



**Fraunhofer**

IOF

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE OPTIK UND FEINMECHANIK IOF

**JAHRESBERICHT  
ANNUAL REPORT  
2011**



**GREEN PHOTONICS ...**

**... LÖSUNGEN MIT LICHT**

**JAHRESBERICHT  
ANNUAL REPORT  
2011**

# LÖSUNGEN MIT LICHT SOLUTIONS WITH LIGHT

»Die deutsche Optik- und Photonik-Industrie hat nach der Finanz- und Wirtschaftskrise die Trendwende geschafft«, vermeldete der Fachverband SPECTARIS bereits im letzten Sommer. Maßgeblich für das Wachstum ist der weiterhin starke Export, welcher die Konkurrenzfähigkeit deutscher Produkte eindrucksvoll belegt. So blicken die Unternehmen derzeit optimistisch auf das Jahr 2012. Insbesondere die Lasertechnik mit dem Marktsegment Lasermaterialbearbeitung hat sich als Wachstumsmotor für die gesamte Branche erwiesen. Der Laser ist heute unverzichtbares Werkzeug in der energie- und ressourceneffizienten »grünen« Produktion; mit Wirkungsgraden von nahezu 30 Prozent erobert er hier immer neue Anwendungsfelder und ersetzt zunehmend konventionelle Werkzeugmaschinen. Insbesondere der Markt für faser- und scheibenbasierte Ultrakurzpulslasersysteme entwickelt sich infolge ihres spezifischen schädigungsarmen Materialabtrags sehr dynamisch. Gemeinsam mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena hat das Fraunhofer IOF in den letzten Jahren entscheidend zur Einführung dieser neuen Fertigungstechnologie beigetragen. Durch die Leistungsskalierung von faserbasierten Ultrakurzpulslasersystemen bis in den kW-Bereich bei gleichzeitiger Verringerung der Komplexität der Systeme konnte der Weg in die industrielle Anwendung geebnet werden.

Schlüsselkomponente dieser Ultrakurzpulslaser bildet ein Selten-Erd-dotierter Lichtwellenleiter. Um dessen Entwicklung eigenständig vorantreiben zu können, hat das Fraunhofer IOF in Kooperation mit dem IPHT Jena in 2011 eine Arbeitsgruppe Fasertechnologie gegründet, die wesentliche Kompetenzen in Deutschland auf diesem Gebiet zentral zusammenführt.

Auf der Grundlage dieser strategischen Zusammenarbeit werden nun alle Arbeitsschritte zur Entwicklung und Fertigung von Spezialfasern ausgehend, vom Design angepasster aktiver Wellenleiterstrukturen, über die Glaschemie zur Herstellung der sogenannten Preform und das Ausziehen der Lichtwellenleiter

“The German optical and photonics industry has turned the corner after the global financial crisis”, reported the SPECTARIS Professional Association last summer. The factor driving growth remains strong exports, which provide impressive proof of the competitiveness of German products. Consequently, companies are currently looking optimistically to the year 2012. Laser technology in particular, with the market segment of laser material machining, has proven to be a locomotive of growth for the industry as a whole. Today, the laser is an essential tool in energy and resource-efficient “green” production; with efficiency levels of almost 30 percent, it is conquering more and more new applications, and increasingly coming to replace conventional machine tools. The market for fiber and disk-based ultra-short pulse laser systems in particular is developing in a very dynamic way due to its specific material removal with low levels of degradation. Together with the Institute for Applied Physics at the Friedrich Schiller University Jena, Fraunhofer IOF has made a decisive contribution to introducing this new production technology over the past few years. Performance scaling of fiber-based ultra-short pulse laser systems up to the kW range at the same time as reducing system complexity has made for a smoother transition into industrial applications.

A light waveguide incorporating rare earth metals represents a key component of this ultra-short pulse laser. Fraunhofer IOF cooperated with the Institute of Photonic Technology (IPHT) in Jena in 2011 to establish a working group for fiber technology in order to push ahead with development of this technology independently; the working group combines and centralizes the most important skills available in Germany in this field.

On the basis of this strategic cooperation, all working steps for developing and producing special fibers will take place in one location, starting from the design of appropriate active waveguide structures and extending to glass chemistry for



bis hin zu deren Konfektionierung an einem Ort beherrscht. Partner dieser Aktivität sind neben der Friedrich-Schiller-Universität Unternehmen der deutschen laserherstellenden Industrie.

Nachdem mehr als sechs Jahre seit den ersten Planungsrounds zum Projekt »Erweiterungsbau Fraunhofer IOF« vergangen sind, konnten im Oktober 2011 etwa 2150 m<sup>2</sup> modernste Labor- und Büroflächen in Betrieb genommen werden. Besonderer Wert wurde beim Bauvorhaben auf die Energieeffizienz in der Nutzung gelegt. So wurde beispielsweise die Beleuchtung im Rahmen eines Pilotprojekts unter Leitung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung in moderner LED-Technik ausgeführt. In den neuen Flächen werden unter anderem Forschungsarbeiten auf dem Gebiet »Green Photonics« durchgeführt. In Kooperation mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft werden hier Lösungen mit Licht für die Zukunftsfelder Energie und Umwelt entwickelt. Beispiele für Forschungsarbeiten sind die Entwicklung hocheffizienter Solarzellen oder der Aufbau von optischen Instrumenten für Erdbeobachtungssatelliten.

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 mitzuarbeiten – Lösungen mit Licht.

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

manufacturing the preform and drawing the light waveguide as well as preparing it for connection. The partners in this activity include companies from the German laser manufacturing industry alongside the Friedrich Schiller University.

More than six years have passed since the first planning rounds for the project to build an extension at Fraunhofer IOF, and these ultra-modern laboratories and offices covering about 2150 m<sup>2</sup> opened for use in October 2011. Particular emphasis was placed on energy efficiency in use during the expansion. For example, the lighting was configured using modern LED technology as part of a pilot project managed by the German Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development. The new facility will be used for research work in the area of "Green Photonics", amongst others. Solutions with light will be developed here for the future fields of energy and the environment, in cooperation with partners from business and science. Examples of research work include the development of high-efficiency solar cells or setting up optical instruments for earth observation satellites.

I would like to express my gratitude to our partners in industry and science for the excellent cooperation we have enjoyed, and also the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), the Ministries for Education, Culture and Science as well as Economy, Labor and Technology in Thuringia as well as the German Research Foundation (DFG) for their continuous support. I would particularly like to thank and pay tribute to my co-workers for the commitment they have shown. Your outstanding performance has made it possible for us to cooperate on solutions for socially relevant issues – solutions with light.

# INHALT

<b>Das Institut im Profil .....</b>	<b>7</b>
<b>Highlights 2011 .....</b>	<b>17</b>
<b>Ausgewählte Ergebnisse 2011 .....</b>	<b>31</b>
<b>ENERGIE UND UMWELT .....</b>	<b>33</b>
Optisches Breitbandmonitoring im industriellen Beschichtungsumfeld .....	34
Miniaturisierte Sensoren mit bidirektionalen Bauelementen .....	36
3D-Schneidkantenvermessung von Präzisionsschneidwerkzeugen .....	40
Anwendungsorientierte Benetzungsanalyse hydrophober Oberflächen .....	42
Geometrieanalyse mechanischer Systeme mittels Computertomographie .....	46
Effizientere OLEDs durch orientierte Triplett Emitter .....	50
Deformierbare Multilayer-Spiegel mit parallelen Fertigungstechnologien.....	52
Beugungsbegrenztes IR-Spiegelteleskop mit smartem Montageansatz.....	56
Ultrapräzise Spiegel mit einer amorphen Siliziumschicht .....	60
<b>INFORMATION UND SICHERHEIT .....</b>	<b>65</b>
Aluminiumbasierte Reflektoren für das DUV und VUV .....	66
Reflexionsoptiken für die nächste Lithographiegeneration .....	68
LED-Array-Projektor »LICHTKACHEL«.....	70
Facetvision – Insekteninspirierte abbildende optische Systeme .....	74
Spektrale Strahlkombination von vier Hochleistungsfaserverstärkern .....	78
Elektrostatische Chucks für die Lithographie mit 450 mm Wafern .....	80
Lichtausbreitung in photonischen Kristallen aus Lithiumniobat .....	82
Hocheffiziente EUV- und Röntgengitter zur Plasma-Analyse.....	84
<b>TECHNOLOGIE.....</b>	<b>87</b>
Strukturierbare reflexionsgeminderte Chromschichten.....	88
Kunststoffbeschichtung unter industriellen Bedingungen .....	90
Arrayhafte Masterstrukturen für UV-Replikation mittels Step & Repeat-Prozess .....	92
Integrierte Mikro-Interferometer Arrays für parallele MEMS-Inspektion .....	94
Silikatisches und direktes Bonden: Hochwertige Fügetechnologien für Glas .....	96
<b>GRUNDLAGEN.....</b>	<b>99</b>
Universelle Streulichtmodellierung glatter bis strukturierter Oberflächen .....	100
Erzeugung hoher Gasharmonischer bei hohen Pulsfolgefrequenzen .....	104
Design grundmodiger aktiv dotierter Großkernfasern.....	106
Komplexe Phasenelemente auf Basis fs laserinduzierter Nanogitter .....	108
3-Dimensionales chirales Metamaterial mit sehr hoher optischer Aktivität.....	112
<b>Das Fraunhofer IOF in Netzwerken .....</b>	<b>115</b>
<b>Namen, Daten, Ereignisse.....</b>	<b>122</b>

# CONTENT

<b>Profile of the Institute .....</b>	<b>7</b>
<b>Highlights 2011 .....</b>	<b>17</b>
<b>Selected results 2011 .....</b>	<b>31</b>
ENERGY AND ENVIRONMENT .....	33
Optical broadband monitoring in an industrial production environment.....	34
Miniaturization of sensors using bi-directional devices .....	36
3D measurement of cutting edges on precision cutting tools.....	40
Applied wetting analysis of hydrophobic surfaces.....	42
Dimensional analysis of high precision systems using computed tomography.....	46
OLED efficiency enhancement by oriented triplet emitters .....	50
Multilayer deformable mirrors based on wafer-level manufacturing .....	52
“Snap-Together” system assembly of a mirror based IR Telescope.....	56
Ultra-precise mirrors with amorphous silicon layer .....	60
INFORMATION AND SAFETY.....	65
Aluminium reflectors for the DUV and VUV.....	66
Reflective optics for the next generation of lithography.....	68
High-flux LED array projector “Light Tile” .....	70
Facetvision – Insect inspired optical imaging systems .....	74
High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers .....	78
Electrostatic chucks for next generation lithography with 450 mm wafers .....	80
Light propagation in lithium niobate photonic crystals.....	82
Highly efficient EUV and X-ray gratings for plasma diagnostics .....	84
TECHNOLOGY .....	87
Structurable chromium coatings with reduced reflectance .....	88
Coating of polymers under industrial conditions.....	90
Array-like master structures for UV-replication using the step & repeat process .....	92
Integrated micro-interferometer arrays for parallel MEMS-Testing.....	94
Silicate and direct bonding: premium joining technologies for glass.....	96
BASIC RESEARCH .....	99
Universal light scatter modeling of smooth to structured surfaces.....	100
High harmonic generation at high repetition rate .....	104
Designing actively doped large mode area fibers .....	106
Advanced phase elements based on fs laser induced nanogratings.....	108
Three-dimensional chiral metamaterial with giant optical activity.....	112
<b>The Fraunhofer IOF in networks .....</b>	<b>115</b>
<b>Names, dates, activities .....</b>	<b>122</b>







# DAS INSTITUT IM PROFIL

## PROFILE OF THE INSTITUTE

### Lösungen mit Licht

Das Fraunhofer IOF betreibt anwendungsorientierte Forschung auf dem Gebiet der optischen Systemtechnik im direkten Auftrag der Industrie und im Rahmen von öffentlich geförderten Verbundprojekten. Ziel ist die Entwicklung innovativer optischer Systeme zur Kontrolle von Licht von der Erzeugung bis hin zur Anwendung in den Zukunftsfeldern Energie und Umwelt, Information und Kommunikation, Gesundheit und Medizintechnik, Sicherheit und Mobilität. Eine besondere Rolle spielt dabei die nachhaltige Nutzung von Licht – »Green Photonics« im Rahmen des Fraunhofer-Innovationsclusters. Zum Erreichen dieser Zielstellungen bildet das Fraunhofer IOF die gesamte Prozesskette vom Systemdesign bis zur Fertigung von Prototypen optischer, opto-mechanischer und opto-elektronischer Systeme ab. Von strategischer Bedeutung ist die enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU-IAP) insbesondere in der Erarbeitung des wissenschaftlichen Vorlaufs sowie in der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Aufbauend auf unserem Kompetenzportfolio adressieren wir die folgenden Märkte:

- Energie- und Umwelttechnik
- Beleuchtungs- und Lichttechnik
- Kommunikations- und Informationstechnik
- Sicherheitstechnik
- Medizintechnik und Life Science
- Luftfahrt, Raumfahrt- und Astrotechnik
- Automobiltechnik
- Produktionstechnik

Das strategische Thema, welches 2011 mit Unterstützung von Fördermaßnahmen des BMBF und des Freistaats Thüringen intensiviert werden konnte, ist der energieeffiziente Einsatz sowie die ressourcenschonende Produktion optischer Komponenten und Systeme.

### Solutions with light

Fraunhofer IOF conducts application-oriented research in the field of optical system technology directly for industry and as part of public funded joint projects. The objective is to develop innovative optical systems to control light from its creation through to application in the future fields of energy and environment, information and communication, health and medical technology, safety and mobility. The sustainable use of light – “Green Photonics” as part of the Fraunhofer innovation cluster plays a special role in this. In order to achieve these objectives, Fraunhofer IOF offers the entire process chain from system design through to production of prototypes for optical, opto-mechanical and opto-electronic systems. Close cooperation with the Institute for Applied Physics at the Friedrich Schiller University Jena (FSU-IAP) is of strategic importance, in particular in working out the scientific preparations as well as training young scientists.

Based on our portfolio of skills, we address the following markets:

- Energy and environmental technology
- Lighting and light technology
- Communication and information technology
- Safety technology
- Medical technology and life sciences
- Aviation, spaceflight and astroengineering
- Automotive engineering
- Production technology

The strategic topic which was able to be worked on more intensively in 2011 with the support of sponsorship from the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and the Free State of Thuringia, concerns the energy-efficient use of optical components and systems as well as their production with reduced use of resources.

### **Funktionale optische Oberflächen und Schichten**

Mit optischen Schichten werden Oberflächen für vielseitige Anforderungen maßgeschneidert. Das Fraunhofer IOF entwickelt Oberflächenfunktionalisierungen und multifunktionale optische Schichtsysteme auf Kunststoff, Glas, Keramik und Metall für Wellenlängen von Extrem-Ultraviolett bis Infrarot.

### **Mikro- und Nanooptik**

Das Fraunhofer IOF entwickelt mikro- und nanooptische Komponenten und Systeme wie refraktive und diffraktive miniaturisierte Optiken, dielektrische und metallische Gitter, computergenerierte Hologramme, photonische Kristalle und Metamaterialien für Anwendungen in der Beleuchtung, Projektion, Informations-, Laser-, Energie- und Messtechnik.

### **Laser**

Optische Fasern und Wellenleiter sind wesentliche Komponenten in photonischen Systemen. Insbesondere aktive Fasern ermöglichen neuartige Lichtquellen mit extremen optischen Parametern. Dabei spielen neuartige Faserdesigns, Faserkonzepte und Faserkoppler eine entscheidende Rolle. Auf dieser Basis werden Lasersysteme (insbesondere Faserlaser) mit unterschiedlichen Wellenlängen, ultrakurzen Pulsen und Leistungen bis in den Multikilowatt-Bereich entwickelt.

### **Bildgebung und Beleuchtung**

Moderne optische Systeme, z. B. aus den Bereichen Beleuchtung und Abbildung, erfordern angepasste und höchst effiziente Lösungen. Das Fraunhofer IOF entwickelt Beleuchtungs- und Strahlführungssysteme für Laser, LED und OLED sowie miniaturisierte digitale Projektionssysteme und hochkompakte abbildende Systeme.

### **Functional optical surfaces and coatings**

Optical coatings make surfaces ideal for a variety of requirements. Fraunhofer IOF is developing surface functionalizations and multifunctional optical coating systems on plastic, glass, ceramics and metal for wavelengths ranging from the extreme ultraviolet through to infrared.

### **Micro and nano-optics**

Fraunhofer IOF is developing micro and nano-optical components and systems such as refractive and diffractive miniaturized lenses, dielectric and metallic gratings, computer-generated holograms, photonic crystals and metamaterials for applications in lighting, projection, information, laser, energy and metrology.

### **Laser**

Optical fibers and waveguides are important components in photonic systems. Active fibers in particular permit innovative light sources to be made with extreme optical parameters. Innovative fiber designs, fiber concepts and fiber couplers play an important role in this. On this basis, laser systems (especially fiber lasers) are being developed with different wavelengths, ultra-short pulses and power levels up to the multi-kilowatt range.

### **Imaging and lighting**

Modern optical systems such as those used in the areas of lighting and imaging require adapted and ultra high-efficiency solutions. Fraunhofer IOF is developing lighting and beam guidance systems for lasers, LEDs and OLEDs as well as miniaturized digital projection systems and highly compact imaging systems.

# GESCHÄFTSFELDER BUSINESS UNITS

## **Feinmechanische Komponenten und Systeme**

Schwerpunkte von Forschung und Entwicklung sind Konstruktion und Simulation, Herstellung und Montage von Baugruppen der Optik und Feinmechanik. Hierbei werden Elemente der technischen Optik und Mechanik, der Werkstoff- und Füge-technik, der Messtechnik und der Softwareentwicklung eingesetzt. Am Institut steht hierfür hochmoderne Infrastruktur zur Verfügung. Die Arbeiten gehen von grundlegenden Analysen bis zum Bau von Vorrichtungen und Sondermaschinen.

## **Optische Komponenten und Systeme**

Die gesamte Prozesskette vom Design optischer Komponenten und Systeme über die Fertigung bis hin zur Systemintegration wird beherrscht. Auf dieser Basis werden zum Beispiel miniaturisierte bildgebende Systeme, Wafer- und Masken-Chucks für Lithographie, Spiegelsysteme für Astronomie, Luft- und Raumfahrt, sowie 3D-Messsysteme für Qualitätssicherung und Kriminalistik entwickelt. Es werden optische Komponenten und Systeme für den gesamten Spektralbereich von EUV bis THz realisiert.

## **Optik extremer Wellenlängen**

Ob Terahertz-Spektroskopie oder Röntgenmikroskopie, extrem lange und extrem kurze Wellenlängenbereiche werden zunehmend für die Anwendung erschlossen. Das Leistungsangebot des Fraunhofer IOF reicht dabei von optischen Komponenten und Systemen für die THz-Bildgebung bis hin zu Optiken für den EUV-Bereich und den weichen Röntgenbereich.

## **Photonische Sensoren und Messsysteme**

Licht als Präzisionsinstrument eröffnet der Messtechnik, Sensorik und Analytik eine Vielzahl an Möglichkeiten. Das Fraunhofer IOF entwickelt verschiedene optische und opto-elektronische Mess- und Sensorsysteme. Das Spektrum reicht von der prozess-integrierten Qualitätssicherung und 3D-Formvermessung über die Oberflächencharakterisierung bis hin zur THz-Spektroskopie.

## **Components and systems for precision mechanics**

The main aspects of research and development involve design and simulation, manufacture and assembly of modules for optics and precision mechanics. Elements from technical optics and mechanics, material and joining technology, measuring technology and software development are used in this case. The Institute provides a highly modern infrastructure for this purpose. The work ranges from fundamental analyses through to building of fixtures and special machinery.

## **Optical components and systems**

The entire process chain is mastered, from the design of optical components and systems through to production and system integration. On this basis, for example, miniaturized imaging systems, wafer and mask chucks for lithography, mirror systems for astronomy, aviation and spaceflight as well as 3D measuring systems for quality assurance and criminalistics are being developed. Optical components and systems are being implemented for the entire spectrum from EUV through to THz.

## **Optics of extreme wavelengths**

Whether terahertz spectroscopy or X-ray microscopy, extremely long and extremely short wavelength ranges are being opened up to an increasing extent for application. The range of products and services from Fraunhofer IOF extends from optical components and systems for THz imaging through to optics for EUV and soft X-ray range.

## **Photonic sensors and measuring systems**

Light as a precision instrument opens up a variety of possibilities in measuring technology, sensor and analysis systems. Fraunhofer IOF is developing various optical and optoelectronic measuring and sensor systems. The spectrum ranges from process-integrated quality assurance and 3D shape measuring through to surface characterization and even THz spectroscopy.

### **Design und Simulation**

Zentrale Kompetenz und Basis aller Entwicklungen am Fraunhofer IOF sind Optik- und Mechanik-Design sowie die Simulation und Analyse optischer und opto-mechanischer Systeme einschließlich thermischer und thermo-optischer Effekte. Umfangreiche Design- und Modellierungswerkzeuge und aufgabenspezifische add-ons erlauben die Simulation und Optimierung von Systemen für den THz- bis zum Röntgenbereich – von Mikrooptiken bis hin zu astronomischen Teleskopen.

### **Mikro- und Nanostrukturierung**

Die Erzeugung und Replikation optischer Mikro- und Nanostrukturen ist Grundlage für moderne komplexe optische Systeme. Die am Institut vorhandene technologische Basis, wie z. B. Photo- und Laserlithographie, Elektronenstrahlolithographie und reaktives Ionenätzen, 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 neuer Materialien für Optik und Photonik, wie bspw. photonische Kristalle und Metamaterialien. Dies erfolgt im Zentrum für Innovationskompetenz »ultra optics®«. Anwendungen liegen in den Bereichen Bildgebung, ultra-kompakte Lichtquellen, Nanomikroskopie und optische Nanomanipulation.

### **Beschichtung und Oberflächenfunktionalisierung**

Funktionale Beschichtungen und Oberflächen sind wesentlicher Bestandteil optischer Systeme. Umfangreiche Kompetenzen bestehen im Design optischer Schichtsysteme, in der Entwicklung von Beschichtungsverfahren für unterschiedliche Anwendungen und in der Charakterisierung von Oberflächen und Schichten. Hervorzuheben sind hochreflektierende Schichtsysteme für Optiken im EUV- und im Röntgenbereich sowie die Funktionalisierung von Kunststoffoberflächen.

