aot-2013-0044
- Bräuer-Burchardt, Christian; Möller, Max; Munkelt, Christoph; Heinze, Matthias; Kühmstedt, Peter; Notni, Gunther  
**On the accuracy of point correspondence methods in three-dimensional measurement systems using fringe projection**  
 Optical Engineering 52 (2013) 6, 063601
- Burmeister, Frank; Richter, Sören; Richter, Daniel; Voigtländer, Christian; Heisterkamp, Alexander; Nolte, Stefan  
**Breakthroughs in Photonics 2012: Femtosecond-Laser Nanomachining**  
 IEEE Photonics Journal 5 (2013) 2 0700506
- Demmler, Stefan; Rothhardt, Jan; Hädrich, Steffen; Krebs, Manuel; Hage, Arvid; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas  
**Generation of high-photon flux-coherent soft x-ray radiation with few-cycle pulses**  
 Optics Letters 38 (2013) 23, 5051-5054
- Descrovi, Emiliano; Barakat, Elsie; Angelini, Angelo; Munzert, Peter; De Leo, Natascia; Boarino, Luca; Giorgis, Fabrizio; Herzig, Hans Peter  
**Leakage radiation interference microscopy**  
 Optics Letters 38 (2013) 17, 3374-3376
- Di Giuseppe, G.; Martin, L.; Perez-Leija, A.; Keil, R.; Dreisow, F.; Nolte, S.; Szameit, A.; Abouraddy, A. F.; Christodoulides, D. N.; Saleh, B. E. A.  
**Einstein-Podolsky-Rosen Spatial Entanglement in Ordered and Anderson Photonic Lattices**  
 Phys. Rev. Lett. (2013) 110 (15), 150503
- Di Giuseppe, G.; Martin, L.; Perez-Leija, A.; Keil, R.; Dreisow, F.; Nolte, S.; Szameit, A.; Abouraddy, A. F.; Christodoulides, D. N.; Saleh, B. E. A.  
**Einstein-Podolsky-Rosen Spatial Entanglement in Ordered and Anderson Photonic Lattices**  
 Phys. Rev. Lett. (2013) 110(15), 150503
- Diziain, Severine; Geiss, Reinhard; Zilk, Matthias; Schrepel, Frank; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas; Pertsch, Thomas  
**Second harmonic generation in free-standing lithium niobate photonic crystal L3 cavity**  
 Applied Physics Letters 103 (2013) 5, 051117
- Döring, Sven; Richter, Sören; Heisler, F.; Ullsperger, Tobias; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan  
**Influence of ambient pressure on the hole formation in laser deep drilling**  
 Applied Physics A: Materials Science & Processing 112 (2013) 3, 623-629
- Döring, Sven; Ullsperger, Tobias; Heisler, F.; Richter, Sören; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan  
**Hole Formation Process in Ultrashort Pulse Laser Percussion Drilling**  
 Physics Procedia 41 (2013) , 424-433
- Dreisow, Felix; Kartashov, Yaroslav V.; Heinrich, Matthias; Vysloukh, Victor A.; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan; Torner, Lluís; Longhi, Stefano; Szameit, Alexander  
**Spatial light rectification in an optical waveguide lattice**  
 Europhysics Letters – EPL 101 (2013) 44002
- Eckstein, Christoph; Zeitner, Uwe Detlef  
**Modeling electro-optical characteristics of broad area semiconductor lasers based on a quasi-stationary multi-mode analysis**  
 Optics Express 21 (2013) 20, 23231-23240
- Eckstein, Christoph; Zeitner, Uwe Detlef; Tünnermann, Andreas; Strauss, Uwe; Schmid, Wolfgang; Lauer, Christian  
**Mode shaping in semiconductor broad area lasers by monolithically integrated phase structures**  
 Optics Letters 38 (2013) 21 , 4480-4482