### **Design and simulation**

The central area of competence and the foundation for all developments at Fraunhofer IOF involve optical and mechanical design as well as simulation and analysis of optical and opto-mechanical systems, including thermal and thermo-optic effects. Extensive design and modeling tools as well as task-specific add-ons allow systems to be simulated and optimized for the THz to the X-ray range – from micro-lenses through to astronomical telescopes.

### **Micro and nano-structuring**

Generating and replicating optical micro and nano-structures are fundamental for modern, complex optical systems. The available technological base at the institute, such as photo and laser lithography, electron beam lithography and reactive ion etching, allows production and characterization of high-end micro and nano-optical elements with the highest possible resolution on substrates up to 12 inches.

### **Materials in optics and photonics**

Nano-structure technology permits the development of new materials for optics and photonics such as photonic crystals and metamaterials. Research into these materials is conducted in the "ultra optics®" Center for Innovation Competence. Applications are in the areas of imaging, ultra-compact light sources, nano-microscopy and optical nano-manipulation.

### **Coating and surface functionalization**

Functional coatings and surfaces are important components of optical systems. Extensive expertise is in place in the design of optical coating systems, development of coating processes for different applications and the characterization of surfaces and coatings. Highly reflective coating systems for lenses in the EUV and X-ray ranges should be emphasized, as should functionalization of plastic surfaces.

# KOMPETENZFELDER AREAS OF COMPETENCE

## **Diamant- und laserbasierte Ultrapräzisionsbearbeitung**

Mit ultrapräzisen Fertigungstechnologien wie Einkorn-Diamantdrehen, Flycutting, Mikrofräsen und Hobeln werden Metalloptiken, Kunststoffoptiken, Mikrostrukturen sowie Abformwerkzeuge für Präzisionsreplika in optischer Qualität gefertigt. Für 500 cm<sup>2</sup> große asphärische Metallspiegel werden Formabweichungen < 18 nm und Mikrorauheiten < 1 nm erreicht. Darüber hinaus werden Ultrakurzpuls Laser zur hochpräzisen Strukturierung verschiedenster Materialien entwickelt.

## **Mikromontage und Systemintegration**

Das Fraunhofer IOF besitzt umfangreiches Know-how in der Entwicklung von Technologien zur hybriden Integration unterschiedlicher Komponenten mit hoher Präzision für den Aufbau komplexer opto-mechanischer und opto-elektronischer Mikro- und Makrosysteme. Dieses umfasst Montagetechnologien (Positionieren, Justieren), Fügetechnologien (Kleben, Laserlöten, Plasmabonding, Laserspleißen, Justierdrehen) und Integration optischer Systeme für Weltraumanwendungen.

## **Laserentwicklung und nichtlineare Optik**

Für die Entwicklung von Hochleistungs-Faserlasern mit beugungsbegrenzter Strahlqualität bestehen am Fraunhofer IOF Kompetenzen in Faserdesign, Optikdesign und Thermooptik, 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 Subnanobereich sowie die 3D-Formfassung. Darüber hinaus werden Systeme zur räumlichen Identifikation von Substanzen mittels THz-Tomographie entwickelt.

## **Diamond and laser-based ultra-precision machining**

Using ultra-precise production technologies such as singlepoint diamond turning, fly cutting, micro-milling and planing, metal optics, plastic optics, microstructures and molding tools for precision replicas are manufactured in optical quality. Deviations in form < 18 nm and micro-roughness < 1 nm are achieved for aspherical metal mirrors 500 cm<sup>2</sup> large. Moreover ultrashort pulse lasers for highly-precise structuring of a wide range of materials are developed.

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

Fraunhofer IOF possesses extensive expertise in developing technologies for hybrid integration of various components with high precision, for setting up complex opto-mechanical and opto-electronic micro and macro-systems. This includes assembly technologies (positioning, alignment) joining technologies (adhesive bonding, laser soldering, plasma bonding, laser splicing, alignment turning) and the integration of optical systems for space applications.

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

Fraunhofer IOF possesses expertise in fiber design, optics design and thermo-optics, in assembly and joining technology for fiber lasers and in developing efficient fiber couplers and beam guidance systems for developing high-performance fiber lasers with diffraction-limited beam quality.

## **Measuring processes and characterization**

Fraunhofer IOF develops optical measuring processes and systems based on customer-specific requirements. Work focuses on characterizing optical and non-optical surfaces, coatings, components and systems in the micro and sub-nano ranges as well as 3D shape. Moreover THz tomography systems are developed for spatial identification of substances.



# ORGANISATION ORGANIZATION



 <b>Director</b> Prof. Dr. Andreas Tünnermann	 <b>Deputy Director</b> Prof. Dr. Norbert Kaiser	 <b>Assistance</b> Susan Oxfart Dipl.-Betriebsw. (FH)	 <b>Assistance</b> Adlin Bruns Dipl.-Betriebsw. (FH)	 <b>Strategic Controlling</b> Elke Heuer Dipl.-Oec.
---	--	--	---	--

 <b>Optical Coatings</b> Prof. Dr. Norbert Kaiser	 <b>Optical Systems</b> Dr. Gunther Notni	 <b>Microoptical Systems</b> Dr. Andreas Bräuer	 <b>Precision Engineering</b> Dr. Ramona Eberhardt	
 <b>NIR- and VIS-Coatings</b> Dr. Olaf Stenzel	 <b>Characterization of Surfaces and Coatings</b> Dr. Angela Duparré	 <b>Illumination</b> Dr. Peter Schreiber	 <b>Microassembly and System Integration</b> Dr. Erik Beckert	 <b>Administration</b> Astrid Deppe Dipl.-Kffr.
 <b>Optical Coatings on Plastics</b> Dr. Ulrike Schulz	 <b>3D Measurement</b> Dr. Peter Kühmstedt	 <b>Technology and Integration</b> Dr. Peter Dannberg	 <b>Precision Systems</b> Dr. Stefan Risse	 <b>Strategy, Marketing, Coordination</b> Dr. Oliver Mauroner
 <b>EUV and X-ray Optics</b> Dr. Torsten Feigl	 <b>Optical System Development</b> Dr. Susanne Zwick	 <b>Imaging</b> Dr. Frank Wippermann	 <b>Simulation and Mechanical Design</b> Dr. Thomas Peschel	 <b>Technical Services</b> Wieland Stöckl Dipl.-Ing. (FH)
		 <b>CMN-Optics</b> Dr. Uwe Detlef Zeitner	 <b>Fiber Lasers</b> Dr. Thomas Schreiber	

 <b>ultra optics®</b> Center of Innovation Competence Prof. Dr. Thomas Pertsch	 <b>amos</b> Application Center for Microoptical Systems Dr. Oliver Mauroner	 <b>Transparent Conductive Coatings</b> Junior Research Group Kevin Fücksel	 <b>Insect Inspired Imaging</b> Junior Research Group Andreas Brückner, Dr. Robert Leitel
---	---	--	---

 <b>Ultrafast Optics</b> Prof. Dr. Stefan Nolte	 <b>Microstructure Technology</b> Dr. Ernst-Bernhard Kley	 <b>Fiber &amp; Waveguide Lasers</b> Prof. Dr. Jens Limpert	 <b>Nano Optics</b> Prof. Dr. Thomas Pertsch	 <b>Scientific Coordination</b> Dr. Frank Schrempel	<b>Collaborating groups of the Institute of Applied Physics Friedrich Schiller University Jena</b>
---	---	---	--	---	--

## Kuratorium | Advisory Committee

- Dr. Michael Mertin | Vorsitzender/Chair, JENOPTIK AG, Jena
- Dr. Klaus Bartholmé | Friedrich-Schiller-Universität, Jena
- Petra Bogdanski | Mahr-OKM GmbH, Jena
- Dr. Hans Eggers | Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
- Karin Holota | Holota Optics, Bad Tölz
- Kornelia Kanitz | Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Erfurt
- Dr. Roland Langfeld | Schott AG, Mainz
- Prof. Dr. Falk Lederer | Friedrich-Schiller-Universität, Physikalisch-Astronomische Fakultät, Jena
- Dr. Mario Ledig | Qioptiq Photonics GmbH & Co KG, Feldkirchen
- Dipl.-Ing. Peter Leibinger | TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen
- Prof. Dr. Roland Sauerbrey | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden
- Dr. Frank Stietz | Carl Zeiss AG, Oberkochen
- Dr. Berit Wessler | OSRAM GmbH, München
- Dr. Werner Wilke | VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin
- Dr. Dirk Zittlau | Continental Automotive GmbH, Babenhausen

## Ehrenmitglieder | Honorary Members

- Dr. Franz-Ferdinand von Falkenhausen | Vorsitzender/Chair 1999–2010
- Prof. Dr. Wolfgang Karthe | Institutsleiter/Director IOF 1992–2003

### Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2011 ist gegenüber dem Vorjahr um 14 % gewachsen, wobei die Aufwendungen für Personal geringer (4,4 %) anstiegen als die Sachausgaben (25 %). Basis der erfolgreichen Entwicklung ist der hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag (+ 27 %) erreichte den höchsten Wert seit der Institutsgründung. Auch die eingeworbenen öffentlichen Mittel (+ 9,5 %) erfuhren eine Steigerung.

### Investitionen

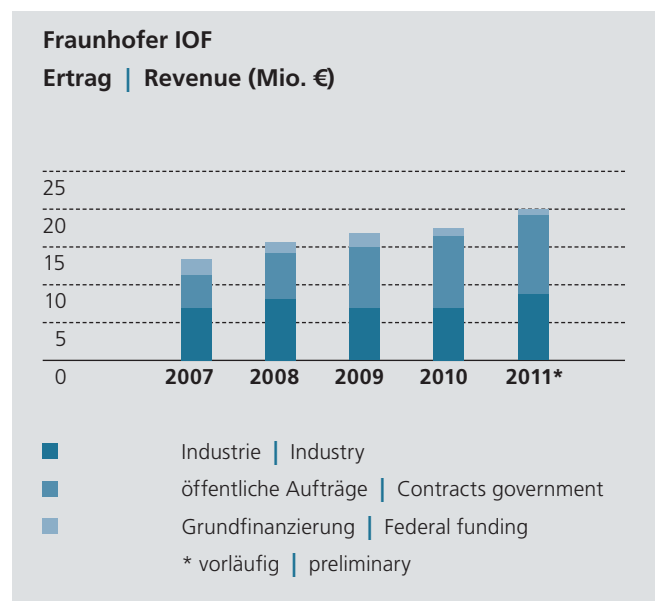
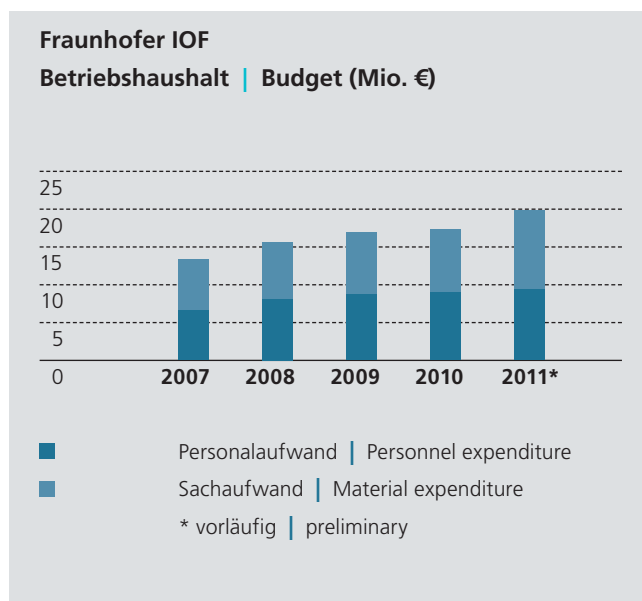
Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2011 wurden insgesamt 1,9 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

### Operating budget

Compared with the previous year the operating budget increased in 2011 by 14 %, with expenditure for staff rising less (4.4 %) than material costs (25 %). The basis of this successful development is the high share of revenue from contract research. The industry revenue (+ 27 %) reached the highest value in institute history. Also the received public funding increased (+ 9.5 %).

### Investments

The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 1.9 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2011.



# DAS INSTITUT IN ZAHLEN THE INSTITUTE IN FIGURES

## Personal

Mit dem Anwachsen des Betriebshaushaltes konnten auch 2011 neue Arbeitsplätze geschaffen werden. So wuchs die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter und Doktoranden gegenüber 2010 um 4,8 %, die Zahl der technischen Mitarbeiter wurde um 3,2 % erhöht. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität und der Fachhochschule Jena.

## Das IAP

Die Mitarbeiter des IAP konnten für 2011 Drittmittel in Höhe von 10,7 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle), das ist eine Steigerung gegenüber 2010 um 44,6 %. Auch am IAP gehört die kontinuierliche Investition in Infrastruktur zur Entwicklungsstrategie, 2011 wurden mehr als 6 Millionen Euro für Investitionen aufgewendet. Zum IAP gehörten 2011 sechs Professoren, 31 wissenschaftliche und 19 technische Mitarbeiter sowie 79 Doktoranden und 47 Studenten und Schülerpraktikanten.

## Staff

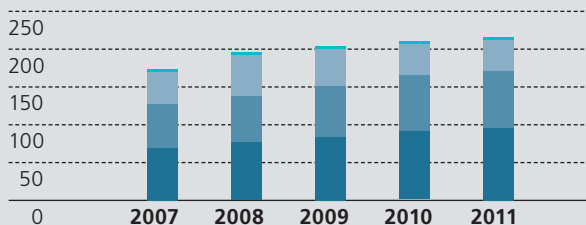
The increase in operating budget enabled the creation of further new jobs in 2011. The number of research assistants and doctoral candidates has risen by 4.8 % compared to 2010, the number of technical assistants has grown by 3.2 %. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher education, in particular the Friedrich Schiller University and the University of Applied Sciences Jena.

## The IAP

Employees at IAP acquired external funds worth 10.7 million euros in 2011 (see table), representing an increase of 44.6 % compared with 2010. Continuous investment in infrastructure is also part of the development strategy at IAP, more than 6 million euros were spent on investments in 2011. A total staff of 6 professors, 31 research assistants, 19 technical assistants, 79 doctoral candidates and 47 students and student internships were working at IAP in 2011.

### Fraunhofer IOF

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



- Wissenschaftler | Scientists
- Techniker | Technicians
- Schüler und Studenten | Students
- Sonstige | Temporary contracts

### FSU-IAP

#### Drittmittleinnahmen IAP 2011 | Contract research revenue IAP 2011

Fördergeber   Contracts with	Zuwendung   Funds   T€
BMBF	8 099
DFG	854
EU	412
Thüringen   Thuringia	390
Stiftungen	85
Industrie   Industry	884



# HIGHLIGHTS 2011



# MEHR RAUM FÜR INNOVATIONEN MORE SPACE FOR INNOVATIONS

## **Nutzfläche für Zukunftsfelder**

Nach etwas mehr als zwei Jahren Bauzeit konnte im September 2011 der Erweiterungsbau des Fraunhofer IOF bezogen werden. Damit ist die Nutzfläche des Instituts um 1825 m<sup>2</sup> auf insgesamt mehr als 7000 m<sup>2</sup> Büro- und Laborfläche gewachsen, darunter Reinnräume auf 1100 m<sup>2</sup> und exzellent ausgestattete Labore für verschiedene Anwendungszwecke. Auf den neu gewonnenen Flächen werden Lösungen mit Licht unter anderem für die Zukunftsfelder Energie und Umwelt, Information und Produktion entwickelt. Ganz besonders die Infrastruktur für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu optischen Systemen für Anwendungen in der physikalischen Grundlagenforschung, Astronomie und Erdbeobachtung konnte gestärkt werden; darunter Labore zur Durchführung von Klimatests und erschütterungsarme Speziallabore für die Ultrapräzisionsfertigung von Optiken.

## **Referenzprojekt für Energieeffizienz**

Besonderer Wert wurde bei der Erweiterung auf die Energieeffizienz in der Nutzung gelegt. So wurde beispielsweise die Beleuchtung im Rahmen eines Pilotprojektes unter Leitung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) in moderner LED-Technik ausgeführt. Ziel des Projekts ist es, Referenzdaten für den Einsatz der neuen Beleuchtungskörper unter realen Bedingungen zu gewinnen. Messsysteme erfassen den Energieverbrauch für die Beleuchtung, ermöglichen eine Bewertung der Energiebilanz im Vergleich zu konventionell beleuchteten Gebäuden und schaffen damit die Grundlage für den Einsatz von LED in öffentlichen Gebäuden. Sichtbar wird diese Technologie bereits bei einem Blick auf die LED-basierte Fassadenbeleuchtung des markanten, V-förmigen Baukörpers.

Das Bauvorhaben stellt eine Investition in die Zukunft dar. Die 17,3 Mio Euro, inklusive Erstausrüstung, wurden mit Mitteln des Bundes, des Freistaates Thüringen und der Europäischen Union (EFRE) finanziert.

## **Useful space for future areas**

Following a construction time lasting slightly more than two years, the expansion building of Fraunhofer IOF was ready to be occupied in September 2011. This means the useful surface area of the institute has been increased by 1825 m<sup>2</sup> to a total of more than 7000 m<sup>2</sup> office and laboratory space. This includes clean rooms covering 1100 m<sup>2</sup> and excellently equipped laboratories for various applications. In the newly available area, solutions with light are being developed, amongst other things for the future topics of energy and the environment, information and production. Above all, it has been possible to reinforce the infrastructure for research and development projects into optical systems for applications in fundamental physics research, astronomy and earth observation; the expansion also includes laboratories for carrying out climate tests and low-vibration special laboratories for ultra-precise production of lenses.

## **Reference project for energy efficiency**

Particular emphasis was placed on energy efficiency in use during the expansion. For example, the lighting was configured using modern LED technology as part of a pilot project managed by the German Federal Ministry of Transport, Buildings and Urban Developments (BMBVBS). The objective of the project is to obtain reference data for using the new light sources under real conditions. Measuring systems record the energy consumption for the lighting, permit evaluation of the energy balance compared to conventionally illuminated buildings, and thereby provide the basis for use of LEDs in public buildings. This technology can be seen even on the outside, in the form of the LED-based façade lighting on the striking, V-shaped structure.

The building project represents an investment in the future. The EUR 17.3 m, which includes the initial equipment, was financed by funds from the German government, the Free State of Thuringia and the European Union (EFRE).



### **Green Photonics – Nachhaltige Nutzung von Licht**

Grüne Technologien werden aufgrund endlicher Ressourcen und in Zeiten des Klimawandels zu zentralen Standortfaktoren erfolgreicher Wirtschaftsregionen. Die Optik und Photonik zeigen Lösungen in der Bewältigung der Herausforderungen der Zukunft auf. Green Photonics – Lösungen mit Licht zur CO<sub>2</sub>-neutralen Energiewandlung, zur Senkung des Energieverbrauchs, zur Reduktion von Treibhausgasen und zur ressourcenschonenden und nachhaltigen Produktion – stellen gleichzeitig ein Wachstumsfeld für die Branche dar.

### **Regionale Innovationsplattform**

Um die ökonomischen und ökologischen Potenziale auf diesem Gebiet zu erschließen, fördern die Fraunhofer-Gesellschaft und der Freistaat Thüringen den Innovationscluster Green Photonics. Der Cluster bietet eine Plattform für die Intensivierung der bestehenden Zusammenarbeit der Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik in der Region, die sich in einer Vielzahl konkreter Entwicklungsprojekte ausdrückt.

### **Eröffnung des Innovationsclusters**

Eröffnet wurde der Fraunhofer-Innovationscluster Green Photonics am 24. Mai 2011 auf der weltweit führenden Optik-Messe, der LASER.World of Photonics in München. Dabei machte Thüringens Staatssekretär im Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Technologie Jochen Staschewski deutlich, dass der Freistaat mit dem Programm »Thüringen – GreenTech« die Entwicklung und den Einsatz grüner Technologien gezielt beschleunigen will. Zur Eröffnung des Clusters überreichte Staschewski den ersten Zuwendungsbescheid aus der Thüringer Verbundförderung an die asphericon GmbH Jena und das Fraunhofer IOF.

### **Sustainable use of light**

Green technologies are becoming central location factors for successful economic regions in a time of finite resources and climate change. Optics and photonics can reveal solutions for tackling the challenges of the future. Green photonics – solutions involving light for CO<sub>2</sub>-neutral energy conversion, reducing energy consumption, cutting down greenhouse gases and allowing sustainable production with reduced resource consumption – also represent a growth area for the industry at the same time.

### **Regional innovation platform**

In order to open up the economic and ecological potential in this area, the Fraunhofer Society and the Free State of Thuringia are promoting the green photonics innovation cluster. The cluster offers a platform for increasing the intensity of existing cooperation between players in business, science and politics within the region, and is expressed in a variety of specific development projects.

### **Opening of the innovation cluster**

The opening of the Fraunhofer green photonics innovation cluster was announced on May 24, 2011 at the world's leading optics exhibition, the LASER. World of Photonics in Munich. At that event, Thuringia's Secretary of State in the Ministry of Economy, Labor and Technology, Jochen Staschewski, made it clear that this would be part of the Federal State's targeted promotional policy. The "Thuringia – GreenTech" program is intended to accelerate the development and use of green technologies. To mark the opening of the cluster, Mr. Staschewski handed asphericon GmbH Jena and Fraunhofer IOF the first allocation decision from the joint funding scheme by the Free State of Thuringia for the first green photonics project.

# INNOVATIONSCLUSTER GREEN PHOTONICS

## GREEN PHOTONICS INNOVATION CLUSTER

### Green Photonics Projekte

Die ersten Green Photonics Projekte wurden auf der 1. Zukunftskonferenz »Green Photonics« am 19. Oktober 2011 in Jena vorgestellt und mit einer Reihe von Vertretern aus Wissenschaft und Industrie diskutiert.

- Gemeinsam mit der asphericon GmbH entwickelt das Fraunhofer IOF im Projekt »HOBAS« eine Technologiekette zur ressourcenschonenden und hochgenauen Fertigung von präzisen Asphären für Hochleistungsobjektive.
- Ein neuer Ansatz zur Energiegewinnung mit Hilfe von Silizium-Solarzellen auf Glasfaserverbundsystemen wird im Projekt »TexSiSolar« verfolgt; Projektpartner sind neben dem Fraunhofer IOF auch das Institut für Photonische Technologien und die ITP GmbH.
- In einem weiteren Projekt arbeitet das Fraunhofer IOF mit der Otto Vision Technology GmbH an Verfahren zur prozessintegrierten 3D-Prüfung von Kleinbauteilen, um Ressourcen zu schonen und Kosten zu reduzieren.
- Und schließlich unterstützt das Fraunhofer IOF die Leistungselektronik Jena GmbH im Projekt »LED-Faserkopplung« bei der Entwicklung von flexibel einsetzbaren LED-Lichtquellen für die Mikroskopie.

### Green photonics projects

The first green photonics projects were presented at the first "Green Photonics" future conference held on October 19, 2011 in Jena, and were discussed by a series of representatives from business and industry.

- In the "HOBAS – Efficient and high-precision production of high-performance optics consisting of aspherical lenses", a technology sequence for manufacturing precision aspherical lenses with reduced use of resources is being developed in cooperation between asphericon GmbH and Fraunhofer IOF.
- A new approach to generating energy using silicon solar cells on glass fiber composite systems is being pursued in the "TexSiSolar" project. The project partners are Fraunhofer IOF as well as the Institute of Photonic Technologies and ITP GmbH.
- The "In-process 3D monitoring of plug connectors" project focuses on reducing resource usage. Together with Otto Vision Technology GmbH, Fraunhofer IOF is working on procedures for three-dimensional checking of components integrated in the process, with the objective of cutting costs and scrap in production.
- Together with Leistungselektronik Jena GmbH, Fraunhofer IOF is working on the "LED fiber coupling" project to develop controllable LED light sources which can be used flexibly in microscopy.

# APPLIKATIONSZENTRUM AMOS

## AMOS APPLICATION CENTER

### Optische und optoelektronische Sensorik

Das BMBF-geförderte Applikationszentrum Mikrooptische Systeme amos verbindet die herausragenden Kompetenzen und Infrastrukturen des Fraunhofer IOF mit jenen des CiS Forschungsinstituts für Mikrosensorik und Photovoltaik in Erfurt. Durch die enge Verknüpfung von Optik und Sensorik werden innovative mikrooptoelektronische Lösungen (MOEMS) generiert.

### Applikationsprojekte

Unter Koordination des Zentrums amos wurden bislang mehr als 25 Applikationsprojekte bearbeitet. Derzeit wird beispielsweise an maschinenintegrierten Messsystemen zur dreidimensionalen Vermessung der Werkzeugschneidkanten geforscht. Detaillierte Projektergebnisse hierzu sind im vorliegenden Jahresbericht auf Seite 40 dargestellt. Gleichzeitig bilden Mikrosysteme im Bereich der Lasertechnik einen Schwerpunkt des Applikationszentrums. So wird zum Beispiel an laserbasierten Spleißprozessen mikrooptischer Komponenten mittels automatisierter optischer Justage bearbeitet. In einem Ende 2011 gestarteten Projekt werden skalierbare Faserkoppler entwickelt, die jeweils bis zu 19 optische Multimodfasern zusammenführen können und für den Transport hoher Laserleistungen ausgelegt sind. Derart reproduzierbare Verbindungen optischer Fasern können zum Beispiel in der Materialbearbeitung und in der Medizintechnik eingesetzt werden.

Das Applikationszentrum amos wird durch das BMBF gefördert (16SV3596) und von der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH betreut.

### Optical and optoelectronic sensors

The amos Application Center for Micro-optic Systems is sponsored by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), and combines the outstanding skills and infrastructure of Fraunhofer IOF with those of the CiS Research Institute for Microsensorics and Photovoltaics in Erfurt. The close combination of optics and sensorics will generate innovative micro-optoelectronic solutions (MOEMS).

### Application projects

So far, more than 25 application projects have been processed under the coordination of the amos center. At present, for example, research is ongoing into measuring systems integrated into machines for three-dimensional measuring of the cutting edges of milling, turning and drilling tools. Detailed project results for this are presented on page 40 of this annual report. At the same time, microsystems in laser technology represent a focal point of the Application Center. For example, laser-based splicing processes for micro-optic components using automated optical calibration are being worked on. Scalable fiber couplers are being developed in a project that started at the end of 2011, with each coupler being capable of joining up to 19 optical multimode fibers. The fibers are designed for transporting high-powered laser beams. Connections between optical fibers that are as stable and reproducible as these can be used in many areas, such as material processing and medical technology.

The amos Application Center is sponsored by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) (16SV3596) and is being managed by VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.



# OPTIMI – OPTISCHE MIKROSYSTEME

## OPTIMI – OPTICAL MICROSYSTEMS

### **Kompetenzdreieck OptiMi**

Das Fraunhofer IOF, das Institut für Angewandte Physik der FSU Jena, die TU Ilmenau und das CiS-Forschungsinstitut für Mikrosensorik sind Partner im BMBF-geförderten Kompetenzdreieck OptiMi. In der 2011 gestarteten, zweiten Förderrunde von OptiMi stehen Innovationen in den Bereichen Gesundheit, Energie und Umwelt im Vordergrund. Dafür werden von den Partnern gemeinsam verschiedene Technologieplattformen entwickelt, auf deren Grundlage anwendungsspezifische Demonstratoren hergestellt werden.

### **Interdisziplinäre Projekte**

Im Bereich Gesundheit arbeiten die OptiMi-Partner zusammen mit dem Karlsruher Institut für Technologie KIT an einem mikrooptischen Akkommodationssystem für das Auge. Im Zukunftsfeld Energie werden Technologien für eine effiziente und energiesparende Materialbearbeitung mit Lasern entwickelt und im Bereich Umwelt wird an einer mikroopto-fluidischen Technologieplattform geforscht, mit der toxikologische Untersuchungen durchgeführt werden können. Die Projekte machen deutlich, dass im Bereich der Optischen Mikrosysteme zunehmend interdisziplinäre Lösungen gefragt sind.

### **Wissenschaftlicher Nachwuchs**

Für die Thüringer Industrie ist es aufgrund der demografischen Entwicklung notwendig, hinreichend qualifizierte Mitarbeiter für die Zukunft der Unternehmen zu gewinnen. Mit Unterstützung des Thüringer Ministeriums für Bildung, Wissenschaft und Kultur wurde parallel zum Forschungsprojekt OptiMi die Graduiertenschule OMiTec in Jena und Ilmenau aufgebaut.

### **OptiMi skills triangle**

Fraunhofer IOF, the Institute for Applied Physics of the Friedrich Schiller University of Jena, Ilmenau Technical University and the CiS Research Institute for Microsensorics are partners in the OptiMi skills triangle sponsored by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The second research round of OptiMi which started in 2011 is concentrating on innovations in the areas of health, energy and the environment. For this purpose, the partners are working together to develop various technological platforms on the basis of which application-specific demonstrators can be manufactured.

### **Interdisciplinary projects**

In the area of health, the OptiMi partners are cooperating with the Karlsruhe Institute for Technology (KIT) to develop a micro-optic accommodation system for the eye. In the energy field of the future, technologies are being developed for efficient and energy-saving material processing with lasers, while in the environmental area, research is in progress into a micro-optofluidic technology platform for carrying out toxicological investigations. The projects show that increasingly complex and interdisciplinary system solutions with defined interfaces are in demand in the area of optical microsystems.

### **Young scientists**

Due to demographic trends, it is necessary for Thuringia's industry to obtain adequately qualified employees for companies' future. For this reason the OMiTec Graduate School has been set up in Jena and Ilmenau with support of the Thuringian Ministry of Education, Science and Culture.





### **Fraunhofer-Zukunftsstiftung**

Vorlaufforschung in jenen Technologiefeldern zu fördern, in denen sich gezielt umfassende Patentcluster aufbauen lassen, ist das Ziel der Fraunhofer-Zukunftsstiftung. Zu den laufenden Projekten der Zukunftsstiftung zählt das Projekt »Insekteninspirierte abbildende optische Systeme« (INABOS) des Fraunhofer IOF, das die Entwicklung kompakter Kamerasysteme zum Ziel hat. Dabei geht es um die Entwicklung von Multiaperturobjektiven für den Einsatz als extrem dünne Kameras in Smartphones oder Automobilen sowie in der Medizintechnik und im Machine Vision Bereich.

### **Nachwuchsgruppe BIONA**

Die BMBF-Fördermaßnahme BIONA – Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien – zielt darauf ab, das große Repertoire an natürlichen Vorbildern zu nutzen und durch eine gezielte Übertragung von Funktionsweisen zu technischen Lösungen zu gelangen. Im Rahmen dieses Programms verfolgte eine Forschergruppe am Fraunhofer IOF einen interdisziplinären Ansatz, um ausgehend von Erkenntnissen über natürliche Facettenaugenprinzipien optische Skalierungsgesetze künstlicher Facettenaugen aufzustellen und neuartige Prinzipienkombinationen zu untersuchen.

### **Fraunhofer Future Foundation**

The objective of the Fraunhofer Future Foundation is to promote preliminary research into those fields of technology in which it will be possible to establish comprehensive patent clusters in a targeted manner. The ongoing projects of the Future Foundation include the "Insect-inspired figurative optical systems" project (INABOS) of Fraunhofer IOF which has the objective of developing compact camera systems. In particular, it is involved with developing multi-aperture lenses for use as an extremely thin camera in smartphones or automobiles as well as sensors in medical technology and the machine vision area.

### **BIONA youth group**

The BIONA research measure sponsored by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) – Bionic Innovations for Sustainable Products and Technologies – has the objective of using the wide repertoire of natural models and obtaining technical solutions by the targeted transfer of functions. As part of this program, a group of young people is working at Fraunhofer IOF on insect-inspired figurative optical systems. The research group is pursuing an interdisciplinary approach involving establishing optical scaling laws for synthetic compound eyes on the basis of natural compound eye principles, and then investigating innovative combinations of principles.



# GEFÖRDERTE FORSCHUNGSTHEMEN

## SPONSORED RESEARCH TOPIES

### **Plasma und Optische Technologien**

Die Zielstellung des vom BMBF geförderten und vom Fraunhofer IOF koordinierten PluTO-Projekts ist es, die Dünnschicht- und Plasmatechnologien zusammenzuführen (FKZ: 13N10459). Denn gerade was die Qualität optischer Komponenten und deren Oberflächen betrifft, haben sich Prozessplasmen als unverzichtbares Hilfsmittel für die Herstellung funktionaler Schichtsysteme erwiesen. Das Konsortium setzt sich aus Experten der optischen Beschichtungstechnologie (Laser Zentrum Hannover, Fraunhofer IOF) und der Plasmatechnik (INP Greifswald, Ruhr-Universität Bochum RUB) zusammen. Geforscht wird an einer neuen Generation von Beschichtungsprozessen mit Vorteilen im Hinblick auf Prozessstabilität, Ausbeute und Kontrolle der Qualitätsparameter.

### **Fasertechnologie**

Faserlaser besitzen ein hohes Zukunftspotenzial. Sie ermöglichen aufgrund ihres monolithischen Aufbaus eine hohe Strahlqualität und Leistungsdichte. Eine Schlüsselkomponente der Faserlaser ist die laseraktive Spezialfaser. Seit Oktober 2011 wird im Rahmen des industriegeführten BMBF-Projektes eine Arbeitsgruppe »Fasertechnologie« aufgebaut, deren Ziel es ist, die für die Herstellung erforderliche und im Labormaßstab erprobte MCVD-Technologie in industrietaugliche Prozesse zu überführen und damit langfristig die reproduzierbare Verfügbarkeit von Preformen und laseraktiven Fasern abzusichern. Parallel dazu verfolgt die gemeinsam mit dem Institut für Photonische Technologien IPHT und dem IAP der FSU Jena beantragte und vom Freistaat Thüringen sowie dem European Social Fund (ESF) geförderte Forschergruppe »Fasertechnologie« das Ziel, die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für die nächste Generation laseraktiver Spezialfasern zu untersuchen. Die Arbeiten am Fraunhofer IOF konzentrieren sich auf neue Faserdesigns für Hochleistungslaser.

### **Plasma and optical technologies**

The objective of the PluTO project sponsored by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and coordinated by Fraunhofer IOF is to merge thin-film and plasma technologies (sponsorship code: 13N10459). Particularly when it comes to the quality of optical components and their surfaces, process plasmas have proven themselves to be essential tools for manufacturing functional coating systems. The consortium is composed of experts in optical coating technology (Laser Zentrum Hannover, Fraunhofer IOF) and plasma technology (INP Greifswald, Ruhr University Bochum RUB). Research is in progress into a new generation of coating processes with advantages in terms of process stability, yield and monitoring of the quality parameters.

### **Fiber technology**

On account of their monolithic design, fiber lasers produce a high-quality beam that can apply a high power density to the workpiece, which means fiber lasers have great potential for the future. The laser-active special fiber is a key component in fiber lasers. A "Laser Technology" working group has been in place since October 2011 as part of the industry-led BMBF project; its objective is to adapt the laboratory-tested MCVD technology required for manufacturing into industry-ready processes, thereby ensuring that preforms and laser-active fibers can be reproduced over the long-term. In parallel the research group "Laser Technology" is investigating the scientific and technical foundations of the next generation of laser-active special fibers; the research group works in cooperation with the Institute of Photonic Technologies (IPHT) and the Institute of Applied Physics (IAP) at Friedrich Schiller University in Jena and is sponsored by the Free State of Thuringia and the European Science Foundation (ESF). The work being done at the Fraunhofer IOF focuses on new fiber designs for high-power lasers.

Im Jahr 2011 wurden am Fraunhofer IOF verschiedene Projekte durchgeführt, die vom Freistaat Thüringen gefördert und von der Europäischen Union kofinanziert wurden.

Fraunhofer IOF completed several projects in 2011, which have been funded by the free state of Thuringia and co-financed by the European Union.

**Europäischer Fonds für regionale Entwicklung – EFRE |  
European Regional Development Fund – ERDF**

**SOS**

Innovative strukturierbare optische Schichten  
mittels Magnetronspattern  
2008FE9094

**UVLUX**

Montagetechnologie UV-LED-Module  
2009FE9010

**high-speed 2D/3D-Vermessung**

high-speed 2D/3D-Vermessung  
2008FE9125

**OKAM**

Optikkonzepte und Kalibrierung für multikanalige  
Megapixel-VIS/NIR/IR-Kamera  
2008FE9118

**CoLIGHT**

Intelligente und energieeffiziente Beleuchtungssysteme mit LED-Quellen  
2008FE9141

**HOKA**

Hochauflösende Kameramodule als  
VisionSensorik für die Medizintechnik  
2008FE9175

**FlexOp**

Flexible Montage- und Automatisierungskonzepte für Laserstrahlquellen  
2008FE9136

**PRIDE**

Prozessintegrierbare Defekt-Detektion an  
optischen Präzisionsoberflächen  
2009FE9141

**mCT**

mCT gestützte Prozesskette – Datenaufnahme  
und -auswertung sowie Aufbau der remote-Schnittstelle zu den industriellen Partnern  
2009FE9110

**PARCEL**

Aktor für Mehrfachablenk-Systeme und Kontaktierung  
2010FE9028

# EFRE- UND ESF-PROJEKTE ERDF AND ESF PROJECTS

## **Safe VISITOR**

Multispektrale Sicherheitskamera für Sichtbares, Infrarotes und Terahertz-Licht  
2010FE9024



## **TexSiSolar**

Untersuchungen zur Integration von elektronischen und mechanischen Funktionen von Silizium-Solarzellen in zweidimensionale Verbundsysteme  
2011FE9037

## **HOBAS**

Entwicklung eines Messverfahrens und einer Technologie zum Justierdrehen für die effiziente und hochgenaue Fertigung von asphärischen Hochleistungsobjektiven  
2011FE9008

**Europäischer Sozialfonds – ESF |  
European Social Fund – ESF**



## **FaserTech**

Faserdesigns für Hochleistungslaser  
2011FGR0103



### **Photonics West in San Francisco**

Bereits zum siebenten Mal präsentierte das Fraunhofer IOF vom 22. bis 27. Januar 2011 aktuelle Forschungsergebnisse auf der Photonics West in San Francisco. Gezeigt wurde der Prototyp eines kurzbauenden Mikroskops, welches die Erfassung eines ausgedehnten Objektfeldes mit einem hohen Auflösungsvermögen ermöglicht. Einsatzfelder liegen in der Medizin, in der Dokumentenprüfung oder auch im Bereich Machine Vision.

### **LASER.World of Photonics in München**

Auf der weltweit größten Photonik-Messe 2011, der LASER.World of Photonics, die vom 23. bis 26. Mai in München stattfand, war das Fraunhofer IOF mit aktuellen Entwicklungen wieder prominent vertreten. Highlights waren unter anderem Kurzpuls laser hoher Leistung für die Mikrobearbeitung, Optiken höchster Präzision für Weltraum- und Informationstechnik sowie neuartige Projektionssysteme auf der Basis energieeffizienter LED. Begleitend zur Eröffnung des Fraunhofer-Innovationsclusters Green Photonics fanden auf der Messe zwei Vortragsreihen zu den Themen »Festkörperlichtquellen« und »Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Festkörperlaser« statt.

### **Mikrosystemtechnik Kongress in Darmstadt**

Mit mehreren Vorträgen und einem Messestand beteiligte sich das Fraunhofer IOF am Mikrosystemtechnik-Kongress, der vom 10. bis 12. Oktober 2011 in Darmstadt ausgetragen wurde. Mit über 1000 Teilnehmern war der Kongress das bestbesuchte Forum für Mikrosystemtechnik in diesem Jahr. Unter anderem präsentierten unsere Wissenschaftler ein neues Verfahren zum Drucken aktorisch wirksamer funktionaler Materialien, das in der Polymerelektronik einsetzbar ist – etwa zur Herstellung organischer LEDs, Solarzellen oder Verdrahtungsstrukturen.

### **Photonics West in San Francisco**

For the seventh time, the Fraunhofer IOF presented recent research results at Photonics West, held from January 22 to 27, 2011 in San Francisco. The presentation focused on a prototype of a short-design microscope that can capture an extended object field at high resolution. Areas of application include medicine, document review and machine vision.

### **LASER.World of Photonics in Munich**

The Fraunhofer IOF was again prominently represented with new innovations at the world's largest photonics trade fair in 2011, LASER.World of Photonics, which was held from May, 23 to 26, 2011 in Munich. Highlights included high-power short-pulse lasers for micro-processing, high-precision lenses for aerospace engineering and information technology, as well as innovative projection systems based on energy-efficient LEDs. To accompany the opening of Green Photonics, a Fraunhofer innovation cluster, two application panels were held at the trade fair on "Solid State Lighting" and "Solid State Lasers – Novel Developments".

### **Microsystems Technology Conference in Darmstadt**

The Fraunhofer IOF gave several presentations and staffed a stand at the Microsystems Technology Conference, held from October 10 to 12, 2011 in Darmstadt. With over 1000 attendees, the conference was the best-attended microsystems technology event of the year. Among other things, our scientists presented a new method to press actuator-effective functional materials that can be used in polymer electronics; for example, to produce organic LEDs, solar cells or wiring structures.

# MESSEN / ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

## TRADE FAIRS/PUBLICITY

### **Nachwuchsförderung am Fraunhofer IOF**

Im Jahr 2011 fanden viele Schüler- und Studentengruppen den Weg zum Fraunhofer IOF, um sich über das Institut und aktuelle Forschungsthemen zu informieren. Für Schülergruppen ging es vor allem darum, ihr Wissen über Licht und Optik anhand von Experimenten zu vertiefen und einen ersten Einblick in die Laborarbeit zu gewinnen. Studierende verschiedener Hochschulen konnten sich am Institut nicht nur über die Forschungsprojekte informieren, sondern auch über das Angebot an Praktika, Abschlussarbeiten und Karrieremöglichkeiten. Auch 2011 führten etliche Master- und Diplomstudenten ihre Abschlussarbeiten am IOF durch. Ein besonders enger Kontakt besteht zur Friedrich-Schiller-Universität Jena und zur Fachhochschule Jena, insbesondere da Mitarbeiter des Instituts an beiden Hochschulen Vorlesungen halten. Darüber hinaus bildet das Fraunhofer IOF seit seiner Gründung 1992 Industriemechaniker und seit 2000 Physiklaboranten aus. Bis zum Jahr 2011 haben insgesamt 22 Auszubildende ihre Ausbildung erfolgreich abgeschlossen. Damit sichert das Institut seinen Nachwuchs an Fachkräften.

### **Lange Nacht der Wissenschaften**

Die 4. Auflage der Langen Nacht der Wissenschaften am 25. November 2011 mobilisierte mehr 10 000 Neugierige, ein Beweis für das starke Interesse an den Sternstunden der Wissenschaft in Jena. Die Institute auf dem Beutenberg Campus boten knapp 100 Veranstaltungen an, die sehr gut besucht waren. Auch das Fraunhofer IOF öffnete bis Mitternacht seine Türen und zeigte Highlights aus der aktuellen Forschung. Besonderes Interesse fanden Spiegel für Satellitensysteme, miniaturisierte Kameras und Projektoren sowie das 3D-Vermessen von Fußspuren. Die vier angebotenen Vorträge unserer Mitarbeiter, »Unnatürliches Licht – der Laser«, »Leuchtende Insektenaugen – die Beamer von Morgen«, »Blick in das Innere – Tomographische Messverfahren« und »Metamaterialien – der Weg zu einer neuen Optik jenseits von Abbe« fanden starken Zuspruch.

### **The Fraunhofer IOF supports the next generation**

In 2011 many groups of primary and secondary school students made their way to the Fraunhofer IOF in order to learn about the institute and current research topics. The student groups were mainly interested in learning more about light and optics through experiments and getting their first look at laboratory work. Students from various universities and colleges learned about research projects at the institute as well as the range of internships, academic thesis projects and career opportunities. Several master's and doctoral students are also conducting their final thesis projects at the IOF in 2011. We have an especially close relationship with Friedrich Schiller University Jena, and the University of Applied Sciences Jena since staff from the institute give lectures at both universities. Moreover, the Fraunhofer IOF has trained industrial mechanics since its establishment in 1992, and physics laboratory technicians since 2000. As of 2011, a total of 22 apprentices have successfully completed their training. That ensures the institute will have access to a new generation of specialists.

### **Long Night of the Sciences**

The fourth edition of the Long Night of the Sciences, a late-night science discovery event, took place on November 25, 2011; it attracted more than 10,000 visitors, a testament to their great curiosity about science in Jena. The institutes at the Beutenberg Campus hosted almost 100 well-attended events. The Fraunhofer IOF also kept its doors open until midnight to showcase the highlights of current research. Visitors were particularly interested in mirrors for satellite systems, miniature cameras and projectors, and 3D measurement of footprints. Four of our staff gave presentations, all of which were well-received: "Unnatural light – the laser", "Glowing insect eyes – tomorrows projectors", "A look inside – tomographic measurement methods" and "Metamaterials – the path to a new optics beyond Abbe".