- Eckstein, Wiebke; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas  
**Comparison of different simulation methods for effective medium computer generated holograms**  
 Optics Express 21 (2013) 10, 12424-12433
- Eichelkraut, T.; Heilmann, R.; Weimann, S.; Stützer, S.; Dreisow, F.; Christodoulides, D.N.; Nolte, S.; Szameit, A.  
**Mobility transition from ballistic to diffusive transport in non-Hermitian lattices**  
 Nat. Commun. (2013) 4, 2533
- Eilenberger, F.; Brown, A.; Minardi, S.; Pertsch, T.;  
**Imaging cross-correlation FROG: measuring ultrashort, complex, spatiotemporal fields**  
 Opt. Express (2013) 21 (22), 25968-25976
- Eilenberger, F.; Kabakova, I. V.; de Sterke, C. M.; Eggleton, B. J.; Pertsch, T.  
**Cavity optical pulse extraction: ultra-short pulse generation as seeded Hawking radiation**  
 SCIENTIFIC REPORTS (2013) 3, 2607
- Errmann, R.; Minardi, S.; Pertsch, T.  
**A broadband scalar vortex coronagraph**  
 Mon. Not. Roy. Astron. Soc. (2013) 435, 565-569
- Florschütz, Kristina; Schröter, Anja; Schmieder, Stefan; Chen, Wanxin; Schweizer, Patrick; Sonntag, Frank; Danz, Norbert; Baronian, Keith; Kunze, Gotthard  
**'Phytochip': On-chip detection of phytopathogenic RNA viruses by a new surface plasmon resonance platform**  
 Journal of Virological Methods 189 (2013) 1, 80-86
- Frascella, Francesca; Ricciardi, Serena; Rivolo, Paola; Moi, Valeria; Giorgis, Fabrizio; Descrovi, Emiliano; Michelotti, Francesco; Munzert, Peter; Danz, Norbert; Napione, Lucia; Alvaro, Maria; Bussolino, Federico  
**A fluorescent one-dimensional photonic crystal for label-free biosensing based on bloch surface waves**  
 Sensors 13 (2013) 2, 2011-2022
- Fuchs, S.; Rodel, C.; Krebs, M.; Hädrich, S.; Bierbach, J.; Paz, A. E.; Kuschel, S.; Wunsche, M.; Hilbert, V.; Zastrau, U.; Forster, E.; Limpert, J.; Paulus, G. G.  
**Sensitivity calibration of an imaging extreme ultraviolet spectrometer-detector system for determining the efficiency of broadband extreme ultraviolet sources**  
 Rev. Sci. Instrum. (2013) 84 (2), 023101
- Ghazaryan, Lilit; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas; Szeghalmi, Adriana Viorica  
**Stability and annealing of alucones and alucone alloys**  
 Journal of Vacuum Science & Technology A 31 (2013) 1, 01A149
- Gödeker, Christoph; Schulz, Ulrike; Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas  
**Antireflection coating for sapphire with consideration of mechanical properties**  
 Surface and Coatings Technology (2013) DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.07.001
- Golshani, M.; Bahrapour, A. R.; Langari, A.; Szameit, A.  
**Transverse localization in nonlinear photonic lattices with second-order coupling**  
 Phys. Rev. A (2013) 87 (3), 033817
- Gräfe, M.; Heilmann, R.; Keil, R.; Eichelkraut, T.; Heinrich, M.; Nolte, S.; Szameit, A.  
**Correlations of indistinguishable particles in non-Hermitian lattices**  
 New J. Phys. (2013) 15, 033008
- Groß, Petra; Haarlammert, Nicoletta; Kues, Michael; Walbaum, Till; Fallnich, Carsten  
**Effects of optical feedback on femtosecond supercontinuum generation**  
 Optical Fiber Technology 18 (2013) 5, 290-303
- Goy, Matthias; Reinlein, Claudia; Kinast, Jan; Lange, Nicolas  
**Cryogenic testing of a unimorph-type deformable mirror and theoretical material optimization**  
 Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS 13 (2013) 1, 011107
- Gutzeit, Nam; Müller, Jens; Reinlein, Claudia; Gebhardt, Sylvia  
**Manufacturing and characterization of a deformable membrane with integrated temperature sensors and heating structures in low temperature co-fired ceramics**  
 International Journal of Applied Ceramic Technology 10 (2013) 3, 435-442
- Hädrich, Steffen; Klenke, Arno; Hoffmann, Armin; Eidam, Tino; Gottschall, Thomas; Rothhardt, Jan; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas  
**Nonlinear compression to sub-30-fs, 0.5 mJ pulses at 135 W of average power**  
 Optics Letters 38 (2013) 19, 3866-3869

- Heinert, Daniel; Kroker, Stefanie; Friedrich, Daniel; Hild, Stefan; Kley, Ernst-Bernhard; Leavey, Sean; Martin, Iain; Nawrodt, Ronny; Tünnermann, Andreas; Vyatchanin, Sergey Petrovich; Yamamoto, Kazuhiro  
**Calculation of thermal noise in grating reflectors**  
Physical Review D 88 (2013) 4, 042001
- Held, Mario; Wilbrandt, Steffen; Stenzel, Olaf; Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas  
**Practical optimization of a coating deposition process by application of hybrid monitoring strategies in an industrial production environment**  
Advanced Optical Technologies 2 (2013) 2, 189-196
- Helm, Roland; Mauroner, Oliver; Dowling, Michael; Pöhlmann, Kendra  
**Spin-offs from public R&D organisations**  
International Journal of Business and Globalisation 11 (2013) 3, 217-242
- Helm, Roland; Möller, Michael; Mauroner, Oliver; Conrad, Daniel  
**The effects of a lack of social recognition on online communication behavior**  
Computers in Human Behavior 29 (2013) 3, 1065–1077
- Herffurth, Tobias; Schröder, Sven; Trost, Marcus; Duparré, Angela; Tünnermann, Andreas  
**Comprehensive nanostructure and defect analysis using a simple 3D light-scatter sensor**  
Applied Optics 52 (2013) 14, 3279-3287
- Hofmann, Peter; Voigtländer, Christian; Nolte, Stefan; Peyghambarian, Nasser; Schülzgen, Axel  
**550-mW Output Power From a Narrow Linewidth All-Phosphate Fiber Laser**  
Journal of Lightwave Technology 31 (2013) 5, 756-760
- Homann, Christian; Breuer, Markus; Setzpfandt, Frank; Pertsch, Thomas; Riedle, Eberhard  
**Seeding of picosecond and femtosecond optical parametric amplifiers by weak single mode continuous lasers**  
Optics Express 21 (2013) 1, 730-739
- Huebner, Uwe; Pshenay-Severin, Ekaterina; Alaei, Rasoul; Menzel, Christoph; Ziegler, Mario; Rockstuhl, Carsten; Lederer, Falk; Pertsch, Thomas; Meyer, Hans-Georg; Popp, Juergen  
**Exploiting extreme coupling to realize a metamaterial perfect absorber**  
Microelectronic Engineering 111 (2013), 110-113
- Jansen, Florian; Stutzki, Fabian; Otto, Hans-Jürgen; Jauregui, Cesar; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas  
**High-power thermally guiding index-antiguinding-core fibers**  
Optics Letters 38 (2013) 4, 510-512
- Jauregui, Cesar; Otto, Hans-Jürgen; Stutzki, Fabian; Jansen, Florian; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas  
**Passive mitigation strategies for mode instabilities in high-power fiber laser systems**  
Optics Express 21 (2013) 16, 19375-19386
- Jauregui, Cesar; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas  
**High-power fibre lasers**  
Nature Photonics 7 (2013), 861-867
- Jobst, Paul Johannes; Stenzel, Olaf; Schürmann, Mark; Modsching, Norbert; Yulin, Sergiy; Wilbrandt, Steffen; Gäbler, Dieter; Kaiser, Norbert; Tünnerman, Andreas  
**Optical properties of unprotected and protected sputtered silver films: Surface morphology versus UV/VIS reflectance**  
Advanced Optical Technologies (2013) DOI: 10.1515/aot-2013-0052
- Jocher, Christoph; Jauregui, Cesar; Becker, Martin; Rothhardt, Manfred; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas  
**An all-fiber Raman laser for cylindrical vector beam generation**  
Laser Physics Letters 10 (2013) 12 125108
- Kaiser, Thomas; Hasan, Shakeeb Bin; Paul, Thomas; Pertsch, Thomas; Rockstuhl, Carsten  
**Impedance generalization for plasmonic waveguides beyond the lumped circuit model**  
Physical Review B 88 (2013) 3, 035117
- Kalkowski, Gerhard; Benkenstein, Tino; Rothhardt, Carolin; Fuchs, Frank; Zeitner, Uwe Detlef  
**Direct bonding for the encapsulation of transverse optical gratings**  
Microelectronic Engineering 110 (2013), 302-306
- Kartashov, Y. V.; Zeuner, J. M.; Szameit, A.; Vysloukh, V. A.; Torner, L.  
**Light scattering in disordered honeycomb photonic lattices near the Dirac points**  
Opt. Lett. (2013) 38 (19), 3727-3730



Keil, Robert; Zeuner, Julia M.; Dreisow, Felix; Heinrich, Matthias; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan; Szameit, Alexander

**The random mass Dirac model and long-range correlations on an integrated optical platform**

Nature Communications 4 (2013) 1368

Kienel, Marco; Klenke, Arno; Eidam, Tino; Baumgartl, Martin; Jauregui, Cesar; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

**Analysis of passively combined divided-pulse amplification as an energy-scaling concept**

Optics Express 21 (2013) 23, 29031-29042

Kim, E.; Steinbrück, A.; Buscaglia, M. T.; Buscaglia, V.; Pertsch, T.; Grange, R.

**Second-Harmonic Generation of Single BaTiO<sub>3</sub> Nanoparticles down to 22 nm Diameter**

ACS Nano (2013) 7 (6), 5343--5349

Klenke, Arno; Breitkopf, Sven; Kienel, Marco; Gottschall, Thomas; Eidam, Tino; Hädrich, Steffen; Rothhardt, Jan; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

**530 W, 1.3 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system**

Optics Letters 38 (2013) 13, 2283-2285

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

**Divided-pulse nonlinear compression**

Optics Letters 38 (2013) 22, 4593-4596

Krebs, Manuel; Hädrich, Steffen; Demmler, Stefan; Rothhardt, Jan; Zair, Amelle; Chipperfield, Luke; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

**Towards isolated attosecond pulses at megahertz repetition rates**

Nature Photonics 7 (2013) 7, 555-559

Kroker, Stefanie; Käsebier, Thomas; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas

**Coupled grating reflectors with highly angular tolerant reflectance**

Optics Letters 38 (2013) 17, 3336-3339

Kroker, Stefanie; Käsebier, Thomas; Steiner, Stefan; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas

**High efficiency two-dimensional grating reflectors with angularly tunable polarization efficiency**

Applied Physics Letters 102 (2013) 16, 161111

Kruk, S. S.; C. Helgert, M. Decker, I. Staude, C. Menzel, C. Etrich, C. Rockstuhl, C. Jagadish, T. Pertsch, D. N. Neshev, Y. S. Kivshar

**Optical metamaterials with quasicrystalline symmetry: Symmetry-induced optical isotropy**

Phys. Rev. B (2013) 88, 201404

Kühmstedt, Peter

**Fertigungsprozesse dreidimensional auswerten**

KunststoffXtra 3 (2013) 6, 37

Kühmstedt, Peter

**Fertigungsprozesse in 3D auswerten**

Konstruktionspraxis (2013) 9, 30

Kühmstedt, Peter

**Schnelle Fertigungsprozesse dreidimensional auswerten**

Tema 43 (2013) 4, 18-19

Kühmstedt, Peter; Notni, Gunther

**Im richtigen Licht – Ultraschnelle 3D-Messungen mittels Arrayprojektion**

inVISION - SPS Fachzeitschrift für Automatisierungstechnik (2013) 3, 44-45

Lange, Nicolas; Scheiding, Sebastian; Wippermann, Frank; Beckert, Erik; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas

**Design and wafer-level replication of a freeform curvature for polymer-based electrostatic out-of-plane actuators**

Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS 12 (2013) 4 041205

Lehneis, Reinhold; Steinmetz, Alexander; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

**Wavelength-tunable, sub-picosecond pulses from a passively Q-switched microchip laser system**

Optics Letters 38 (2013) 14, 2478-2480

Longhi, S.; Szameit, A.

**Dynamic localization in Glauber-Fock lattices**

J. Phys.-Condes. Matter (2013) 25 (3), 035603

Mayer, M.; Keskinbora, K.; Grevent, C.; Szeghalmi, A.; Knez, M.; Weigand, M.; Snigirev, A.; Snigireva, I.; Schutz, G.

**Efficient focusing of 8 keV X-rays with multilayer Fresnel zone plates fabricated by atomic layer deposition and focused ion beam milling**