### **SID Student Award für Constanze Grossmann**

Constanze Grossmann, Doktorandin am Fraunhofer IOF, wurde im Rahmen der mitteleuropäischen Frühjahrstagung der Society for Information Display (SID) in Darmstadt, die vom 10. bis 11. März 2011 stattfand, für ihre Arbeiten zu einem OLED-basierten System der Student Award der Gesellschaft verliehen.

### **Andreas Tünnermann Mitglied der acatech**

Prof. Dr. Andreas Tünnermann wurde am 18. April 2011 als neues Mitglied in die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) gewählt. Mit der Wahl würdigte die Akademie seine Verdienste um die strategische Ausrichtung des Forschungsfeldes Optik und Photonik in Deutschland.

### **Thüringer Verdienstorden für Andreas Tünnermann**

Am 12. Mai 2011 erhielt Prof. Andreas Tünnermann den Thüringer Verdienstorden (Abb. 1). Zur Verleihung würdigte ihn Ministerpräsidentin Christine Lieberknecht für seine Leistungen um die Spitzenstellung der Jenaer Optikforschung. Der Thüringer Verdienstorden wird für herausragende Verdienste um Thüringen und seine Bevölkerung verliehen und ist die höchste Auszeichnung, die der Freistaat zu vergeben hat.

### **Student Award für Thomas Weber**

Auf der EOS Conference on Manufacturing of Optical Components, die vom 23. bis 25. Mai 2011 in München stattfand, wurde Thomas Weber mit dem Student Poster Presentation Award geehrt. In seinem Beitrag ging es um »High aspect ratio iridium wire grid polarizer for UV applications«.

### **Constanze Grossmann receives SID Student Award**

At the spring meeting of the Mid-Europe chapter of the Society for Information Display (SID) in Darmstadt from March 10 to 11, 2011, the Society's Student Award was conferred on Constanze Grossman, doctoral candidate at the Fraunhofer IOF, for her work on an OLED-based system.

### **Andreas Tünnermann inducted as a member of acatech**

On April 18, 2011, Prof. Dr. Andreas Tünnermann was elected as a new member of the German National Academy of Science and Engineering (acatech). Through the election, the Academy recognizes his achievements surrounding the strategic orientation of the field of optics and photonics research in Germany.

### **Andreas Tünnermann receives the Thuringian Order of Merit**

Prof. Andreas Tünnermann received the Thuringian Order of Merit on May 12, 2011 (Fig. 1). At the ceremony, state prime minister Christine Lieberknecht praised his contributions toward making Jena a top location for optics research. The Thuringian Order of Merit is conferred in recognition of outstanding achievements relating to Thuringia and its inhabitants, and is the highest award bestowed by the Free State of Thuringia.

### **Thomas Weber receives Student Award**

Thomas Weber was honored with the Student Poster Presentation Award at the EOS Conference on Manufacturing of Optical Components that took place in Munich from May 23 to 25, 2011. His paper was on a "High aspect ratio iridium wire grid polarizer for UV applications".

# AUSZEICHNUNGEN UND PREISE

## AWARDS AND PRIZES

### **Hugo-Geiger-Preis für Anika Brahm**

Anika Brahm wurde am 26. Mai 2011 für ihre Masterarbeit mit dem dritten Platz des Hugo-Geiger-Preises geehrt (Abb. 2). In ihrer Arbeit konstruierte sie ein Terahertz-Messsystem, mit dem man Struktur und chemische Zusammensetzung von Gegenständen erkennen kann.

### **Angela Duparré zum EOS Fellow ernannt**

Dr. Angela Duparré wurde am 28. September 2011 zum Fellow der European Optical Society (EOS) ernannt. Sie erhielt diese Auszeichnung in Würdigung ihrer Beiträge zur Charakterisierung und Modellierung funktionaler Eigenschaften optischer Oberflächen, Beschichtungen, Materialien und Baugruppen insbesondere in Bezug auf Streulicht, Mikro- und Nanostrukturen und Rauheit sowie der Entwicklung der dazu gehörigen Mess- und Analyseverfahren.

### **STIFT-Preis an Jan Rothhardt**

Der STIFT-Preis 2011 für anwendungsorientierte Forschung an Thüringer Hochschulen wurde am 11. November 2011 an Jan Rothhardt verliehen. Damit wurde er für seine Promotion zu Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern auf Basis »Faserlaser-getriebener optisch parametrischer Verstärkung« ausgezeichnet.

### **Friedrich Rickelt bester Physiklaborant**

Friedrich Rickelt hat seine Ausbildung als bester Physiklaborant 2011 im Bereich der IHK Ostthüringen am Fraunhofer IOF abgeschlossen und wurde dafür am 15. November 2011 von der Fraunhofer-Gesellschaft in München als einer ihrer besten Auszubildenden geehrt.

### **Anika Brahm receives Hugo Geiger Award**

For her Master's thesis Anika Brahm was honored with third place of the Hugo Geiger Award on May 26, 2011 (Fig. 2). In her thesis, she designed a terahertz measurement system that could identify the structure and chemical composition of objects.

### **Angela Duparré named EOS Fellow**

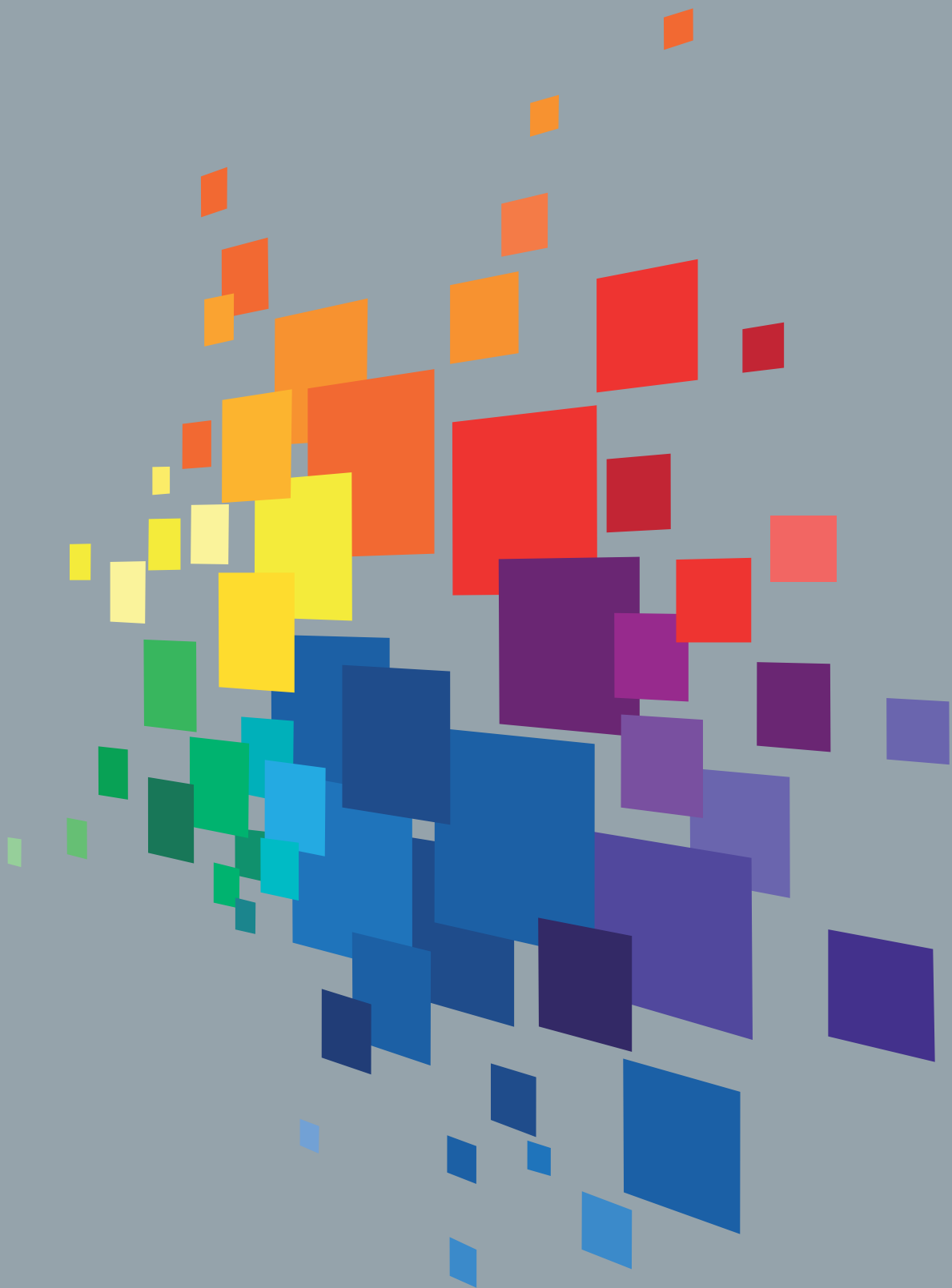
Dr. Angela Duparré was named Fellow of the European Optical Society (EOS) on September 28, 2011. She received this award in recognition of her contributions to characterizing and modeling functional properties of optical surfaces, coatings, materials and modules, especially with regard to scattered light, micro and nano-structures and roughness, as well as developing the corresponding measuring and analysis procedures.

### **Jan Rothhardt receives STIFT Award**

The 2011 STIFT Award for applied research at universities in Thuringia was conferred on Jan Rothhardt on November 11, 2011. The award recognized him for his doctoral thesis on high-power ultra-short pulse lasers based on "fiber laser-powered optic parametric amplification".

### **Friedrich Rickelt named best physics laboratory technician**

Friedrich Rickelt completed his apprenticeship at the Fraunhofer IOF as best physics laboratory technician for 2011 within the Chamber of Industry and Commerce of Eastern Thuringia; he was honored by the Fraunhofer Society in Munich as one of its best apprentices on November 15, 2011.



# AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2011

## SELECTED RESULTS 2011

Das Fraunhofer IOF entwickelt zur Bewältigung drängender Zukunftsfragen effiziente und innovative Lösungen mit Licht in den Bereichen Energie und Umwelt, Information und Sicherheit, Gesundheit und Medizin. Die kontinuierliche Entwicklung und Optimierung von Technologien mit dem Ziel der Kontrolle von Licht ist die Basis unserer Arbeit – von der Erzeugung, über den Transport und die Manipulation bis hin zur Anwendung.

In enger Verbindung mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena betreibt das Fraunhofer IOF Grundlagenforschung, Technologieentwicklung und angewandte Forschung bis hin zur Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen im Auftrag unserer Kunden.

Auf den folgenden Seiten sind ausgewählte Forschungsergebnisse dargestellt, welche im vergangenen Jahr in internen Projekten oder gemeinsam mit Partnern und Auftraggebern erzielt wurden. Die dargestellten Beispiele zeigen Lösungen für die Bereiche

- Energie und Umwelt
- Information und Sicherheit
- Technologieentwicklung und
- Grundlagenforschung.

To overcome the urgent challenges of tomorrow, the Fraunhofer IOF develops efficient and innovative solutions that use light in the areas of energy and environment, information and safety, and health and medicine. Our work is based on ongoing development and optimization of technologies designed to control light – from conception, to transport and manipulation, through to application.

In close cooperation with the Institute for Applied Physics at Friedrich Schiller University, Jena, the Fraunhofer IOF engages in basic research, technology development and applied research, through to developing products and services to meet our customers requirements.

The following pages introduce selected research results from last year as part of internal projects or collaborations with partners and customers. The examples profiled feature solutions applicable to:

- Energy and environment
- Information and safety
- Technology development and
- Basic research.



## LÖSUNGEN MIT LICHT ...

... SPAREN ENERGIE, SCHONEN RESSOURCEN,  
SCHÜTZEN DIE UMWELT.

## SOLUTIONS WITH LIGHT ...

... SAVE ENERGY, CONSERVE RESOURCES,  
PROTECT THE ENVIRONMENT.

# ENERGIE UND UMWELT

## ENERGY AND ENVIRONMENT

Angesichts der Knappheit an fossilen Energieressourcen und der wachsenden CO<sub>2</sub>-Belastung zählt der verantwortungsvolle Umgang mit Energie und Rohstoffen zu den zentralen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Es werden Technologien benötigt, mit denen der Ressourcenverbrauch gesenkt, die Energieeffizienz gesteigert und Produktionsprozesse möglichst umweltverträglich gestaltet werden können. Licht als Werkzeug fällt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Es arbeitet flexibel und verschleißfrei. Zugleich verfügt Licht aufgrund seines großen Wellenlängenbereichs über vielfältige physikalische und chemische Wirkungen.

Unser heutiges Leben ist stark von der Beleuchtung abhängig, sowohl am Arbeitsplatz als auch im privaten Bereich oder im Straßenverkehr. Um den Energieverbrauch auf diesem Gebiet zu senken, sind moderne Halbleiterlichtquellen unabdingbar: LEDs und OLEDs weisen ein Einsparpotenzial von 50 % auf. In Kombination mit Lichtmanagement, welches zum Beispiel das Umgebungslicht oder die Anwesenheit von Personen berücksichtigt, können zusätzlich weitere 20 % eingespart werden. Mit dem 2011 bezogenen Erweiterungsbau zählt das Fraunhofer IOF zu den Vorreitern hinsichtlich des Einsatzes energieeffizienter Beleuchtung. Im Bereich der Produktionsprozesse ermöglichen integrierte und miniaturisierte Monitoring- und Überwachungssysteme eine energieeffiziente und materialsparende Fertigung, hohe Prozessgeschwindigkeiten sowie werkstoffangepasste Verfahren. Im Bereich Umweltmonitoring ermöglichen Präzisionsoptiken in Satellitensystemen eine hochgenaue Erdbeobachtung zur Früherkennung von Naturereignissen und zur langfristigen Kontrolle der Umweltverträglichkeit von Produktion und Landwirtschaft.

Lösungen mit Licht stehen für eine effiziente Produktion, einen sparsamen Umgang mit Ressourcen und für Umwelt- und Klimaschutz und eröffnen so wirtschaftliche Chancen für Unternehmen.

The scarcity of fossil energy sources and increasing CO<sub>2</sub> pollution has made responsible use of energy and raw materials one of the most important social and economic challenges. We will need technologies that reduce resource consumption, increase energy efficiency and help make production processes as environmentally-friendly as possible. As a tool, light has a key role to play. It can be used flexibly, with no wear. At the same time, light has a varied range of physical and chemical effects thanks to its broad wavelength spectrum.

Life today is highly dependent on lighting – at work, home and in traffic. To reduce energy consumption in this area, modern semiconductor light sources are indispensable: LEDs and OLEDs have the potential to save energy by 50 %. Combined with light management, which looks into ambient light or the presence of people, an additional 20 % can be saved. The expansion wing of the Fraunhofer IOF was occupied in 2011 and has made the IOF a leader in the use of energy-efficient lighting. When applied to production processes, integrated miniature monitoring systems make production more energy-efficient and rapid, they reduce material waste and make it possible to employ processes that are adapted to the materials. When applied to environmental monitoring, precision optics in satellite systems allow for high-precision observation of the Earth, which can aid early detection of natural events, and enables long-term monitoring of the environmental effects of production and agriculture.

Solutions with light represent efficient production, efficient use of resources, and environmental and climate protection – and as such give companies the ability to be more economical.





## OPTISCHES BREITBANDMONITORING IM INDUSTRIELLEN BESCHICHTUNGSUMFELD

## OPTICAL BROADBAND MONITORING IN AN INDUSTRIAL PRODUCTION ENVIRONMENT

Auf dem Gebiet des optischen Breitbandmonitorings von Beschichtungsprozessen kooperiert das IOF mit der Bte Bedampfungstechnik GmbH. Bte ist spezialisiert auf die Beschichtung von Glas, Metall und Kunststoff mit optischen Funktionsschichten. In Hochvakuum-Bedampfungs- und Sputteranlagen werden nicht nur reine Lohnbeschichtungen, sondern auch Fertigprodukte nach individuellen Kundenspezifikationen in industriellem Maßstab hergestellt.

Zur weiteren Reduzierung von Einfahrzeiten für neue Prozesse sowie höhere Reproduzierbarkeiten in der Spezifikationsstreuung sollen die Beschichtungsprozesse zunehmend durch optisches Breitbandmonitoring gesteuert werden. Insbesondere durch die Beschleunigung von Einfahrprozessen und die Reduktion von Fehlchargen reduzieren sich Kosten und Energieverbrauch.

Zu diesem Zweck wurde das am IOF entwickelte Prozessphotometer OptiMon, das in-situ-Messungen des Transmissionsvermögens direkt am zu beschichtenden Substrat während der Beschichtung ermöglicht und damit zur Steuerung des Beschichtungsprozesses selbst eingesetzt werden kann, einem achtmonatigen Einsatztest unter industriellen Produktionsbedingungen unterworfen.

Fraunhofer IOF collaborates with Bte Bedampfungstechnik GmbH in the field of optical broadband monitoring. Bte specializes in functional coating of glass, metal, and plastic surfaces. Evaporation and sputtering of coatings is performed in high vacuum deposition systems in order to manufacture products according to customer specifications at an industrially relevant scale.

For further reducing development times of new processes, as well as further enhancement of reproducibility of specification excellence, deposition processes should be controlled by optical broadband monitoring. Particularly due to the reduction of waste charges, this results in a higher sustainability caused by lower costs and energy consumption.

Therefore, the broadband monitoring system OptiMon as developed by IOF has been installed at Bte for an 8 month test period under industrial coating production conditions.

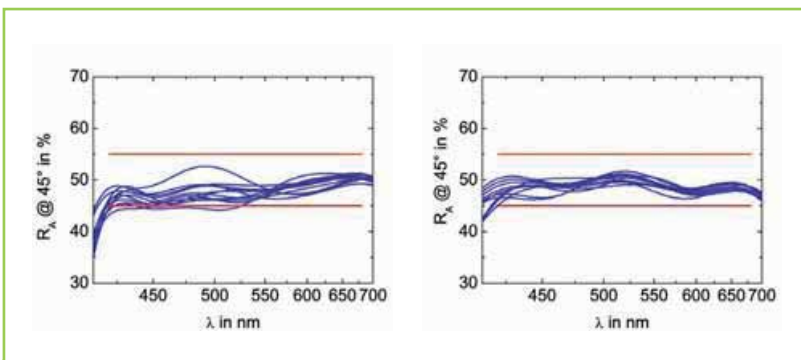
**1\_2** *Triggerlösung und Beleuchtungsoptik in der Beschichtungsanlage. | Trigger unit and illumination optics in the deposition chamber.*

Obwohl ausnahmslos ungestützte Beschichtungsprozesse eingesetzt wurden und demnach deutliche Unterschiede in den optischen Eigenschaften unter Vakuum- und Atmosphärenbedingungen bestehen, erwies sich die Prozessführung unter Nutzung von OptiMon einer reinen schwingquartzgesteuerten Prozessführung bei allen betrachteten Systemen als klar überlegen.

Im Ergebnis dieser Studie geht die Bte nunmehr zur routinemäßigen Nutzung des OptiMon-Systems in der industriellen Fertigung über.

Although all coatings have been produced without any ion assistance and therefore show a significant drift in optical properties between atmospheric and vacuum conditions, the application of OptiMon turned out to be clearly superior to pure quartz monitoring.

As the result of this study, Bte will use OptiMon as a routine tool for industrial coating manufacture.



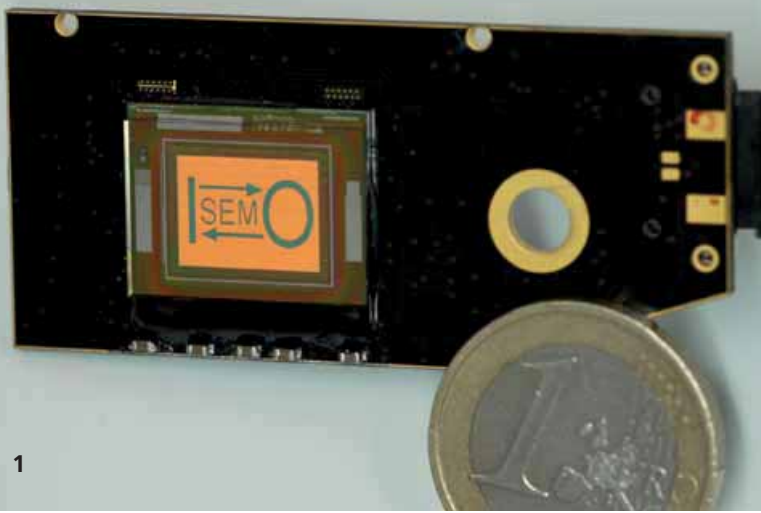
**3** Reflexion eines 50 : 50 Strahlteilers für 45° Einfallswinkel aus zehn aufeinanderfolgenden Abscheideversuchen; links: Prozessführung herkömmlich mit Schwingquarz; rechts: Prozessführung mithilfe von OptiMon. Die Reproduzierbarkeit ist bei Prozessführung mit OptiMon deutlich besser; die über dem spezifizierten Wellenlängenbereich gemittelte Standardabweichung im Reflexionsvermögen beträgt nur noch das 0,63-fache des Wertes bei Schwingquarzsteuerung. | Reflectance of a 50 : 50 beam splitter for 45° incidence angle (10 subsequent deposition runs); left: traditional quartz monitoring; right: process monitoring by means of OptiMon. The reproducibility in optical performance turns out to be much better when the process is monitored by OptiMon; the average standard deviation when using OptiMon is only 63% of the value achieved with traditional quartz monitoring.