J. Synchrot. Radiat. (2013) 20, 433--440

- Merker, M.; Ackermann, R.; Kammel, R.; Kunert, K. S.; Nolte, S.  
**An in vitro study on focusing fs-laser pulses into ocular media for ophthalmic surgery**  
*Lasers Surg. Med.* (2013) 45(9), 589-96
- Meyer, Tobias; Baumgartl, Martin; Gottschall, Thomas; Pascher, Torbjörn; Wuttig, Andreas; Matthäus, Christian; Romeike, Bernd; Brehm, Bernhard; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas; Guntinas-Lichius, Orlando; Dietzek, Benjamin; Schmitt, Michael; Popp, Jürgen  
**A compact microscope setup for multimodal nonlinear imaging in clinics and application to disease diagnostics**  
*The Analyst* 138 (2013) 14, 4048-4057
- Meyer, Tobias; Chemnitz, Mario; Baumgartl, Martin; Gottschall, Thomas; Pascher, Torbjörn; Matthäus, Christian; Romeike, Bernd F.M.; Brehm, Bernhard R.; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas; Schmitt, Michael; Dietzek, Benjamin; Popp, Jürgen  
**Expanding multimodal microscopy by high spectral resolution coherent anti-stokes Raman scattering imaging for clinical disease diagnostics**  
*Analytical Chemistry* 85 (2013) 14, 6703-6715
- Michelotti, Francesco; Sinibaldi, Alberto; Munzert, Peter; Danz, Norbert; Descrovi, Emiliano  
**Probing losses of dielectric multilayers by means of Bloch surface waves**  
*Optics Letters* 38 (2013) 5, 616-618
- Minovich, A.; Klein, A. E.; Neshev, D. N.; Kivshar, Y. S.; Pertsch, T.; Christodoulides, D. N.  
**Airy plasmons: non-diffracting optical surface waves**  
*Laser Photon. Rev.* (2013) DOI: 10.1002/lpor.201300055
- Mourou, G.; Brocklesby, B.; Tajima, T.; Limpert, J.  
**The future is fibre accelerators**  
*Nat. Photonics* (2013) 7 (4), 258--261
- Naether, U.; Heinrich, M.; Lahini, Y.; Nolte, S.; Vicencio, R. A.; Molina, M. I.; Szameit, A.  
**Self-trapping threshold in disordered nonlinear photonic lattices**  
*Opt. Lett.* (2013) 38 (9), 1518-1520
- Naether, Uta; Rojas-Rojas, Santiago; Martínez, Alejandro J.; Stützer, Simon; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan; Molina, Mario I.; Vicencio, Rodrigo A.; Szameit, Alexander  
**Enhanced distribution of a wave-packet in lattices with disorder and nonlinearity**  
*Optics Express* 21 (2013) 1, 927-934
- Naether, Uta; Stützer, Simon; Vicencio, Rodrigo A.; Molina, Mario; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan; Kottos, Tsam-pikos; Christodoulides, Demetrios N.; Szameit, Alexander  
**Experimental observation of superdiffusive transport in random dimer lattices**  
*New Journal of Physics* 15 (2013) 1,013045
- Nawrodt, Ronny; Schwarz, Christian; Kroker, Stefanie; Martin, Iain; Bassiri, R.; Brückner, Frank; Cunningham, Liam; Hammond, Giles D.; Heinert, Daniel; Hough, James; Käsebier, Thomas; Kley, Ernst-Bernhard; Neubert, Ralf; Reid, S.; Rowan, Sheila Michael; Seidel, Paul; Tünnermann, Andreas  
**Investigation of mechanical losses of thin silicon flexures at low temperatures**  
*Classical and Quantum Gravity* 30 (2013) 11, 115008
- Nolte, Stefan; Zimmermann, Felix; Richter, Sören; Plech, Anton; Peschel, Ulf; Tünnermann, Andreas  
**Ultrashort pulse induced nanogratings**  
*MATEC Web of Conferences* 8 (2013) 03001
- Oates, Thomas W.H.; Dastmalchi, Babak; Helgert, Christian; Reissmann, Lars; Huebner, Uwe; Kley, Ernst-Bernhard; Verschuuren, Marc A.; Bergmair, Iris; Pertsch, Thomas; Hingerl, Kurt; Hinrichs, Karsten  
**Optical activity in sub-wavelength metallic grids and fishnet metamaterials in the conical mount**  
*Optical Materials Express* 3 (2013) 4, 439-451
- Oberdörster, Alexander; Lensch, Hendrik P.A.  
**Resolution and sensitivity of wafer-level multi-aperture cameras**  
*Journal of Electronic Imaging* 22 (2013) 1, 011001
- Ojeda, Jose; Beckert, Erik; Burkhardt, Thomas; Hornaff, Marcel; Kamm, Andreas  
**Experimental evaluation of the polarization crosstalk when soldering a polarization-maintaining fiber into a V-grooved substrate**  
*IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 3 (2013) 4, 543-548
- Oliva, Maria; Michaelis, Dirk; Fuchs, Frank; Tünnermann, Andreas; Zeitner, Uwe Detlef  
**Highly efficient broadband blazed grating in resonance domain**  
*Applied Physics Letters* 102 (2013) 20, 203114

Otto, Hans-Jürgen; Jansen, Florian; Stutzki, Fabian; Jauregui, Cesar; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

**Improved Modal Reconstruction for Spatially and Spectrally Resolved Imaging ( $S^2$ )**

Journal of Lightwave Technology 31 (2013) 8, 1295-1299

Otto, Hans-Jürgen; Jauregui, Cesar; Stutzki, Fabian; Jansen, Florian; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas

**Controlling mode instabilities by dynamic mode excitation with an acousto-optic deflector**

Optics Express 21 (2013) 14, 17285-17298

Pabst, Oliver; Perelaer, Jolke; Beckert, Erik; Schubert, Ulrich S.; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas

**All inkjet-printed piezoelectric polymer actuators: characterization and applications for micropumps in Lab-on-a-Chip systems**

Organic Electronics 14 (2013) 12, 3423-3429

Perez-Leija, A.; Soto-Eguibar, F.; Chavez-Cerda, S.; Szameit, A.; Moya-Cessa, H.; Christodoulides, D. N.

**Discrete-like diffraction dynamics in free space**

Opt. Express (2013) 21 (15), 17951—17960

Perez-Leija, A.; Hernandez-Herrejon, J. C.; Moya-Cessa, H.; Szameit, A.; Christodoulides, D. N.

**Generating photon encoded W states in multiport waveguide array systems**

Phys. Rev. A (2013) 87, 013842

Perez-Leija, A.; Keil, R.; Moya-Cessa, H.; Szameit, A.; Christodoulides, D. N.