## AUTHORS

Olaf Stenzel  
Steffen Wilbrandt  
Mario Held<sup>1</sup>  
Norbert Kaiser  
<sup>1</sup> Bte Bedampfungstechnik GmbH

## CONTACT

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



## MINIATURISIERTE SENSOREN MIT BIDIREKTIONALEN BAUELEMENTEN

### MINIATURIZATION OF SENSORS USING BI-DIRECTIONAL DEVICES

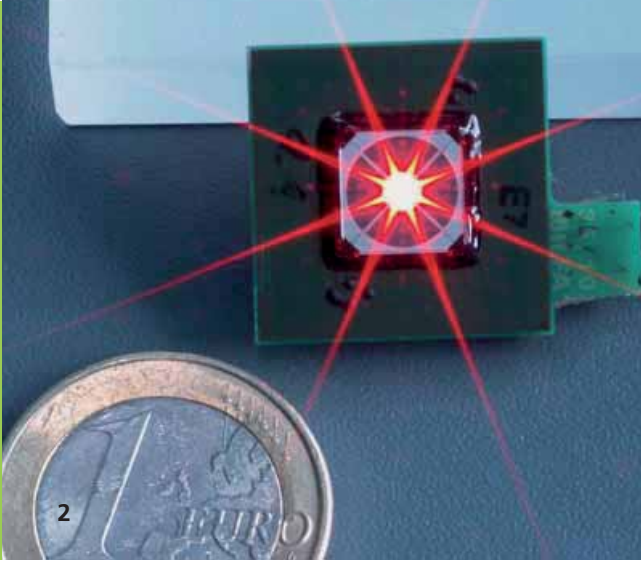
Stetig wachsende Anforderungen an Fertigungstechniken lassen auch die Anforderungen an die notwendige, berührungslose Messtechnik steigen. Konventionelle optische Messsysteme basieren auf separater Projektions- und Kamertechnik. Dieser Ansatz ist gekennzeichnet durch die jeweiligen optisch-mechanischen Eigenschaften des gesamten Messsystems wie z. B. Auflösung, Genauigkeit, Leistungsaufnahme und besonders den erforderlichen Bauraum. Hierbei sind der Miniaturisierung von komplexen optischen Messsystemen Grenzen gesetzt.

Der Einsatz von neuartigen opto-elektronischen Bauelementen – sogenannten bidirektionalen Mikrodisplays (BiMiDs) und LED-Photodiodenmodulen – hat großes Potenzial zur Miniaturisierung bei gleichzeitiger Steigerung der Leistungsfähigkeit durch eine neue Integrationstiefe. Diese Bauelemente ermöglichen die Kombination von Lichterzeugung mittels einer Matrix organischer oder anorganischer Leuchtdioden und der Detektion des Lichtes über eine Photodiodenmatrix auf einem äußerst kompakten Bauelement [1].

Growing demands on manufacturing technology also increase the requirements for necessary non-contact metrology. Conventional optical metrology systems are based on a separated projection and detection unit. This approach is characterised by the optical and mechanical properties of the entire measurement system, e. g. resolution, accuracy, power consumption and especially the required space. Hence, the options for miniaturizing such systems are limited.

The application of innovative opto-electronic devices – so-called bi-directional OLED microdisplays (BiMiDs) and LED-Photodiode modules – offers a huge potential for miniaturization with a simultaneous increase of performance through a new integration step. Such devices enable the combination of light generation by an array of organic or anorganic light emitting diodes and detection of light via a photodiode array in one ultra-compact device [1].

1 Bidirektionales OLED Mikrodisplay – BiMiD (Fraunhofer IPMS). | Bi-directional OLED microdisplay – BiMiD (Fraunhofer IPMS).



Eine zusätzliche Integration von Beleuchtungstechnik, Optik- bzw. Elektronik-Komponenten wird in dem Messsystem nicht benötigt. Der Einsatz von bidirektionalen Sensorelementen ermöglicht aufgrund der Kombination von Lichtquelle und Kamerafunktion in einem Gerät einen kompakten Sensoraufbau.

Das bidirektionale OLED-Mikrodisplay (BiMiD) (Abb. 1) basiert auf der OLED-on-CMOS-Technologie entwickelt vom Fraunhofer IPMS. Hocheffiziente organische Leuchtdioden werden in einem Nach-Prozessierungsschritt auf der obersten Metallebene eines CMOS-Chips erzeugt. Eine Bilddarstellungs- und eine Kamerafunktion sind somit in einem Siliziumchip integriert [2]. Dies bedeutet, dass in jedem OLED-Pixel zusätzlich eine Photodiode (PD) zentral integriert ist. BiMiDs können entweder simultan bzw. sequentiell hinsichtlich der OLED-Projektion und Photodiodendetektion geschaltet werden [2]. Im sequentiellen Modus projizieren die OLED-Emitter in einem Wellenlängenbereich, der von der spektralen Empfindlichkeit der Photodioden verschieden ist ( $\lambda_{\text{OLED}} \neq \lambda_{\text{Photodiode}}$ ). Im simultanen Modus emittieren die OLED-Pixel im gleichen Spektralbereich, in dem auch die Photodioden empfindlich sind. In diesem Fall können jedoch interne Störeffekte auftreten, wie zum Beispiel das Übersprechen von OLED-Pixeln auf benachbarte Photodioden. Diese Effekte müssen bei der Auslegung von Systemen berücksichtigt werden.

Am CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik in Erfurt werden opto-elektronische Sensorelemente (PuLiSe) basierend auf LED-Lichtquelle und Photodiodenmatrix entwickelt (Abb. 2). Der Anordnung der Halbleiterlichtquellen und der Photodiodensegmente sind dabei kaum Grenzen gesetzt.

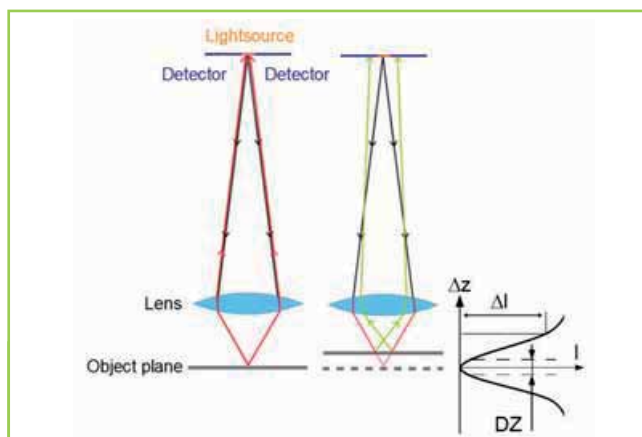
Additional integration of illumination elements, optical and electrical components is not necessary in the measurement system. Due to the combination of light source and camera function in one device the application of bi-directional sensor elements allows for a compact system setup.

The bi-directional OLED microdisplay (BiMiD) (Fig. 1) is based on the OLEDs-on-CMOS-technology developed by Fraunhofer IPMS. Highly efficient organic light emitting diodes are created in a subsequent processing step on the top metal layer of the CMOS device. Image generation and image detection are thus integrated on one single element [2]. This means that additionally a photodiode (PD) is integrated in each OLED pixel. With BiMiDs either simultaneous or sequential emission and detection can be realized [2]. In sequential mode, the OLEDs emit in a spectral range that differs from the spectral sensitivity of the photodiodes ( $\lambda_{\text{OLED}} \neq \lambda_{\text{photodiode}}$ ). In simultaneous mode of operation, the OLED pixels and the photodiodes work in the same spectral range. In this case, however, negative effects can occur, like direct crosstalk between OLEDs and photodiodes. Such effects have to be considered during system design.

At the CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik in Erfurt, opto-electronic sensor elements (PuLiSe) based on LED light sources and photodiodes were developed (Fig. 2). There are almost no limits in arranging LEDs and photodiodes on the device.

In einer ersten Applikation wurde ein Positions- und Neigungssensor basierend auf dem neu entwickelten invers-konfokalen Prinzip entwickelt. Beim invers-konfokalen Prinzip sind Sender- und Detektorflächen nebeneinander in einer Ebene positioniert, daher können bidirektionale Sensorelemente dafür eingesetzt werden (Abb. 3) [1].

Beim invers-konfokalen Messprinzip wird jeweils die Lichtquelle, d. h. beim BiMiD die leuchtenden OLED-Pixel und beim LED-Photodiodenmodul die LED, in die Messebene über eine Optik abgebildet und die Rückreflexion bzw. die Rückstreuung von der integrierten Photodiodenmatrix über die gleiche Optik detektiert. Befindet sich die Messebene direkt im Fokus des optischen Systems kann keine bzw. eine minimale Intensität ( $I(z=0) = I_{\min}$ ) detektiert werden, da die OLED-Pixel bzw. die LED in sich selbst abgebildet werden. Bei axialer Verschiebung der Messebene ( $\pm \Delta z$ ) ist die Abbildung auf das Objekt und auf den Detektor defokussiert, so dass eine Intensität ( $I(z \neq 0) > I_{\min}$ ) detektiert werden kann.



3 Invers-konfokales Sensorprinzip. | Inverse-confocal sensor principle.

In a first application a position sensor based on the innovative inverse-confocal sensor principle was developed. Light emitting and detector elements are positioned next to each other in one plane (Fig. 3). Therefore the bi-directional sensor elements can be applied for this sensor principle [1].

The inverse-confocal principle is based on imaging the light source, i. e. the emitting OLED pixels of the BiMiD or the LED of the LED-Photodiode module, via a lens onto the measurement plane. The reflection and scattering of the light is imaged backwards via the same lens onto the detector plane. When the object is in focus, the light source is imaged back onto itself. In this case a minimum intensity is detected by the photodiodes ( $I(z=0) = I_{\min}$ ). An axial displacement of the object ( $\pm \Delta z$ ) leads to the back-reflected image of the sensor being defocused and blurred. Thus an increased intensity ( $I(z \neq 0) > I_{\min}$ ) can be detected.

At each measurement position on the sensor the measured object is scanned over a range  $\Delta z$  and the associated intensity signal is recorded (Fig. 4) [3].

In contrast to confocal sensors, the inverse-confocal sensor determines the surface topography by detection of a minimum of back-scattered light. The width of the intensity minimum ("dead zone") defines the positional accuracy of the sensor. In a first application bi-directional sensor devices enable compact system setup of innovative inverse-confocal point sensors. This technology provides the opportunity for further miniaturization of different optical metrology systems.

Für jeden Messpunkt wird das Messobjekt über einen Bereich  $\Delta z$  abgetastet und das resultierende Intensitätssignal aufgenommen (Abb. 4) [3].

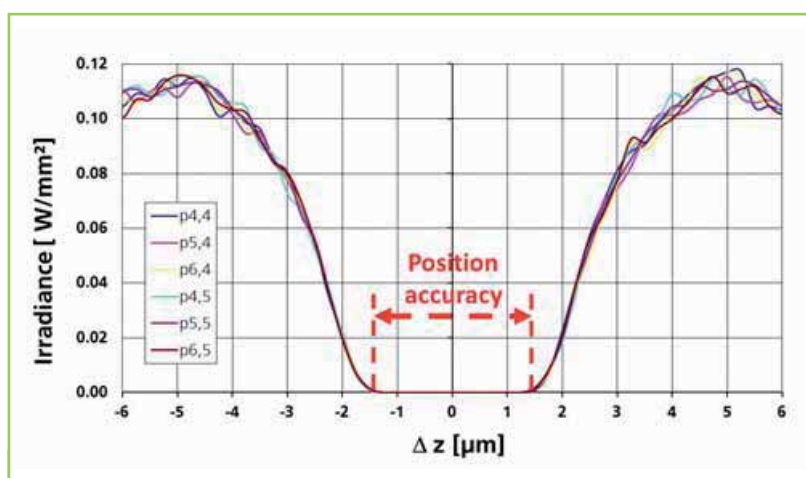
Die Bestimmung der Oberflächentopographie des Messobjektes erfolgt im Gegensatz zum konventionellen konfokalen Sensor über die Detektion eines Intensitätsminimums. Die Breite des Intensitätsminimums (sog. »Totzone«) definiert die Auflösung, d. h. die Positionsgenauigkeit des Sensors. Der Einsatz von bidirektionalen Sensorelementen ermöglicht in einem ersten Anwendungsfall die äußerst kompakte Realisierung eines neuartigen invers-konfokalen Punktsensors. Diese Technologie eröffnet Möglichkeiten für die weitere Miniaturisierung verschiedener optischer Messsysteme.

Wir danken den Kollegen des Fraunhofer IPMS für die gute Zusammenarbeit. Diese Arbeit wurde vom BMBF im Rahmen des Projekts ISEMO (FKZ 16SV3682) gefördert.

We would like to thank the colleagues from Fraunhofer IPMS for good cooperation. The project was funded by the German Federal Ministry for Education and Research (ISEMO, Project No. 16SV3682).

#### Literatur/References

- [1] Grossmann, C. et al.: Einsatz von bidirektionalen Mikrodisplays in der Messtechnik, DGaO, Ilmenau, 2011.
- [2] Richter, B. et al.: Bidirectional OLED Microdisplays: Combining Display and Image Sensor Functionality into a Monolithic CMOS Chip, ISCC, 2011.
- [3] Grossmann, C. et al.: Inverse Confocal Sensor based on a Bidirectional OLED Display, SPIE, Vol. 8167 81670Q, Marseille, 2011.



4 Simulierte Intensitätskurve (Positionsgenauigkeit des Messsystems). |  
Simulated intensity function (position accuracy of the measurement system).

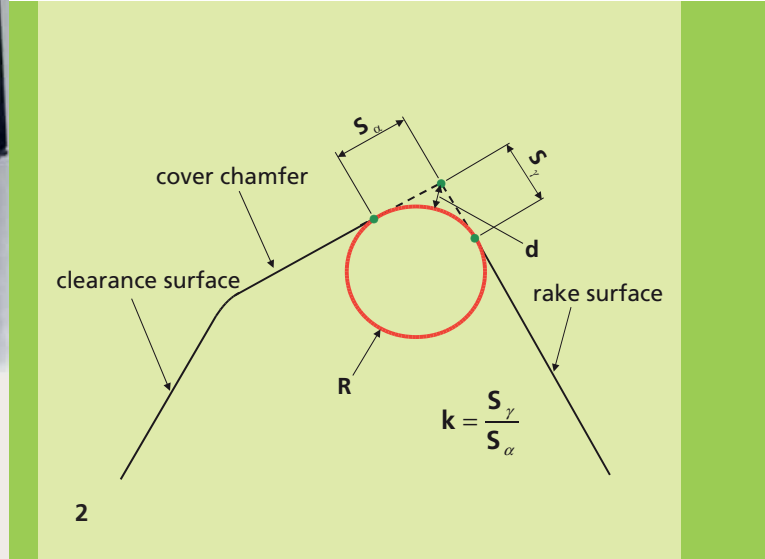
## AUTHORS

Constanze Großmann  
Uwe Lippmann  
Stefan Riehemann  
Gunther Notni

## CONTACT

Constanze Großmann  
Phone +49 3641 807-252  
constanze.grossmann@iof.fraunhofer.de





## 3D-SCHNEIDKANTENVERMESSUNG VON PRÄZISIONSSCHNEIDWERKZEUGEN

## 3D MEASUREMENT OF CUTTING EDGES ON PRECISION CUTTING TOOLS

Für die Herstellung hochgenauer geometrischer Strukturen und Formen ist die zerspanende Bearbeitung das meist genutzte Fertigungsverfahren. Um hohe Genauigkeiten zu erreichen, müssen die eingesetzten Fräs-, Dreh- und Bohrwerkzeuge hohe Ansprüche erfüllen. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal der Schneidwerkzeuge ist die Form der Schneidkante [1].

Die Schneidkanten, gebildet aus dem Keil zwischen Span- und Freifläche, sind typischerweise mit Radien zwischen 3 bis 50 µm verrundet (Abb. 2). Neben dem Verrundungsradius haben die Kantensymmetrie, die Abflachung und die Schartigkeit großen Einfluss auf den zerspanenden Fertigungsprozess.

Für diese Messaufgabe wurde vom IOF ein streifenprojektionsbasierter 3D-Sensor entwickelt, mit dem die Topografie der Schneidkante erfasst werden kann (Abb. 1). Diese Entwicklung erfolgte im Rahmen des Applikationszentrums mikrooptische Systeme (amos). Aus der Topographie können Schneidkantengeometrien abgeleitet werden. Die Topographie der Schneidkante wird in einem Volumen von 700 x 500 x 50 µm<sup>3</sup> mit einer lateralen Auflösung von 1,2 µm erfasst, wodurch die Bestimmung von Verrundungsradien bis 3 µm mit einer Wiederholpräzision des Radius von ≤ 1 µm ermöglicht wird. Die erfasste Oberflächentopographie wird durch einen neu entwickelten Algorithmus verarbeitet,

Conventional machining is the most used manufacturing technique in producing structures and forms with high accuracy. The milling, turning and drilling tools used must fulfill exacting demands to achieve this precision. The form of the cutting edges is one important feature with a large influence on the machining process [1].

The cutting edges are located on the tip between the tool's rake and clearance surface (Fig. 2). Their radius is typically between 3 and 50 µm. In addition to the radius, the edge symmetry, the flattening and the chipping have a large influence on the machining process.

1 Schneidkantensensor mit einer Wendeschneidplatte. | 3D-Cutting edge sensor with indexable insert.

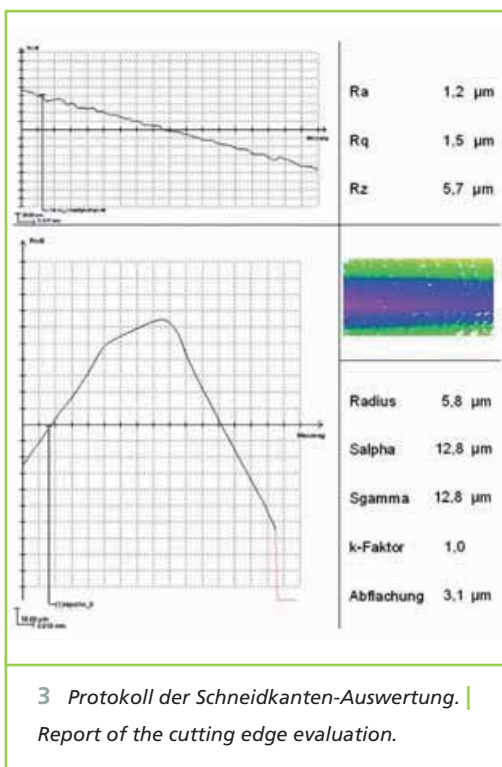
2 Kenngrößen an der Schneidkantenverrundung (R – Verrundungsradius,  $S_\alpha$  &  $S_\gamma$  – Schneidenabschnitte, k – Symmetrie-Faktor, d – Abflachung). | Characteristic parameters of a rounded cutting edge (R – edge rounding radius,  $S_\alpha$  &  $S_\gamma$  – edge sections, k – symmetry-factor, d – flattened area).

um die charakteristischen Kenngrößen der Schneidkante zu ermitteln. Die dreidimensionale Form der Kante wird durch mathematische Verfahren reduziert, wodurch der Einfluss von Oberflächenrauheit und Sensorrauschen auf die Auswertung vermindert wird. Aus dem ermittelten Querschnitt werden der Radius, die Symmetrie, die Abflachung und die Schartigkeit berechnet (Abb. 3).

#### Literatur/References

- [1] Denkena, B. (Hrsg): Lasertechnologie für die Generierung und Messung der Mikrogeometrie an Zerspanwerkzeugen. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2005.

A fringe projection based 3D sensor was developed for this measurement task by IOF with which the topography of the cutting edge can be recorded (Fig. 1). This development was done within the scope of the "Application Centre Microoptical Systems (amos)". The geometry of the cutting edge can be derived from this topography. The fringe projection sensor-head allows measuring the cutting edge topography in a volume of  $700 \times 500 \times 50 \mu\text{m}^3$ . The lateral resolution of  $1.2 \mu\text{m}$  enables the determination of edge rounding radii down to  $3 \mu\text{m}$  with repeatability of the radius  $\leq 1 \mu\text{m}$ . The recorded surface topography of the cutting edge is processed with a newly developed algorithm to determine the characteristic parameters. The three-dimensional data of the edge is reduced to a 2D cross-section through mathematical methods. In this way the influence of surface roughness and sensor noise on the evaluation is reduced. The radius, the symmetry, the flattening and the chipping of the cutting edge are calculated from the determined cross-section (Fig. 3).

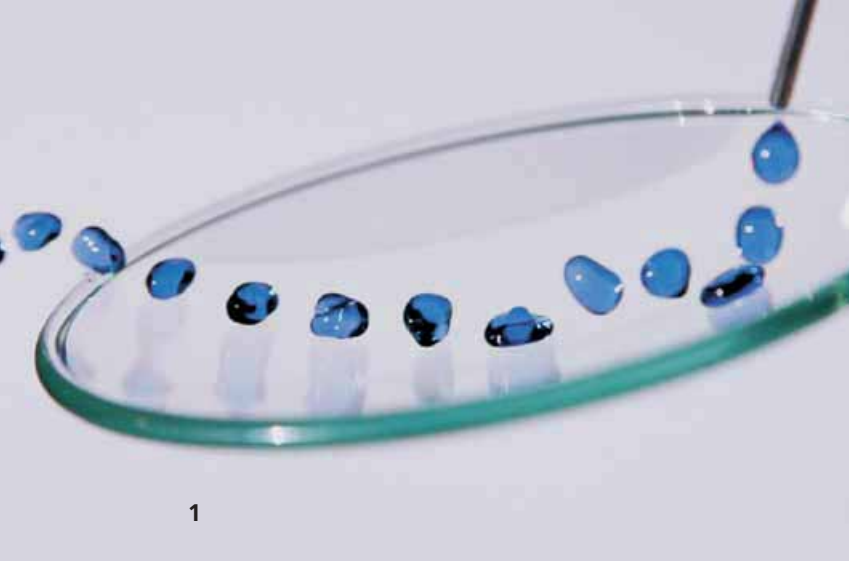


## AUTHORS

*Peter Kühmstedt*  
*Roland Ramm*  
*Matthias Heinze*  
*Ingo Schmidt*  
*Gunther Notni*

## CONTACT

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



# ANWENDUNGSORIENTIERTE BENETZUNGS-ANALYSE HYDROPHOBER OBERFLÄCHEN

## APPLIED WETTING ANALYSIS OF HYDROPHOBIC SURFACES

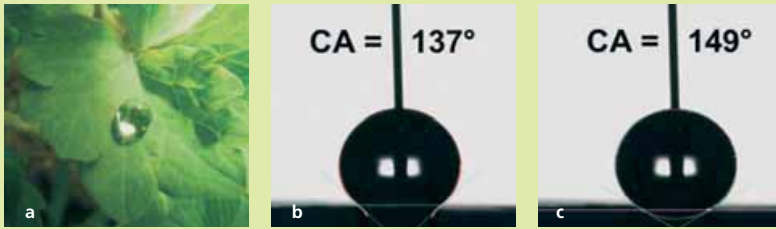
Das Benetzungsverhalten hydrophober Oberflächen ist insbesondere für die Reinigung sehr verschiedener Funktionsflächen entscheidend. Um die Benetzungseigenschaften geeignet bewerten und vergleichen zu können, sind definierte sowie anwendungsorientierte Analysemethoden erforderlich. Dazu wurde am Fraunhofer IOF eine Methodologie für eine komplexe, belastbare und gleichzeitig praxisrelevante Benetzungsanalyse erarbeitet.

Die wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung des Benetzungsverhaltens einer Funktionsfläche stellen die Kontaktwinkel (KW) dar. Im Falle einer realen Oberfläche bewirken Rauheit und chemische Heterogenitäten ein großes Spektrum an metastabilen makroskopischen KW. Unsere systematischen Untersuchungen an unterschiedlichsten Oberflächen zeigten, dass zur vollständigen Beschreibung dieses Spektrums die Ermittlung der Fortschreite- und Rückzugswinkel unumgänglich ist.

The wetting behavior of hydrophobic surfaces is especially critical for the cleaning process of a wide range of functional surfaces. Suitable evaluation and comparison of the wetting properties requires analysis methods that are well defined and focus on the particular application. For this purpose, a methodology for a complex, reliable, and practically relevant wetting analysis was developed at Fraunhofer IOF.

The main parameters for describing the wetting behavior of a functional surface are the contact angles (CA). In case of a real surface, roughness and chemical heterogeneities lead to a wide range of metastable apparent CA. Our systematic investigations of a large variety of surfaces revealed the absolute necessity of determining the advancing CA and receding CA for complete characterization.

**1** *Eingefärbter Wassertropfen perlt rückstandslos von superhydrophoben Oberfläche ab. | Colored water drop jumps off a superhydrophobic surface without residues.*



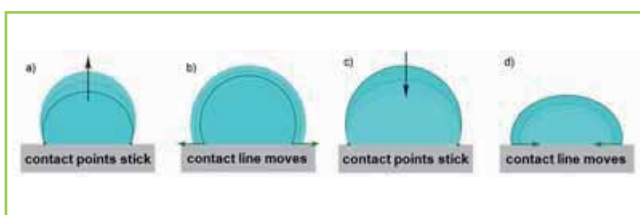
3

Dies erfolgt durch eine Volumenvariation des auf der Oberfläche aufgesetzten Tropfens mit Hilfe der »needle-in-drop« Methode: Bei Erhöhung des Volumens bleiben die Kontaktpunkte zunächst fest (Abb. 2a) bis der maximale KW (Abb. 2b, Fortschreitewinkel ACA) erreicht wird. Bei anschließender Volumenverringerng (Abb. 2c und d) stellt sich der Rückzugswinkel RCA als minimaler KW ein und die Kontaktlinie zieht sich zurück. Die Differenz von ACA und RCA wird als KW-Hysterese bezeichnet.

Während der KW-Messung ist auf mehrere Einflussfaktoren zu achten, welche die Messergebnisse verfälschen können. Dies sind u. a. Tropfensymmetrie, sowie Kontrast zwischen Tropfen, Probenoberfläche und Hintergrund. Letzteres wird wesentlich durch die Probenbeschaffenheit beeinflusst, wodurch die ermittelten KW unter- bzw. überbewertet werden können. Beispielsweise wird der KW eines Tropfens auf leicht gewölbten Pflanzenoberflächen durch eine automatisierte Tropfenkonturauswertung mittels Tangentenmethode um etwa 10° geringer ermittelt (Abb. 3b) im Vergleich zur manuellen Auswertung (Abb. 3c).

This is realized by the deposition of a drop with varying volume using the "needle-in-drop" method: While increasing the volume of the drop, the contact points initially seem to be fixed (Fig. 2a) until the highest CA (Fig. 2b advancing contact angle ACA) is reached. By decreasing the volume (Fig. 3c and d), the receding contact angle RCA as the minimum CA becomes apparent and the contact points recede. The difference between ACA and RCA is called CA hysteresis.

When measuring the CA, it is important to pay attention to several influencing factors affecting the measurement results. These include drop symmetry, as well as the contrast between the drops, sample surface, and background. The latter is significantly affected by the nature of the sample. This could result in an under or over estimation of the determined CA. For example, the CA of a drop on a slightly curved plant surface is around 10° less (Fig. 3b) when determined by an automated drop shape analysis compared to the manual drop shape analysis (Fig. 3c).



2 Fortschreite- und Rückzugswinkelmessung: a) & b) Aufdosieren des Volumens, c) & d) Abdosieren des Volumens. | Advancing and receding contact angle measurement. a) & b) increasing volume, c) & d) decreasing volume.

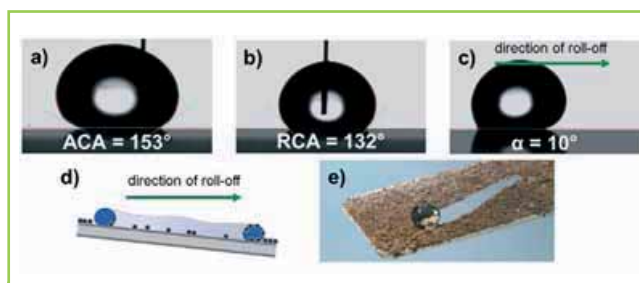
3 a) Superhydrophobes Akeleiblatt, b) automatisierte und c) manuelle Tropfenkonturauswertung. | Superhydrophobic aquilegia leaf (a), automated (b) and manual drop shape analysis (c).

Weiterhin zeigte sich, dass für eine aussagekräftige Benetzungsanalyse hydrophober Oberflächen das Abroll- bzw. Abgleitverhalten von Wassertropfen entscheidend ist. Dazu wird der minimale Neigungswinkel  $\alpha$  einer Oberfläche bestimmt, bei dem Tropfen abrollen/abgleiten (Abb. 4c). Bei Oberflächen mit hohen ACA, auf denen Tropfen bei Probenneigung aufgrund einer hohen KW-Hysterese eher haften als abrollen/abgleiten, wird zusätzlich ein am Fraunhofer IOF entwickelter Abperltest durchgeführt. Dabei wird ein Tropfen aus einer definierten Höhe auf eine um maximal 40° geneigte Oberfläche fallen gelassen und ein Abperlwinkel  $\alpha_{bo}$  definiert. Dieser ist dann der minimale Neigungswinkel, bei denen der Tropfen von der Oberfläche rückstandslos abperlt (Abb. 5c).

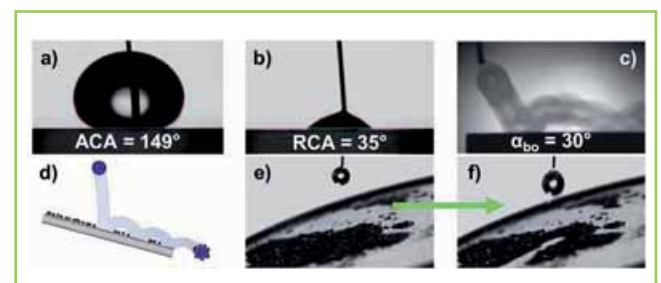
Messtechnisch wird die Benetzungsanalyse über das KW-Messsystem OCA20 realisiert, welches über eine elektronische Dosiereinheit, motorisierte Kippvorrichtung sowie Videoaufzeichnung verfügt.

Furthermore, knowledge of the slide-off and roll-off behavior of water drops is crucial for a meaningful wetting analysis of hydrophobic surfaces. For this purpose, the minimum tilt angle  $\alpha$  of the surface, which causes a drop to start sliding or rolling off, is determined (Fig. 4c). Drops tend to stick on surfaces with large ACA and large CA hysteresis, rather than to slide or roll off. Because of this effect, an additional bouncing test was developed at Fraunhofer IOF. This test is based on a drop falling from a defined height onto a tilted surface ( $\leq 40^\circ$ ). The corresponding bounce-off angle  $\alpha_{bo}$  is measured as the minimum tilt angle at which the drop jumps off the surface without residues (Fig. 5c).

Technically, the wetting analysis is performed using a CA measurement system which is equipped with an electronic dosing system, a motorized tilting base unit, as well as video recording.



**4 Superhydrophobie entsprechend theoretischem Kriterium.** a) Fortschreite-, b) Rückzugs-, c) Abrollwinkel, d) & e) Selbstreinigungsversuch. | Superhydrophobicity defined by theoretical criterion. a) advancing, b) receding contact angle, c) roll-off angle, d) & e) self-cleaning effect.



**5 Superhydrophobie entsprechend praxisrelevantem Kriterium.** a) Fortschreite-, b) Rückzugs-, c) Abperlwinkel, d) ... f) Selbstreinigungsversuch. | Superhydrophobicity according to practical aspects. a) advancing, b) receding contact angle, c) bounce-off angle, d) ... f) self-cleaning test.

Obwohl der Begriff der »Superhydrophobie« schon seit Langem für wasserabweisende Oberflächen sowohl in der Wissenschaft als auch im Alltag Verwendung findet, ist bis heute keine einheitliche Bezeichnung sowie Definition in der Literatur zu finden. Am Fraunhofer IOF wurde die Superhydrophobie zunächst durch ein strenges theoretisches Kriterium ( $ACA \geq 150^\circ$ ; geringe KW-Hysterese und Abrollwinkel  $\alpha \approx 20^\circ$ ) definiert [1].

Systematische Untersuchungen mit industriellen Partnern ergaben jedoch, dass dieses strenge Kriterium hinsichtlich möglicher Applikationsbereiche nicht immer zwingend erforderlich ist, vielmehr wäre eine Betrachtung unter funktionalen Aspekten sinnvoller. Aus diesem Grund wurde zusätzlich ein »entspannteres«, aber für zahlreiche praktische Anwendungen hinreichendes Superhydrophobiekriterium eingeführt [2]:  $ACA \geq 140^\circ$  und Abperlwinkel  $\alpha_{bo} \leq 40^\circ$ . Sobald eine funktionale hydrophobe Oberfläche eines der beiden Kriterien erfüllt, lässt sich der Effekt der Selbstreinigung beobachten. Die Bezeichnung der Oberfläche erfolgt dann als superhydrophob mit entsprechender Spezifizierung (Abb. 4 und 5) und liefert mithin für den Anwender klare und eindeutige Informationen.

Although the term "superhydrophobic" has appeared in everyday life and in science for a long time, there is neither a generally accepted term nor definition in the literature as of yet. Initially, we had defined superhydrophobicity through a strict theoretical criterion ( $ACA \geq 150^\circ$ ; low CA hysteresis and roll-off angle  $\alpha \approx 20^\circ$ ) [1].

Nevertheless, systematic investigations in cooperation with industrial partners revealed that this strict criterion was not always suitable for all potential applications, but rather a consideration focusing on functional aspects proved more useful. For that reason, an additional "relaxed" (but sufficient for a wide range of practical applications) criterion of superhydrophobicity was introduced [2]:  $ACA \geq 140^\circ$  und bounce-off angle  $\alpha_{bo} \leq 40^\circ$ . As soon as a functional hydrophobic surface fulfills one of the two criteria, self-cleaning can be observed. The surface is then called superhydrophobic with corresponding specification (Fig. 4 and 5). Thus, clear and unambiguous information is provided to the user.

## Literatur/References

- [1] Flemming, M.; Coriand, L.; Duparré, A.: Ultra-hydrophobicity Through Stochastic Surface Roughness, *Journal of Adhesion Science and Technology* 23 (2009) 381–400.
- [2] Coriand, L.; Mitterhuber, M.; Duparré, A.: Definition of roughness structures for superhydrophobic and hydrophilic optical coatings on glass, *Appl. Opt.* 50 (2011) C257–C263.

## AUTHORS

*Luisa Coriand*

*Erik Forwerk*

*Angela Duparré*

## CONTACT

*Dr. Angela Duparré*

*Phone +49 3641 807-216*

*angela.duparre@iof.fraunhofer.de*





# GEOMETRIEANALYSE MECHANISCHER SYSTEME MITTELS COMPUTERTOMOGRAPHIE

## DIMENSIONAL ANALYSIS OF HIGH PRECISION SYSTEMS USING COMPUTED TOMOGRAPHY

Das dimensionelle Messen durch taktile und optische Verfahren zählt zu den etablierten Methoden. Diese Methoden ermöglichen in den meisten Fällen die zerstörungsfreie dreidimensionale Messwerterfassung mit hoher Genauigkeit. Beide Messverfahren haben aber den Nachteil, dass Strukturen innerhalb von Objekten oder in montierten Systemen nicht erfassbar sind. Eine geeignete Lösung derartiger Messprobleme stellt die Röntgen-Computertomographie dar [1, 2].

Ein Beispiel für die dimensionelle Analyse innerer Strukturen ist der Demonstrator eines miniaturisierten Draht-Deflektors. Um eine schnelle und präzise Ablenkung von Elektronenstrahlen zu gewährleisten, muss das System hohe Genauigkeitsanforderungen erfüllen. Die wesentlichen Komponenten des Deflektors sind 24 dünne, kreisförmig angeordnete Golddrähte. Die Lenkung von Elektronen wird erreicht, indem an jedem Draht individuell eine bestimmte Spannung angelegt wird. Die Drähte sind an zwei fest verbundenen Flanschen mittels der Solderjet Bumping Technik verlötet [3].

Established techniques for dimensional measurements are tactile probing and optical fringe projection. These methods allow in most cases a non-destructive three-dimensional measurement with high accuracy. A disadvantage of both methods is that inner structures within objects or assembled systems are inaccessible. A proper technique to solve these problems is x-ray computed tomography [1, 2].

One example for the measurement of inner structures is the demonstrator of a miniaturized wire deflector. Multi-beam lithography systems require fast and precise e-beam deflection, which assumes high demands on their accuracy. The key components of this deflector are 24 thin gold wires arranged in a regular circle. Each wire has an individually contacted electrode. The deflection of the e-beam is controlled, by applying specific voltages on each wire. The electrodes are soldered to two permanently connected flanges using the Solderjet Bumping technique [3].

1 CT-System am Fraunhofer IOF. | CT-System at Fraunhofer IOF [2].

2 Doppelröhren-Strahlquelle des CT-Systems. | Double x-ray beam source in the CT-System [2].



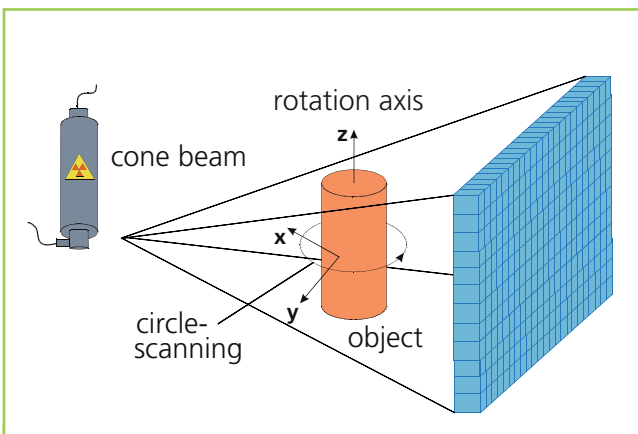
4

Das Drahtsystem ist zwischen den Flanschen durch einen Titanzylinder (Durchmesser 50 mm) geschützt. Die geforderte Positionsgenauigkeit der Drähte liegt unter 10 µm. Neue Montagetechniken wurden hierzu am Fraunhofer IOF entwickelt. Die Montagekontrolle erfolgte mittels Röntgen-Computertomographie. Nur dieses Messverfahren kann die Golddrähte durch den Titanzylinder zerstörungsfrei erfassen.

The wire system between the flanges is protected by a hollow titanium cylinder (diameter 50 mm). The application of the wire deflector requires a wire-position accuracy of less than 10 µm. Fraunhofer IOF developed new techniques to assemble the system. X-ray computed tomography is the only method to measure the gold wires through the titanium cylinder without destruction.

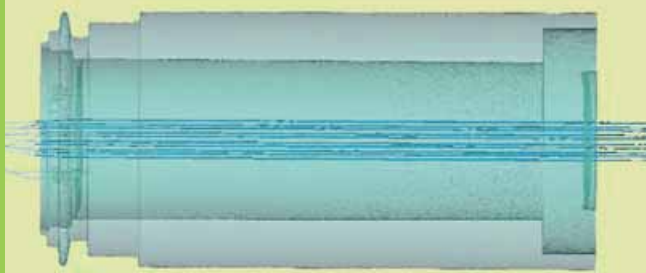
Die Probe wird zur Messung auf einem Drehtisch zwischen einer Röntgenquelle und einem Detektor platziert (Abb. 3). Am Fraunhofer IOF wird eine Doppelröhren-CT-Anlage (Abb. 1) genutzt. Hier stehen zwei wählbare Röntgenquellen zur Verfügung (Abb. 2). Die nanofocus-Röhre kann kleine Objekte mit einer Auflösung bis zu 0,5 µm messen, die microfocus-Röhre ermöglicht durch die höhere Strahlleistung die Messung von stark absorbierenden Materialien. Die Anlage verfügt über einen flächigen Detektor mit 2048 x 2048 Pixel. Von dem Messobjekt wird eine Vielzahl von Durchstrahlungsbildern in unterschiedlichen Winkelstellungen aufgenommen (Abb. 4).

During the measurement the sample is positioned on a rotary table between an x-ray source and a detector (Fig. 3). Fraunhofer IOF uses a CT-system (Fig. 1) with a flat-panel detector consisting of 2048 x 2048 pixel and two selectable x-ray sources (Fig. 2). The nanofocus source is used to measure small objects with a resolution up to 0.5 µm, the more powerful microfocus source is used to measure high absorbing materials. A plurality of 2D x-ray images in different angular positions are recorded from the sample (Fig. 4).

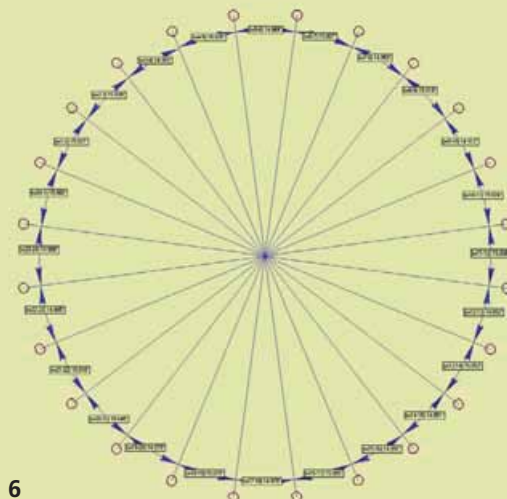


3 Prinzip der Röntgen-Computertomographie. | Principle of x-ray computed tomography [2].

4 Durchstrahlungsbild des miniaturisierten Draht-Deflektors und CAD-Modell. | X-ray image of the miniaturized wire-deflector and CAD-model.



5



6

Durch die nachfolgende Rekonstruktion können die Absorptionskoeffizienten jedes Punktes (Voxel) innerhalb des Objektes berechnet werden. Ein wichtiger Parameter einer CT-Messung ist die Voxelgröße. Da das Objekt vollständig im Kegelstrahl liegen muss, wird die erreichbare Voxelgröße primär durch die Objektgröße bestimmt.

Die Kontrolle der Drahtpositionen im Deflektor erfordert eine kleinere Voxelgröße als der Drahtdurchmesser (100 µm). Die Größe des kompletten Deflektor-Systems ermöglicht nur eine Voxelgröße von 45 µm. Die Voxelauflösung kann erhöht werden, indem das System in drei »Zoom-Messungen« vermessen wird. Durch diesen Ansatz können die Drähte mit einer Voxelgröße von 7,6 µm über deren gesamte effektive Länge von 80 mm vermessen werden.

Das gemessene Voxelmodell wird im ersten Schritt auf Defekte untersucht. Danach wird zur geometrischen Kontrolle der Drahtpositionen in einem Zwischenschritt die Drahtoberfläche durch einen Schwell-Grauwert berechnet und extrahiert. Die Oberfläche wird in ein Polygonmodell konvertiert und kann geometrisch ausgewertet werden (Abb. 5).

Die Drahtpositionen werden jeweils anhand des Winkels zum Nachbardraht und des Abstandes zum Zentrum aller Drähte bestimmt. Diese Werte werden für alle 24 Drähte in drei Querschnitten durch das Drahtmodell ausgewertet (Abb. 6).

In the subsequent reconstruction process the absorption coefficient of each point (voxel) in the inner object are calculated. An important parameter of CT-measurements, especially for dimensional analyses, is the voxel size. One voxel represents the smallest detectable volume element. The achievable voxel size is primarily defined by the size of the sample, because it is necessary to fit the whole sample completely into the cone beam.

To control the wire positions within the deflector the voxel size must be smaller than the diameter of the wires (100 µm). The size of the entire deflector system only allows a voxel size of 45 µm. A higher resolution is achieved by measuring the system in three single "zoom-measurements" (top, middle and down part). With this approach a voxel size of 7.6 µm is realized and the wire positions can be controlled over their whole effective length of 80 mm.

In the first step the voxel data is controlled with respect to defects. Afterwards the geometrical analyses of the wire positions require an intermediate step. The extraction of the wire surfaces is made by defining a threshold grey value between material and background. The surface is converted into a polygonal model for geometrical analyzes (Fig. 5).

The control of the wire positions is done by determining the angles between adjacent wires and the distances between the centers of single wires to the center over all wires. These values were controlled for all 24 wires in three cross-sections within the polygonal model, in the top, middle and lower part (Fig. 6).

5 Rekonstruiertes Drahtmodell. | Reconstructed wire-model.

6 Analyse der Drahtposition innerhalb eines Querschnittes durch das Drahtmodell. | Analysis of the wire positions in a cross-section of the wire-model.

Der 15°-Winkel zwischen zwei Nachbardrähten zeigte eine Standardabweichung von 0,036° und eine maximale Abweichung von 0,085°. Der Drahtabstand zum Zentrum beträgt im Mittel 6,01 mm mit einer Standardabweichung von 4,8 µm. Die Draht-Positionsgenauigkeit von ± 10 µm wurde im Demonstrator erfolgreich realisiert.

Mit diesen Ergebnissen kann die Montagetechnik optimiert werden. Die Röntgen-Computertomographie zeigte sich als geeignetes Verfahren zur Kontrolle präzisionsmechanischer Systeme.

The nominal angle of 15° between two adjacent wires showed a standard deviation of 0.036° with a maximum deviation of 0.085°. The distance of one wire to the overall center is averaged 6.01 mm with a standard deviation of 4.8 µm. The wire position accuracy of ±10 µm is successfully achieved in the demonstrator.

The assembly technique is refined using these results. X-ray computed tomography proved to be a proper technique to assure the functionality of high precision systems.