**Perfect transfer of path-entangled photons in  $J(x)$  photonic lattices**

Phys. Rev. A (2013) 87 (2), 022303

Perez-Leija, Armando; Keil, Robert; Kay, Alastair; Moya-Cessa, Hector; Nolte, Stefan; Kwek, Leong-Chuan; Rodríguez-Lara, Blas M.; Szameit, Alexander; Christodoulides, Demetrios N.

**Coherent quantum transport in photonic lattices**

Physical Review A 87 (2013) 1, 012309

Präfke, Christiane; Schulz, Ulrike; Kaiser, Norbert; Tünnermann, Andreas

**Ultraviolet/visible and Fourier transform infrared spectroscopic investigations of organic-inorganic hybrid layers for UV protection**

Thin Solid Films 532 (2013), 113–118

Pupeza, Ioachim; Holzberger, Simon; Eidam, Tino; Carstens, Henning; Esser, Dominik; Weitenberg, Johannes; Rußbüldt, Peter; Rauschenberger, Jens; Limpert, Jens; Udem, Thomas; Tünnermann, Andreas; Hänsch, Theodor; Apolonski, Alexander A.; Krausz, Ferenc; Fill, Ernst

**Compact high-repetition-rate source of coherent 100 eV radiation**

Nature Photonics 7 (2013) 8, 608-612

Rechtsman, M. C.; Zeuner, J. M.; Plotnik, Y.; Lumer, Y.; Podolsky, D.; Dreisow, F.; Nolte, S.; Segev, M.; Szameit, A.

**Photonic Floquet topological insulators**

Nature (2013) 496 (7444), 196—200

Rechtsman, M. C.; Plotnik, Y.; Zeuner, J. M.; Szameit, A.; Segev, A.

**Topological creation and destruction of edge states in photonic graphene**

Phys. Rev. Lett. (2013) 111(10), 103901

Rechtsman, Mikael C.; Zeuner, Julia M.; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan; Segev, Mordechai; Szameit, Alexander

**Strain-induced pseudomagnetic field and photonic Landau levels in dielectric structures**

Nature Photonics 7 (2013) 2, 153–158

Reinlein, Claudia; Appelfelder, Michael; Gebhardt, Sylvia; Beckert, Erik; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas

**Thermomechanical design, hybrid fabrication, and testing of a MOEMS deformable mirror**

Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS 12 (2013) 1 013016

Reinlein, Claudia; Appelfelder, Michael; Goy, Matthias; Ludewigt, Klaus; Tünnermann, Andreas

**Performance of a thermal-piezoelectric deformable mirror under 6.2 kW continuous-wave operation**

Applied Optics 52 (2013) 34, 8363-8368

Richter, Daniel; Voigtländer, Christian; Krämer, Ria G.; Thomas, Jens; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

**Femtosecond laser pulse written Volume Bragg Gratings**

MATEC Web of Conferences 8 (2013) 06014

Richter, J.; Steinbrück, A.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.; Grange, R.

**Plasmonic Core-Shell Nanowires for Enhanced Second-Harmonic Generation**

Plasmonics (2013) 8 (1), 115--120

- Richter, Sören; Döring, Sven; Burmeister, Frank; Zimmermann, Felix; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan  
**Formation of periodic disruptions induced by heat accumulation of femtosecond laser pulses**  
Optics Express 21 (2013) 13, 15452-15463
- Richter, Sören; Miese, Christopher; Döring, Sven; Zimmermann, Felix; Withford, Michael J.; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan  
**Laser induced nanogratings beyond fused silica – periodic nanostructures in borosilicate glasses and ULE™**  
Optical Materials Express 3 (2013) 8, 1161-1166
- Richter, Sören; Zimmermann, Felix; Döring, Sven; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan  
**Ultrashort high repetition rate exposure of dielectric materials: laser bonding of glasses analyzed by micro-Raman spectroscopy**  
Applied Physics A: Materials Science & Processing 110 (2013) 1, 9-15
- Riedel, R.; Schulz, M.; Prandolini, M. J.; Hage, A.; Hoppner, H.; Gottschall, T.; Limpert, J.; Drescher, M.; Tavella, F.  
**Long-term stabilization of high power optical parametric chirped-pulse amplifiers**  
Opt. Express (2013) 21 (23), 28987-28999
- Rothhardt, Jan; Demmler, Stefan; Hädrich, Steffen; Peschel, Thomas; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas  
**Thermal effects in high average power optical parametric amplifiers**  
Optics Letters 38 (2013) 5, 763-765
- Savenko, Alexey Yu; Yildiz, Izzet; Petersen, Dirch Hjorth; Bøggild, Peter; Bartenwerfer, Malte; Krohs, Florian; Oliva, Maria; Harzendorf, Torsten  
**Ultra-high aspect ratio replaceable AFM tips using deformation-suppressed focused ion beam milling**  
Nanotechnology 24 (2013) 46, 465701
- Saviauk, Allar; Minardi, Stefano; Dreisow, Felix; Nolte, Stefan; Pertsch, Thomas  
**3D-integrated optics components for astronomical spectro-interferometry**  
Applied Optics 52 (2013) 19, 4556-4565
- Sergeyev, A.; Geiss, R.; Solntsev, A. S.; Steinbrück, A.; Schrepel, F.; Kley, E. B.; Pertsch, T.; Grange, R.  
**Second-harmonic generation in lithium niobate nano-wires for local fluorescence excitation**  
Opt. Express (2013) 21 (16), 19012-19021
- Setzpfandt, Frank; Falkner, Matthias; Pertsch, Thomas; Sohler, Wolfgang; Schiek, Roland  
**Bandstructure measurement in nonlinear optical waveguide arrays**  
Applied Physics Letters 102 (2013) 8, 081104
- Schmidt, Carsten; Chipouline, Arkadi; Käsebier, Thomas; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas; Pertsch, Thomas  
**Differential all-optical tuning of eigenmodes in coupled microdisks**  
Applied Physics Letters 103 (2013) 4, 041115
- Schmidt, Tobias D.; Setz, Daniel S.; Flämmich, Michael; Frisch-eisen, Jörg; Michaelis, Dirk; Mayr, Christian; Rausch, Andreas F.; Wehlius, Thomas; Scholz, Bert J.; Reusch, Thilo C.G.; Danz, Norbert; Brütting, Wolfgang  
**Comprehensive efficiency analysis of organic light-emitting diodes featuring emitter orientation and triplet-to-singlet up-conversion**  
Applied Physics Letters 103 (2013) 9, 093303
- Schröder, Sven; Trost, Marcus; Herffurth, Tobias; Finck, Alexander von; Duparré, Angela  
**Light scattering of interference coatings from the IR to the EUV spectral regions**  
Advanced Optical Technologies (2013) DOI: 10.1515/aot-2013-0048
- Schulz, Ulrike  
**Coating processes for plastic optics: A tutorial**  
Advanced Optical Technologies (2013) DOI: 10.1515/aot-2013-0049
- Schulz, Ulrike; Munzert, Peter; Rickelt, Friedrich; Kaiser, Norbert  
**Hybrid antireflective coating with plasma-etched nanostructure**  
Thin Solid Films 532 (2013), 119-122
- Schulz, Ulrike; Präfke, Christiane; Munzert, Peter; Ludwig, Henning; Rickelt, Friedrich; Kaiser, Norbert  
**Plasmaätzen organischer Schichten für die Entspiegelung optischer Oberflächen**  
mo Magazin für Oberflächentechnik (2013) 1-2, 14-17
- Sieler, Marcel; Fischer, Stephanie; Schreiber, Peter; Dannberg, Peter; Bräuer, Andreas  
**Microoptical array projectors for free-form screen applications**  
Optics Express 21 (2013) 23, 28702-28709