## Literatur/References

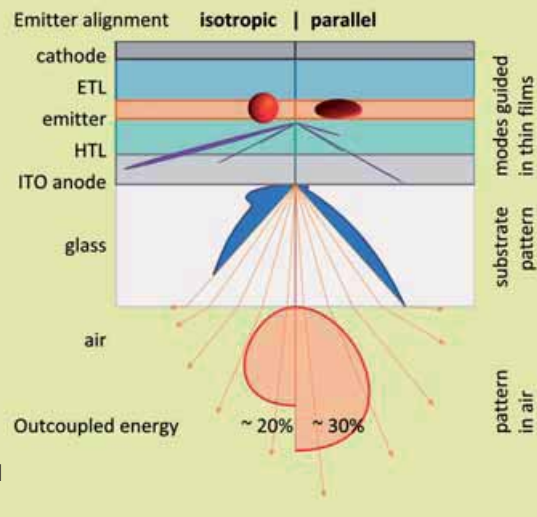
- [1] Kruth, J. P. et. al: Computed tomography for dimensional metrology. Elsevier, CIRP Annals Manufacturing Technology 60 (2011) 821–842.
- [2] Notni, G.; Kühmstedt, P.; Schmidt, I.; Großmann, C.: Dual-beam CT for measurements of precision mechanical components and optical systems. High-Resolution X-ray CT Symposium, 31.08.–02.09.2010, Dresden, Germany.
- [3] Beckert, E.; Oppert, T.; Azdasht, G.; Zakel, E.; Burkhardt, T.; Hornaff, M.; Kamm, A.; Scheidig, I.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.; Buchmann, F.: Solder Jetting – A Versatile Packaging and Assembly Technology for Hybrid Photonics and Optoelectrical Systems. IMAPS 42<sup>nd</sup> International Symposium on Microelectronics, Proceedings, pp. 406 (2009).

## AUTHORS

*Ingo Schmidt*  
*Roland Ramm*  
*Peter Kühmstedt*  
*Stefan Risse*  
*Gunther Notni*

## CONTACT

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



## EFFIZIENTERE OLEDs DURCH ORIENTIERTE TRIPLETT EMITTER

### OLED EFFICIENCY ENHANCEMENT BY ORIENTED TRIPLET EMITTERS

Die Effizienz von Organischen LED («OLED») wird maßgeblich durch die elektrolumineszierenden Moleküle im aktiven Dünnschichtstapel der OLED bestimmt. Dafür ist zunächst die Quanteneffizienz [1] dieser Emitter entscheidend, weshalb aktuell bevorzugt niedermolekulare Triplett-Emitter eingesetzt werden. Daneben spielt die Emitterorientierung eine entscheidende Rolle: Aufgrund des Dipolcharakters der Lichtemission geben isotrop orientierte Emitter ihre Anregungsenergie in alle Richtungen gleichmäßig ab, wohingegen parallel zu den Grenzflächen des Dünnschichtsystems orientierte Emitter eher senkrecht zum Dünnschichtstapel und daher in die gewünschte OLED-Nutzrichtung leuchten. Eine Ausrichtung der Dipolübergangsmomente parallel zu den Grenzflächen reduziert somit die Anregung von geführten Moden des Dünnschichtsystems sowie die Emission von Substratstrahlung (Abb. 1), und steigert folglich die OLED-Effizienz. Triplett-Emitter wurden wegen der geringen Molekülgröße und der Herstellung mittels thermischer Bedampfung bisher stets als isotrop orientiert betrachtet.

Die optische Untersuchung von OLEDs erlaubt die Analyse der Emittereigenschaften [2]. Für den Fall eines niedermolekularen, roten Triplett-Emittermaterials konnte erstmals eine bevorzugt parallele Emitterorientierung in derartigen aktiven Systemen nachgewiesen werden. Das Strahlungsfeld einer speziellen OLED in Abb. 2 zeigt, dass dieser Emitter

The efficiency of Organic LEDs (“OLEDs”) is basically determined by the properties of the electroluminescent molecules inside the active thin film stack. First, the internal quantum efficiency [1], the most critical parameter is maximized, when applying low molecular weight triplet emitting guest-host systems.

Another important feature is the orientation of active states: Because the emissive process is a dipole transition, isotropic oriented emitters uniformly emit energy into all spatial directions. By contrast, emitters aligned in parallel to the interfaces preferably emit the light perpendicular to the thin film stack and thus in the desired direction of use. Aligning the dipole transition moments in-plane with the layered system decreases both the excitation of thin film guided modes and the emission of light trapped at large angles inside the substrate glass (Fig. 1), and as a result enhances the OLED efficiency. Because of thermal evaporation and the small-molecular size, present day triplet emitters have been assumed to be isotropic oriented.

1 Kanäle der Lichtemission im OLED Schichtsystem für isotrop sowie parallel orientierte Emitter. | Light emission channels in the OLED's thin film system for emitters aligned isotropic and parallel.

deutlich vom konventionell angenommenen isotropen Fall abweicht [3]. Dadurch wird ein gänzlich neuer Ansatz zur OLED Optimierung eröffnet, denn parallel orientierte Triplett-Emitter versprechen eine OLED-Effizienzsteigerung von bis zu 50 %.

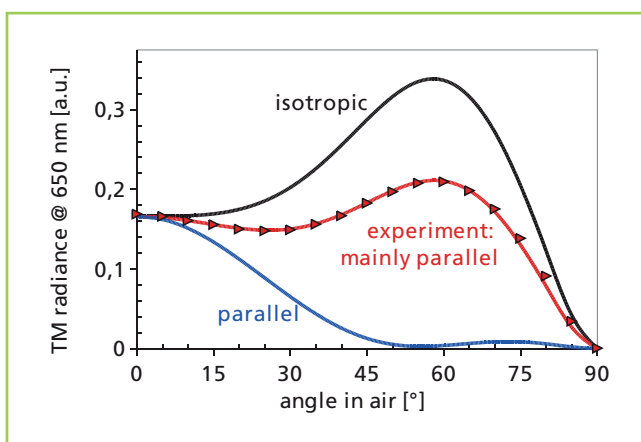
Die Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit OSRAM Opto Semiconductors Regensburg im Rahmen des BMBF Projekts »TOPAS2012« (FKZ 13N10474) durchgeführt.

#### Literatur/References

- [1] Flämmich, M. et al.: In situ measurement of the internal luminescence quantum efficiency in organic light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett. 95 (2009) 263306.
- [2] Flämmich, M. et al.: Accessing OLED emitter properties by radiation pattern analyses, Org. Electron. 12 (2011) 83–91.
- [3] Flämmich, M. et al.: Oriented Phosphorescent emitters boost OLED efficiency, Org. Electron. 12 (2011) 1663–1668.

Optical analysis of OLEDs enables derivation of the emissive properties [2]. A preferred parallel orientation of the emitter transition moments was proved for the very first time in the case of a small molecular, red triplet emitting material. The emission pattern of a specially adapted OLED system clearly exhibits deviations from the common isotropic case [3], as shown in Fig. 2. This finding opens up an unforeseen approach for OLED optimization because parallel aligned triplet emitters promise up to 50 % efficiency improvement.

The authors acknowledge fruitful cooperation with OSRAM Opto Semiconductors Regensburg in the BMBF funded project "TOPAS2012" (FKZ 13N10474).



2 Winkelabhängige Emission einer speziellen OLED zur Messung der Emitterorientierung. | Angular emission of an adapted OLED for measuring the dipole orientation distribution [3].

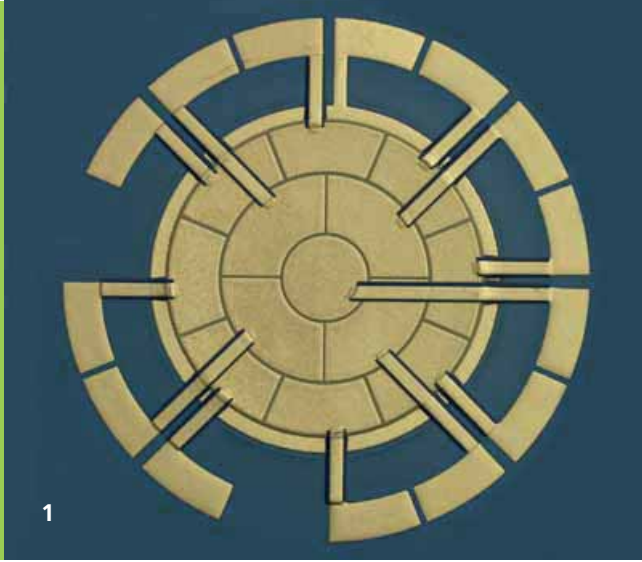
## AUTHORS

Michael Flämmich  
Dirk Michaelis  
Norbert Danz

## CONTACT

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





## DEFORMIERBARE MULTILAYER-SPIEGEL MIT PARALLELEN FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN

### MULTILAYER DEFORMABLE MIRRORS BASED ON WAFER-LEVEL MANUFACTURING

Deformierbare Unimorph-Spiegel werden seit vielen Jahren erfolgreich zum Ausgleich thermischer Linsen eingesetzt. Der Erfolg dieser Technologie beruht einerseits auf dem einfachen Spiegelaufbau, bestehend aus einer piezoelektrischen Scheibe, die auf ein passives Substrat geklebt wird, und auf der Verwendung von standardisierten, hochleistungsbeständigen optischen Spiegelbeschichtungen. Einschränkungen unterliegen die Spiegel jedoch dadurch, dass diese vorwiegend manuell hergestellt werden und die Verbindung zwischen Substrat und piezoelektrischer Scheibe typischerweise über Klebtechnik erfolgt.

Andere Spiegeltypen werden inzwischen fast ausschließlich mit Technologien der Fertigung auf Waferlevel hergestellt. Das verringert den Fertigungsaufwand bei gleichzeitig steigender Aktordichte und Miniaturisierbarkeit. In dem hier vorgestellten Design wird der deformierbare Spiegel auf Basis eines LTCC Mehrlagensubstrates aufgebaut. Die Kontaktierungselektroden und die piezoelektrische Schicht werden über Siebdruck auf der Substratrückseite abgeschieden und mit dem Substrat versintert [1].

Deformable unimorph mirrors have been successfully applied to compensate for thermal lenses for many years. This success is based on the simple mirror setup constructed from a piezoelectric disk, adhesively bonded on the rear of a passive mirror substrate, on the one hand, and also on the utilization of standardized high-power compatible optical coatings. However, these deformable mirrors are restricted by their predominantly manual manufacturing and the typical adhesive joint between piezoelectric disk and substrate.

Today's manufacturing of other active mirror types relies almost completely on wafer level processes. Wafer level processes reduce the manufacturing costs while simultaneously increasing actuator density and miniaturization capability. This proposed design relies on the construction of the deformable mirror based on LTCC multilayer substrate. Electrical conducting electrodes and piezoelectric layer are deposited by screen printing on the rear of the LTCC substrate and sintered [1].

1 Siebgedruckte Aktor- und elektrische Kontaktierungsstruktur. | Screen printed actuator and electrical contact structure.



Die Verwendung des Siebdruckverfahrens ist besonders vorteilhaft, da die Aktor- und Elektrodenstruktur zuverlässig mit einer sehr guten Auflösung und die Elektrodenstruktur zur Aktorkontaktierung mehrlagig gedruckt werden können sowie die piezoelektrische Siebdruckpaste hervorragende Aktoreigenschaften aufweist.

Die aktivierbare Spiegelmembran wird anschließend über das Verfahren des Solderjet Bumping [2, 3] mit der Spiegelfassung verbunden und nachfolgend galvanisch mit Kupfer beschichtet. Die verwendeten Technologien sind ausschließlich parallele Waferleveltechnologien (Siebdruck, Galvanik, LTCC-Substrat) bzw. Prozesse, die von der miniaturisierten Elektronikkontaktierung adaptiert wurden (Solderjet Bumping).

Damit wurden aufwendige manuelle Prozesse gegen effizientere Fertigungsmethoden ersetzt. Die Bearbeitung der Spiegelfläche erfolgt über einen ultrapräzisen Drehprozess. Dadurch wird die optische Qualität der Spiegelfläche sichergestellt, zur Überprüfung des Fertigungsergebnisses kann auf moderne optische Messtechnik (Wellenfrontsensorik, Interferometrie) zurückgegriffen werden. Die optische Spiegelfläche kann anwendungsspezifisch mit einer hochreflektierenden Schicht versehen werden.

The use of screen printing is particularly advantageous, since actuator and electrodes can be printed reliably with high resolution, electrodes for actuator contact can be multi-layer printed and the piezoelectric thick film has superb actuating capabilities.

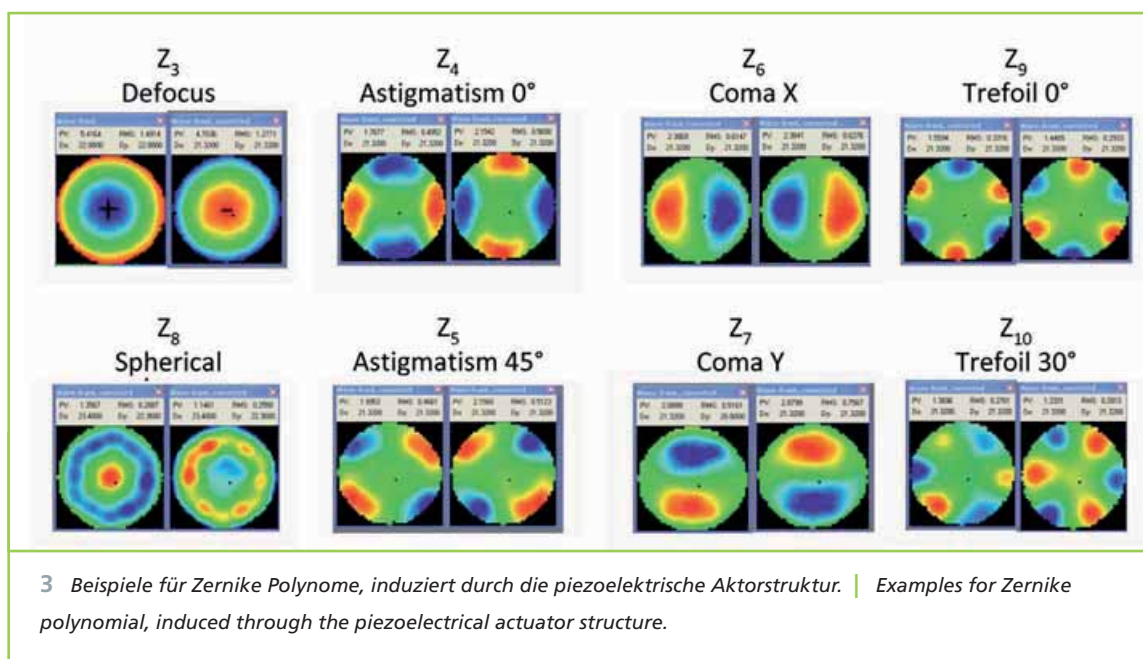
The actuated mirror membrane is finally connected with its mount by Solderjet Bumping [2, 3] and subsequently electroplated with a copper coating. The technologies used are exclusively wafer level based (screen printing, electroplating, LTCC substrate) or processes adapted from miniaturized electronic wiring (Solderjet Bumping).

This substitutes more efficient manufacturing methods for the expensive manual processes. Machining of the mirror membrane is done by ultra-precise diamond turning. This ensures optical quality of electroplated copper, whose machined quality is verified by modern optical measuring technology (Shack-Hartmann-Wavefront sensor, interferometer). An optical coating can be provided on the mirror-surface specific to the application.

2 *Hergestellter deformierbarer Spiegel mit Goldbeschichtung, eingebaut in Spiegelhalter. | Manufactured deformable mirror with gold coating, installed in mirror holder.*

Abhängig von der Position der 19 Aktoren auf der Spiegelmembran liegt die piezoelektrisch generierte Deformation zwischen 1,5  $\mu\text{m}$  und 3,5  $\mu\text{m}$ . Damit lassen sich verschiedene Zernikepolynome darstellen. Die erste mechanische Resonanzfrequenz des deformierbaren Spiegels beträgt 2,7 kHz. Der Einsatz der Spiegel in Hochleistungslasersystemen mit verschiedenen Laserleistungen wird durch eine gezielte, homogene Erwärmung des Spiegels ermöglicht, da so die laserinduzierte thermische Deformation der Spiegelmembran ausgeglichen werden kann. Durch die Applikation von dielektrischen Schichten mit einer geringen Absorption von 1% können Leistungsdichten von bis zu 0,4 kW/cm<sup>2</sup> geformt werden.

The piezoelectrically induced deformation of the individual actuators is between 1.5  $\mu\text{m}$  and 3.5  $\mu\text{m}$ , depending on the actuator position on the membrane. This allows different Zernike polynomials to be composed. The first mechanical resonance frequency of the deformable mirror is 2.7 kHz. Application of this deformable mirror in high power laser systems is enabled by compound loading. Compound loading relies on the targeted homogeneous heating of the mirror assembly that compensates for the laser induced membrane deformation. The application of dielectric coating on the mirror membrane with low absorption of 1% enables laser power densities up to 0.4 kW/cm<sup>2</sup>.



Diese hochleistungsbeständigen Spiegel sollen zukünftig in einer geschlossenen adaptiv optischen Regelschleife integriert werden. Dafür wird gegenwärtig eine echtzeitfähige LabVIEW-Umgebung mit schnellem Wellenfrontsensor (850 Hz) aufgebaut.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Kompetenzdreiecks Optische Mikrosysteme – KD OptiMi (FKZ: 16SV3700) durchgeführt und die Autoren möchten dem BMBF für seine finanzielle Unterstützung danken.

These high-power compatible deformable mirrors should be integrated into adaptive optical closed loop systems in the future. At present, a real-time LabVIEW based control loop with fast wave front sensor (850 Hz) is setup.

The authors would like to thank the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) for their financial support within the project "Kompetenzdreieck Optische Mikrosysteme – KD OptiMi" (FKZ: 16SV3700).

#### Literatur/References

- [1] Gebhardt, S.; Seffner, L.; Schlenkrich, F.; Schönecker, A.: PZT thick films for sensor and actuator applications, Journal of the European Ceramic Society 27, pp. 4177–4180, (2007).
- [2] Beckert, E. et al.: Solder Jetting – A Versatile Packaging and Assembly Technology for Hybrid Photonics and Optoelectrical Systems, IMAPS 42<sup>nd</sup> International Symposium on Microelectronics, Proceedings, pp. 406 (2009).
- [3] Burkhardt, Th.: Precision photonic packaging using laser-based solderjet bumping, Smart systems integration 2010, Proceedings, ISBN: 978-3-8007-3208-1.

## AUTHORS

*Claudia Bruchmann*

*Michael Appelfelder*

*Erik Beckert*

*Sylvia Gebhardt<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Fraunhofer IKTS*

## CONTACT

*Claudia Bruchmann*

*Phone +49 3641 807-343*

*claudia.bruchmann@iof.fraunhofer.de*

*Dr. Ramona Eberhardt*

*Phone +49 3641 807-312*

*ramona.eberhardt@iof.fraunhofer.de*



1

## BEUGUNGSBEGRENZTES IR-SPIEGEL-TELESKOP MIT SMARTEM MONTAGEANSATZ

### “SNAP-TOGETHER” SYSTEM ASSEMBLY OF A MIRROR BASED IR TELESCOPE

Optische Instrumente zur multi- und hyperspektralen Abbildung und Analyse der Erde oder der Atmosphäre aus dem Weltall sind die Schlüssel zur orts aufgelösten Bestimmung von chemischen Bestandteilen des Bodens oder der Luftschichten. Bodenschätze können aus dem Weltall kartographiert werden unter der Voraussetzung, dass der optische Fingerabdruck auf der Erdoberfläche sichtbar ist [1]. Hyperspektral abbildende Infrarot-Teleskope werden zukünftig helfen, eine dreidimensionale Karte der Atmosphäre zu erstellen. Damit erhält die Menschheit ein besseres Verständnis der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und deren Einfluss auf unsere Umwelt [2].

Die dispersionsfreie Abbildung über einen breiten Spektralbereich in Teleskopen und Spektrometern basiert auf der Reflexion des Lichtes an Spiegeloptiken, die vorteilhaft aus Metall durch Diamantbearbeitung hergestellt werden.

Optical instruments for multi- and hyperspectral imaging and remote sensing of our earth or the atmosphere from outer space are the key to spatially resolved determination of chemical constituents of the soil or air layers. Natural resources can be mapped from space, if the optical fingerprint is visible on the surface on the earth [1]. In addition, hyperspectral imaging infrared telescopes will help to create a three dimensional map of the atmosphere in the future. This knowledge will help mankind to understand the chemical composition of the atmosphere and its impact on our environment and nature [2].

The dispersion-free optical imaging over a wide spectral range in telescopes and spectrometers is based on the reflection of light on mirror optics, which are advantageously diamond machined from metal materials.

1 Spiegelmodul bestehend aus zwei sehr exakt positionierten Spiegelflächen auf einer gemeinsamen Basis mit zusätzlichen Messmarken und Montageflächen. | Mirror subassembly consisting of two precisely aligned aspherical mirrors on a common breadboard with additional reference elements and mounting interfaces.

Die optische Leistungsfähigkeit des Spiegelsystems hängt dabei von der Qualität der optischen Flächen und deren exaktem Einbau in den Strahlengang ab. Die geforderte Genauigkeit im Mikrometer-Bereich und darunter muss in der gesamten Wertschöpfungskette vom Design über die Fertigung und Metrologie beachtet werden, um eine einfache Montage ohne zeitaufwändige Justierschritte zu ermöglichen. Schwerpunkt der aktuellen Forschung ist die Entwicklung einer beugungsbegrenzten optischen Bank für den mittleren Infrarotbereich (MWIR) mit dem Ziel, die Montageaufwendungen signifikant zu reduzieren.

Die Ultrapräzisionsfertigung von Aluminiumspiegeln für den genannten Spektralbereich ermöglicht die Herstellung von einzelnen optischen Flächen in hoher Formqualität und entsprechender Oberflächengüte. Durch eine intelligente geometrische Anordnung der Spiegel auf einem gemeinsamen Träger können mehrere Flächen auch in einer sehr exakten Lagebeziehung zueinander durch Diamantdrehen gefertigt werden [3, 4]. Abbildung 1 zeigt ein Spiegelmodul nach diesem Prinzip. Durch die Bearbeitung und Formkorrektur der Spiegelflächen in nur einem Prozess wird die relative Lage im Mikrometerbereich eingestellt. Darüber hinaus werden in dem gleichen Prozess Messmarken zur Form- erfassung und Flächen für den Einbau in die optische Bank durch ein Diamantfräswerkzeug hergestellt.