- Sinibaldi, Alberto; Rizzo, Riccardo; Figliozzi, Giovanni; Descrovi, Emiliano; Danz, Norbert; Munzert, Peter; Anopchenko, Aleksei S.; Michelotti, Francesco  
**A full ellipsometric approach to optical sensing with Bloch surface waves on photonic crystals**  
 Optics Express 21 (2013) 20, 23331-23344
- Steglich, Martin; Patzig, Christian; Berthold, Lutz; Schrempel, Frank; Fuchs, Kevin; Höche, Thomas; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas  
**Heteroepitaxial Ge-on-Si by DC magnetron sputtering**  
 AIP Advances 3 (2013) 7 072108
- Steglich, M.; Käsebier, T.; Höger, I.; Fuchs, K.; Tünnermann, A.; Kley, E.-B.  
**Black Silicon nanostructures on silicon thin films prepared by reactive ion etching**  
 Chin. Opt. Lett. (2013) 11, S10502
- Steglich, Martin; Zilk, Matthias; Bingel, Astrid; Patzig, Christian; Käsebier, Thomas; Schrempel, Frank; Kley, Ernst-Bernhard; Tünnermann, Andreas  
**A normal-incidence PtSi photoemissive detector with black silicon light trapping**  
 Journal of Applied Physics 114 (2013) 18, 183102
- Steglich, Martin; Zilk, Matthias; Schrempel, Frank; Tünnermann, Andreas; Kley, Ernst-Bernhard  
**Improvement of Ge-on-Si photodiodes by black silicon light trapping**  
 Applied Physics Letters 102 (2013) 11, 111110
- Stenzel, Olaf  
**The impact of the mass density on selected optical and non-optical properties of oxide coatings: A tutorial**  
 Advanced Optical Technologies (2013) DOI: 10.1515/aot-2013-0023
- Stenzel, Olaf; Wilbrandt, Steffen; Schlegel, Ralph; Böhme, Matthias; Kaiser, Norbert  
**Preparation and properties of high refractive index tantalum pentoxide coatings deposited by plasma ion assisted deposition with xenon or argon assistance**  
 Thin Solid Films 542 (2013), 295-299
- Stützer, S.; Kartashov, Y. V.; Vysloukh, V. A.; Konotop, V. V.; Nolte, S.; Torner, L.; Szameit, A.  
**Hybrid Bloch-Anderson localization of light**  
 Optics Letters (2013) 38 (9), 1488-1490
- Stützer, Simon; Kottos, Tsampikos; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan; Christodoulides, Demetrios N.; Szameit, Alexander  
**Superballistic growth of the variance of optical wave packets**  
 Optics Letters 38 (2013) 22, 4675-4678
- Stumpf, Daniela; Zeitner, Uwe Detlef  
**Extending standard mask lithography exposure technique to spherical surfaces**  
 Applied Physics B: Lasers and Optics (2013) DOI: 10.1007/s00340-013-5612-1
- Stutzki, Fabian; Jansen, Florian; Jauregui, Cesar; Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas  
**2.4 mJ, 33 W Q-switched Tm-doped fiber laser with near diffraction-limited beam quality**  
 Optics Letters 38 (2013) 2, 97-99
- Thomas, Jens; Hilbert, Vinzenz; Geiss, Reinhard; Pertsch, Thomas; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan  
**Quasi phase matching in femtosecond pulse volume structured x-cut lithium niobate**  
 Laser & Photonics Reviews 7 (2013) 3, L17-L20
- Tillmann, M.; Dakic, B.; Heilmann, R.; Nolte, S.; Szameit, A.; Walther, P.  
**Experimental boson sampling**  
 Nat. Photonics (2013) 7 (7), 540-544
- Trost, Marcus; Herffurth, Tobias; Schmitz, David; Schröder, Sven; Duparré, Angela; Tünnermann, Andreas  
**Evaluation of subsurface damage by light scattering techniques**  
 Applied Optics 52 (2013) 26, 6579-6588
- Trost, Marcus; Schröder, Sven; Duparré, Angela; Risse, Stefan; Feigl, Torsten; Zeitner, Uwe Detlef; Tünnermann, Andreas  
**Structured Mo/Si multilayers for IR-suppression in laser-produced EUV light sources**  
 Optics Express 21 (2013) 23, 27852-27864
- Tünnermann, Andreas  
**Laser Technology at Photonics West – A Key Enabler of Green Production**  
 Laser Technik Journal 1 (2013) 1, 1

Wagner, F.; João, C. P.; Fils, J.; Gottschall, T.; Hein, J.; Körner, J.; Limpert, J.; Roth, M.; Stöhlker, T.; Bagnoud, V.

**Temporal contrast control at the PHELIX petawatt laser facility by means of tunable sub-picosecond optical parametric amplification**

Appl. Phys. B-Lasers Opt. (2013) DOI 10.1007/s00340-013-5714-9

Weimann, S.; Xu, Y.; Keil, R.; Miroshnichenko, A. E.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Sukhorukov, A. A.; Szameit, A.; Kivshar, Y. S.

**Compact Surface Fano States Embedded in the Continuum of Waveguide Arrays**

Phys. Rev. Lett. (2013) 111 (24), 240403

Wiesendanger, S.; Zilk, M.; Pertsch, T.; Rockstuhl, C.; Lederer, F.

**Combining randomly textured surfaces and photonic crystals for the photon management in thin film micro-crystalline silicon solar cells**

Opt. Express (2013) 21 (9), A450--A459

Wiesendanger, S.; Zilk, M.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Rockstuhl, C.

**A path to implement optimized randomly textured surfaces for solar cells**

Appl. Phys. Lett. (2013) 103, 131115

Wilbrandt, Steffen; Böhme, Matthias; Stenzel, Olaf; Schlegel, Ralph; Kaiser, Norbert

**Spektralfotometrische Messungen bei 60° Einfallswinkel**  
Vakuum in Forschung und Praxis 25 (2013) 2, 42-47

Williams, R. J.; Kramer, R. G.; Nolte, S.; Withford, M. J.

**Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning technique**

Opt. Lett. (2013) 38 (11), 1918—1920

Williams, R. J.; Krämer, R. G.; Nolte, S.; Withford, M. J.; Steel M. J.

**Detuning in apodized point-by-point fiber Bragg gratings: insights into the grating morphology**

Opt. Express (2013) 21(22), 26854

Willis, Christina C.; McKee, Erik; Böswetter, Pascal; Sincore, Alex; Thomas, Jens; Voigtländer, Christian; Krämer, Ria G.; Bradford, Joshua D.; Shah, Lawrence; Nolte, Stefan; Tünnermann, Andreas; Richardson, Martin

**Highly polarized all-fiber thulium laser with femtosecond-laser-written fiber Bragg gratings**

Optics Express 21 (2013) 9, 10467-10474

Won, R.; Segev, M.; Rechtsman, M.; Szameit, A.; Zeuner, J.

**Can strain magnetize light?**

Nat. Photonics (2013) 7 (2), 160

Zeil, P.; Voigtlander, C.; Thomas, J.; Richter, D.; Nolte, S.

**Femtosecond laser-induced apodized Bragg grating waveguides**

Opt. Lett. (2013) 38 (13), 2354—2356

Zhang, Hao; Li, Lei; McCray, David L.; Scheiding, Sebastian; Naples, Neil J.; Gebhardt, Andreas; Risse, Stefan; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas; Yi, Allen Y.

**Development of a low cost high precision three-layer 3D artificial compound eye**

Optics Express 21 (2013) 19, 22232-22245

Zhang, Hao; Scheiding, Sebastian; Li, Lei; Gebhardt, Andreas; Risse, Stefan; Eberhardt, Ramona; Tünnermann, Andreas; Yi, Allen Y.

**Manufacturing of a precision 3D microlens array on a steep curved substrate by injection molding process**

Advanced Optical Technologies 2 (2013) 3, 257-268

Zimmermann, Felix; Richter, Sören; Döring, Sven; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

**Ultrastable bonding of glass with femtosecond laser bursts**

Applied Optics 52 (2013) 6, 1149-1154

Zimmermann, Felix; Plech, Anton; Richter, Sören; Döring, Sven; Tünnermann, Andreas; Nolte, Stefan

**Structural evolution of nanopores and cracks as fundamental constituents of ultrashort pulse-induced nanogratings**

Applied Physics A: Materials Science & Processing (2013) DOI: 10.1007/s00339-013-8093-5

Zwick, Susanne; Heist, Stefan; Franzl, Yannick; Steinkopf, Ralf; Kühmstedt, Peter; Notni, Gunther

**Wide-band phase-shifting fringe projector on the basis of a tailored free-form mirror**

Optical Engineering 52 (2013) 2, 023001

Zwick, Susanne; Heist, Stefan; Steinkopf, Ralf; Huber, Sandra; Krause, Sylvio; Bräuer-Burchardt, Christian; Kühmstedt, Peter; Notni, Gunther

**3D phase-shifting fringe projection system on the basis of a tailored free-form mirror**

Applied Optics 52 (2013) 14, 3134-3146

LASER  
World of  
PHOTONICS

OPTISCHE  
TECHNO-  
LOGIEN  
FORUM

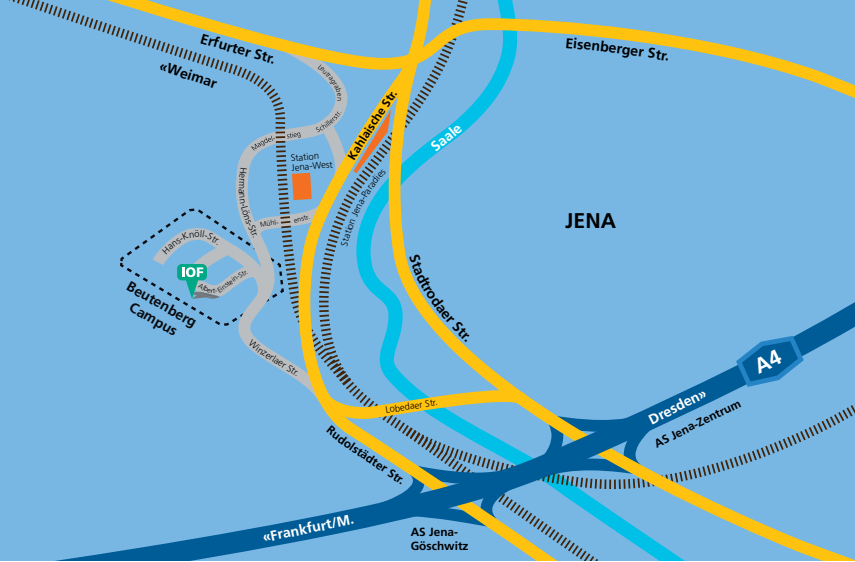
## ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN ONLINE | ADDITIONAL INFORMATION ONLINE

Im Jahr 2013 haben die Mitarbeiter des Fraunhofer IOF 288 Vorträge auf Konferenzen oder Workshops gehalten. Die vollständige Liste ist im Internet unter [www.iof.fraunhofer.de](http://www.iof.fraunhofer.de) abrufbar.

*In 2013, the employees of the Fraunhofer IOF had given 288 presentations at conferences or workshops. The full list is on the internet at [www.iof.fraunhofer.de](http://www.iof.fraunhofer.de) available.*



# DER WEG ZU UNS HOW TO REACH US



## **Bahn/Busverbindung**

Wenn Sie am Bahnhof Jena Paradies ankommen (aus Richtung Berlin/Leipzig oder München), laufen sie bitte ca. 5 min Richtung Innenstadt. An der Haltestelle »Teichgraben« nehmen Sie einen Bus der Linien 10, 11, 12 oder 13. Steigen Sie an der Haltestelle »Beutenberg Campus« aus. Folgen Sie der Ausschilderung »Fraunhofer IOF« (ca. 3 min Fußweg).

Ab dem Bahnhof Jena West (aus Richtung Frankfurt/Erfurt oder Gera) gehen Sie zur Haltestelle »Westbahnhofstraße« (ca. 2 min Fußweg: Verlassen Sie den Bahnhof Richtung Zentrum, gehen Sie links, parallel zur Bahnstrecke, bergab Richtung Westbahnhofstraße, überqueren sie diese und gehen sie unter der Bahnbrücke hindurch zur Bushaltestelle). Dort nutzen sie eine Busverbindungen stadtauswärts (10, 11, 12, 13) bis zur Haltestelle »Beutenberg Campus«.

## **Auto**

Fahren Sie auf der Autobahn A4 bis Abfahrt Jena-Göschwitz. Biegen sie auf die Rudolstädter Strasse stadteinwärts, nach ca. 4,3 km links abbiegen in Richtung Winzerla. Folgen Sie der Ausschilderung »Fachhochschule – Beutenberg Campus«. Benutzen Sie die Einfahrt Beutenberg Campus Nord und folgen Sie dann der Ausschilderung »Fraunhofer IOF«.

## **Flugzeug**

Ab Flughafen Leipzig/Halle auf der Autobahn A9 nach Süden bis zum Hermsdorfer Kreuz und dann auf die A4 Richtung Frankfurt wechseln; diese dann bei Jena-Göschwitz verlassen, weiter siehe Auto. Oder ab Flughafen Erfurt auf der Autobahn A4 Richtung Dresden bis Abfahrt Jena-Göschwitz.

## **By train**

If you arrive at the railway station Jena Paradies (from Berlin/Leipzig or Munich) approx. 5 min footpaths in the direction of city center. At the bus stop "Teichgraben" take a coach of the lines 10,11, 12, or 13. Step off at the stop Beutenberg Campus" and follow the signs "Fraunhofer IOF" (approx. 3 min footpaths).

From the railway station Jena West (from Frankfurt/Erfurt or Gera) approx. 2 min footpath to the bus stop "Westbahnhofstrasse" (when you leave the railway station, go to the left and follow the Westbahnhofstraße parallel to the tracks, cross at their end the main street, pass under the railroad bridge to the bus stop), take the bus connections to the stop "Beutenberg Campus".

## **By car**

Leave the A4 motorway at the exit Jena-Göschwitz, follow the Rudolstädter Strasse into town, after about 4.3 km turn off left toward Winzerla and follow the signs "Fachhochschule - Beutenberg Campus". On the left side you will see the Fraunhofer IOF. Use the property entrance „Beutenberg Campus Nord" to the left and follow the signs to "Fraunhofer IOF".

## **By airplane**

Starting from airport Leipzig/ Halle on the A9 motorway to the south (direction Munich) up to the Hermsdorfer Kreuz. Here you have to change the motorway, follow the A4 motorway westward (direction Frankfurt) and leave it at the exit Jena-Göschwitz., further see car. Or starting from airport Erfurt on the A4 motorway direction Dresden to exit Jena-Göschwitz



# IMPRESSUM IMPRINT

## **Herausgeber | Editor**

Fraunhofer-Institut für  
Angewandte Optik und Feinmechanik IOF  
Albert-Einstein-Straße 7  
07745 Jena  
Telefon +49 3641 807-0  
info@iof.fraunhofer.de  
www.iof.fraunhofer.de

## **Institutsleiter | Director**

Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
Telefon +49 3641 807-201  
andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de

## **Redaktion | Editorial staff**

Dr. Kevin Füchsel  
Dr. Stefan Riehemann  
Sylvia Bathke

## **Redaktionsschluss | Editorial deadline**

02.04.2014

## **Gestaltung | Graphic design**

Walter Oppel  
Christian Süß

## **Druck | Print**

SDC Satz+Druck Centrum Saalfeld GmbH  
Am Cröstener Weg 4  
07318 Saalfeld  
www.druckerei-saalfeld.de

## **Bildnachweis | Photo Acknowledgements**

Seite | page 16: © Deutscher Zukunftspreis / Ansgar Pudenz