The optical performance of mirror systems depends on the quality of optical surfaces and their exact alignment in the beam path. The required accuracy in the micrometer range and below must be considered in the entire value chain from design to manufacturing and metrology in order to allow easy alignment without time-consuming adjustment steps. The focus of the current research is the development of a diffraction-limited optical bench for the mid-wavelength infrared (MWIR) with the objective to minimize the assembly expenditures significantly.

Ultra-precision machining of aluminum mirrors allows the manufacturing of optical surfaces with high performance in terms of shape and surface finish for the MWIR spectral range. Through a smart geometric arrangement of the mirrors on a common breadboard, more than one mirror can be manufactured by diamond turning in a very precise position registration [3, 4]. Figure 1 shows a mirror module according to this principle. By machining and correcting the shape of the mirror surfaces in just a single process, the relative position can be fixed with precision in the micrometer range. Moreover, in the same process metrology references and areas for the incorporation into the optical bench are fabricated.



2



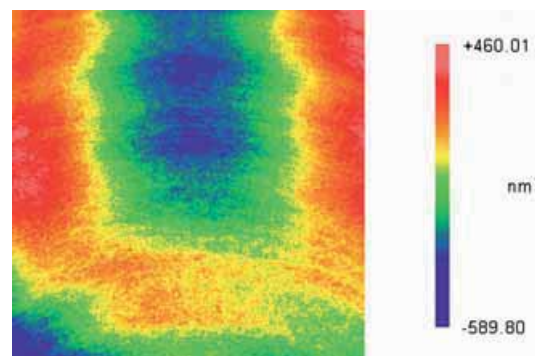
Die Integration dieser Spiegelmodule mit exakten Einbaufächern in eine ebenso präzise Rahmenstruktur ist innerhalb weniger Stunden möglich. Dabei ist der gesamte Montageprozess des optischen Teleskops mit einer Steckmontage vergleichbar, bei der die diamantbearbeiteten Schnittstellen direkt für den Zusammenbau verwendet werden. Iterative Zwischenschritte einer klassischen Justierung entfallen für das in Abb. 2 dargestellte Teleskop [5].

Abbildung 3 zeigt die verbleibende Wellenfrontabweichung des afokalen Teleskopdemonstrators mit einer Vergrößerung von 4,5 : 1 und einer freien Apertur (CA) von 100 mm x 100 mm. Die Abbildungsfehler von 1,05  $\mu\text{m}$  peak to valley (p-v), 180 nm root mean square (rms) belegen die beugungsbegrenzte Abbildung des einfallenden Lichtes für alle Wellenlängenbereiche länger als mittelwelliges Infrarot (MWIR) gemäß der Maréchal Bedingung.

2 *Beugungsbegrenztes IR-Teleskop aus diamantgedrehten Aluminiumspiegeln mit vereinfachter Montagetechnologie. | Diffraction limited MWIR-Telescope based on all aluminum metal optics and a "snap-together" alignment.*

The integration of these modules with exact mirror mounting surfaces in an equally precise frame structure is possible within a few hours. The entire assembly process of the optical telescope is a "snap-together" assembly, because the diamond-machined interfaces are used directly for the integration of the mirrors. Iterative intermediate steps of a classical alignment process are not necessary for the telescope shown in Fig. 2 [5].

Figure 3 shows the residual wavefront error of the afocal telescope demonstrators with a magnification of 4.5 : 1 and a clear aperture (CA) of 100 mm x 100 mm. The wave front error of 1.05  $\mu\text{m}$  peak to valley (p-v), 180 nm root mean square (rms) demonstrates the diffraction-limited imaging of the incident light for all wavelengths longer than MWIR according to the Maréchal condition.



3 *Optische Performance des Infrarotteleskopes gemessen mit Phase-Shifting Interferometrie; 180 nm (rms), 1,05  $\mu\text{m}$  (p-v) über eine freie Apertur von 100 mm x 100 mm. | Optical Performance of the "Snap-Together" Optics IRS-TEL measured with Phase-Shifting Interferometry, Wave Front Error 180 nm (rms), 1.05  $\mu\text{m}$  (p-v) in a Clear Aperture of 100 mm x 100 mm.*

Das Projekt wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR im Rahmen des Projekts »IRS-TEL«, FKZ 50EE0804 gefördert.

The research is supported by the German Aerospace Center (DLR) within the project "IRS-TEL", FKZ 50EE0804.

#### Literatur/ References

- [1] Goetz, A.F.H. et al.: Imaging spectrometry for Earth remote sensing, Science, Vol. 228, pp. 1147–1153, 1985.
- [2] Clissold, P. et al.: PREMIER – PROcess Exploration through Measurement of Infrared and millimeter-wave Emitted Radiation, Report for assessment, ESA, 200.
- [3] Scheiding, S. et al.: Patent 102009041501.7, Verfahren zur Fertigung einer optischen Anordnung mit mindestens zwei optischen Funktionsflächen, optisches Gerät und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens, (2009).
- [4] Scheiding, S. et al.: Ultra-precisely manufactured mirror assemblies with well-defined reference structures, Proc. SPIE 7739, 773908 (2010); doi:10.1117/12.856244.
- [5] Risse, P. et al: Development and fabrication of a hyperspectral, mirror based IR-telescope with ultra-precise manufacturing and mounting techniques for a snap-together system assembly, Proc. SPIE 8176, 81761N (2011).

## AUTHORS

*Sebastian Scheiding*

*Stefan Risse*

*Andreas Gebhardt*

*Christoph Damm*

## CONTACT

*Sebastian Scheiding*

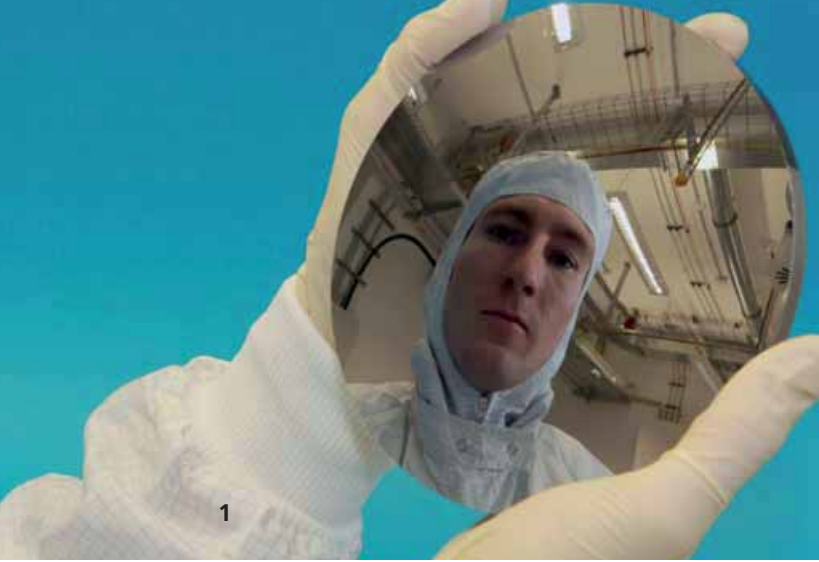
*Phone +49 3641 807-353*

*sebastian.scheiding@iof.fraunhofer.de*

*Dr. Ramona Eberhardt*

*Phone +49 3641 807-312*

*ramona.eberhardt@iof.fraunhofer.de*



## ULTRAPRÄZISE SPIEGEL MIT EINER AMORPHEN SILIZIUMSCHICHT

### ULTRA-PRECISE MIRRORS WITH AMORPHOUS SILICON LAYER

Metallspiegel mit exzellenten optischen, mechanischen und thermalen Eigenschaften werden für ein breites Spektrum moderner optischer Systeme wie Teleskope, Spektrometer oder Scanner eingesetzt. Der limitierende Faktor für die Herstellung ultrapräziser Komponenten ist die Oberflächenqualität diamantgedrehter bzw. -gefräster Spiegel. Zur Realisierung reflektiver Optiken in hoher Qualität ist die Verwendung einer polierbaren, amorphen Nickel-Phosphor-Legierung auf einem Aluminiumsubstrat etabliert [1, 2].

Ein neues Technologiekonzept basiert auf der Verwendung einer amorphen Siliziumschicht mit einer Dicke von wenigen Mikrometern, die auf der Oberfläche eines diamantgedrehten Substrates abgeschieden wird [3]. Die amorphe Siliziumschicht ist in optischer Qualität (glatt, streuarmer Oberfläche) polierbar. Auf Basis einer modifizierten Magnetronspüßtechnologie wurden Siliziumschichten mit einer Schichtdicke bis zu 10 µm realisiert. Die Optimierung der Beschichtungsparameter erfolgte hinsichtlich Schichtdicke, Struktur, Homogenität und Porosität an Testsamples. Wesentlich für die Politur ist die amorphe Struktur der Siliziumschicht.

Metal mirrors with excellent optical, mechanical and thermal properties were used for a wide range of modern optical applications, such as telescopes, spectrometers or scanners. The surface quality of diamond machined optical surfaces is the limiting factor in the manufacturing of ultra-precise optical components. For reflective optics the state of the art is to overcome these limitations by electroplating of nickel-phosphorous (NiP) onto a machined Al-substrate [1, 2].

A new technology concept based on the use of an amorphous silicon layer with a thickness of several microns, which is deposited onto the surface of a diamond turned substrate [3]. The amorphous silicon layer can subsequently be polished and very smooth surfaces can be achieved. Silicon layers with a thickness of up to 10 µm can be realized by a modified magnetron-sputtering technology. During optimization of the sputtering parameters the thickness, homogeneity and porosity were determined by coating of aluminium-alloy test samples. The main point and an important task was to ensure the amorphous structure of the deposited silicon layer. This is essential for the final polishing step.

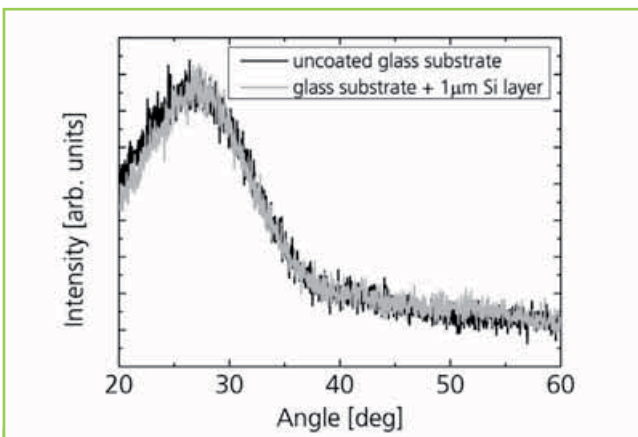
1 Teleskopspiegel mit polierter Siliziumschicht. | Telescope mirror with polished silicon layer.

Abbildung 2 zeigt eine Röntgen-Diffraktionsmessung (XRD) einer unbeschichteten Glasprobe im Vergleich zu einer mit Silizium beschichteten Probe (Schichtdicke 1  $\mu\text{m}$ ). Der Graph belegt die röntgen-amorphe Struktur.

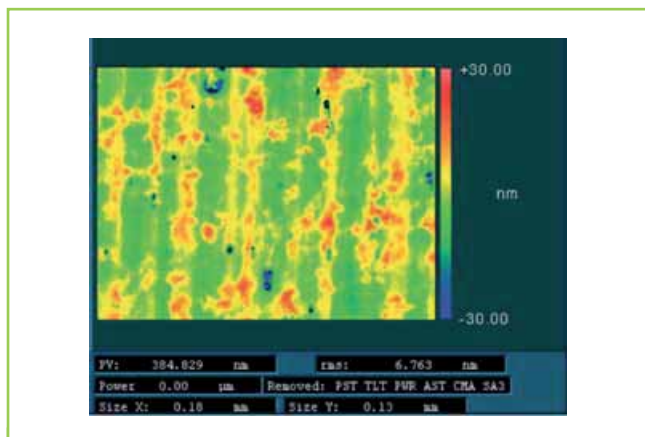
Ein vielversprechender Ansatz ist die Kombination von Aluminium-Legierungen bzw. Aluminium-Silizium-Legierungen mit einer dünnen amorphen Siliziumschicht. Nach der Vorfertigung und Thermalbehandlung des Basismaterials erfolgt die Formgebung der Optik durch ultrapräzise Diamantbearbeitung. Der folgende Beschichtungsschritt deckt die Oberfläche mit einer Schichtdicke von 3 bis 6  $\mu\text{m}$  Silizium ab. Die Politur reduziert die Rauheit und entfernt die typische Drehrillenstruktur der Diamantbearbeitung. Die Mikrostruktur der Oberfläche nach der Diamantbearbeitung ist durch ein periodisches Linienraster mit einem typischen Pitch von 5–10  $\mu\text{m}$  und einer Rauheit von 2–8 nm rms (root mean square) gekennzeichnet (Abb. 3).

Figure 2 shows X-ray diffraction (XRD) curves of an uncoated glass substrate compared to a glass substrate coated with 1 micron of silicon by magnetron sputtering. The graph shows that the sputtered silicon film has an X-ray amorphous crystalline structure.

A new approach is the combination of aluminium alloy or aluminium-silicon alloy with a thin amorphous silicon layer. After pre-fabrication, stress relieving and aging of bulk material, the shaping of the mirror will be realized by the use of single point diamond turning (SPDT). The subsequent coating step covers the full surface with a film thickness of approximately 3 to 6  $\mu\text{m}$  silicon. The post-polishing step reduces the roughness and smoothes the typical microstructure of diamond turning process. The microstructure of the optical surface after SPDT is characterized by periodic turning pattern with a typical pitch of 5–10  $\mu\text{m}$  and a roughness 2–8 nm rms (root mean square) (Fig. 3).



2 XRD Spektrum einer Siliziumschicht. | XRD-spectrum of a silicon layer.



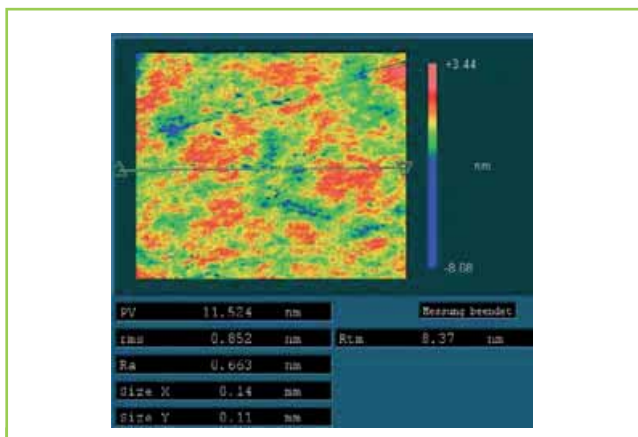
3 WLI nach SPDT (6,8 nm rms Rauheit). | WLI after SPDT (6,8 nm rms roughness).

Das Glätten dieser Struktur ist die Voraussetzung für Anwendungen im visuellen- und ultravioletten Spektralbereich. Hierzu wurden unterschiedliche Poliertechniken untersucht. Erste Ergebnisse zum Polieren mit Magneto-Rheologischen Fluiden (MRF); zum Fluid-Jet-Polieren (FJP) und zum Computerunterstützten-Polieren (CCP) sind in Abb. 4 bis 6 dargestellt. Die Rauheitsanalyse erfolgt durch Messung mit einem Weißlichtinterferometer im Messfeld von 140 µm x 110 µm.

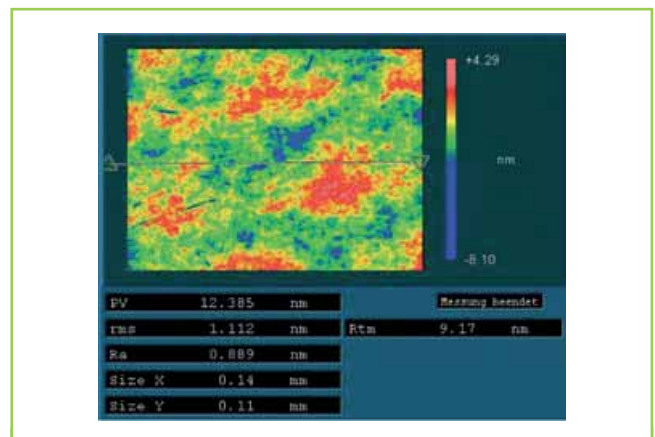
Die Ergebnisse der Siliziumbeschichtung sowie zum Polieren der amorphen Siliziumschicht zeigen, dass die untersuchte Prozesskette für die Herstellung komplexer optischer Komponenten erfolgreich anwendbar ist. Neue Applikationen in den Märkten Luft & Raumfahrt, Wehrtechnik & Sicherheit sowie EUV-Lithographie können erschlossen werden.

The smoothing of the turning structure is a prerequisite for all applications in VIS and UV range. Various polishing techniques were examined. The first results of magneto-rheological fluid polishing (MRF) (Fig. 4), fluid jet polishing (FJP) (Fig. 5) and computer calculated polishing with a robot (CCP) (Fig. 6) are presented. The results of roughness measured with white light interferometry (WLI) in a field of 140 µm x 110 µm are shown in Figure 4–6.

The results of silicon coating and silicon polishing indicate that the presented technology can be applied successfully to the manufacturing of complex optical components like aspheres and freeforms. Markets such as space & astronomy, defense & security and EUV lithography are potential candidates for the new technology.



4 WLI nach MRF (0,85 nm rms Rauheit). | WLI after MRF (0.85 nm rms roughness).



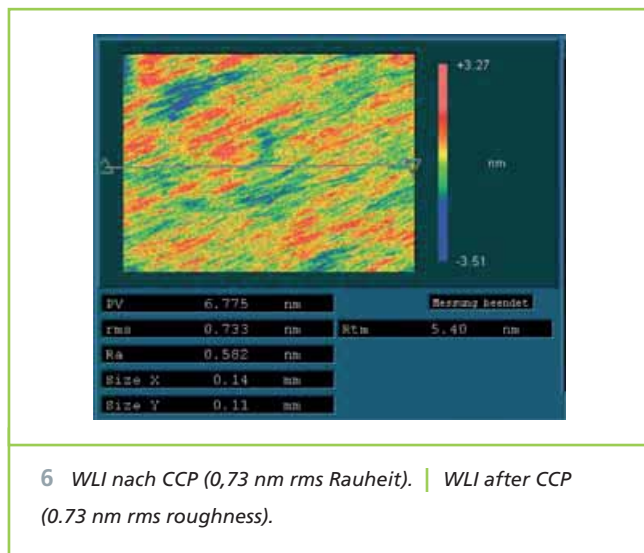
5 WLI nach FJP (1,1 nm rms Rauheit). | WLI after FJP (1.1 nm rms roughness).

Die Untersuchungen wurden vom BMBF im Rahmen des Programms »Wachstums-kern Potenzial – Verbundprojekt: Ultrapräzise Silizium-Optik« gefördert (FKZ 03WKP11A).

#### Literatur/References

- [1] Risse, S.; Gebhardt, A.; Steinkopf, R.; Giggel, V.: NiP plated mirrors for astronomy and space, Proc. 9<sup>th</sup> EUSPEN, 348–351, (2007).
- [2] Steinkopf, R. et al: Metall Mirrors with Excellent Figure and Roughness, Proc. of SPIE 7102, 71020C1–71020C12, (2008).
- [3] Risse, S. et al: Ultra-precise optical mirrors with thick amorphous silicon layer, Proc. 11<sup>th</sup> EUSPEN, 337–340, (2011).

The authors are grateful to the BMBF, Germany, for sponsoring their research in terms of the “Wachstums-kern Potenzial – Verbundprojekt: Ultrapräzise Silizium-Optik” (grant no. 03WKP11A).



## AUTHORS

Stefan Risse  
Andreas Gebhardt  
Mark Schürmann  
Paul Johannes Jobst  
Roman Loose

## CONTACT

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

Dr. Ramona Eberhardt  
Phone +49 3641 807-312  
ramona.eberhardt@iof.fraunhofer.de





## LÖSUNGEN MIT LICHT ...

... VERBESSERN INFORMATIONSTECHNIK  
UND ERHÖHEN SICHERHEIT.

## SOLUTIONS WITH LIGHT ...

... IMPROVE INFORMATION TECHNOLOGY  
AND INCREASE SAFETY.

# INFORMATION UND SICHERHEIT

## INFORMATION AND SAFETY

Informations- und Kommunikationstechnologien – allen voran das Internet – sind aus dem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Sie haben sich als wegweisend für Unternehmen, Mensch und Gesellschaft erwiesen und bilden die Basis für zahlreiche Geschäftsmodelle. Das Licht wird dabei zum entscheidenden Medium, sowohl wenn es um die Erfassung, Verarbeitung und Übertragung als auch um die Visualisierung von Informationen geht. Nur mit Licht können die anfallenden Datenmengen bewältigt werden.

Die Herstellung der zukünftigen Generation von Computerchips mit kleinsten Strukturbreiten von 22 nm kann nur mit extrem kurzwelligem Licht erfolgen. Hierfür müssen entsprechende photonische Technologien geschaffen werden. Dies garantiert die Einhaltung des Mooreschen Gesetzes, das die Verdopplung der Zahl der Transistoren pro Chip alle zwei Jahre in Aussicht stellt.

Neben der Verarbeitung von Informationen ist auch deren Visualisierung eine Domäne der Photonik. Äußerst kompakte, energieeffiziente und zugleich kostengünstige Systeme sind hier gefragt, um den gesellschaftlichen Trend zur Mobilität und Ubiquität von Informationen zu unterstützen. Einen Lösungsansatz bieten von der Natur inspirierte Array-Projektoren, die auf dem Prinzip der Facettenaugen basieren und lichtstarke, energieeffiziente und ultrakompakte Geräte ermöglichen.

Das Bedürfnis der Menschen nach Sicherheit ist eine wichtige Triebkraft für Bilderfassung und Visualisierung. Sowohl bei der Gefahrstofferkennung, der Überwachung von Infrastrukturen und Großveranstaltungen oder der Steuerung des Verkehrsflusses bieten leistungsstarke und intelligente photonische Sensoren adäquate Lösungen zur Erhöhung der Sicherheit im Alltag und im Kampf gegen globale Bedrohungen.

Lösungen mit Licht stehen für eine effiziente Informationstechnik und eine Erhöhung der Sicherheit.

It is impossible to ignore the role of information and communications technologies in our lives today – the internet, above all. They have proven influential for companies, people and society, and many business models are based on them. Light is an important medium when it comes to recording, processing, transferring and visualizing information. Light is the only way to manage the quantities of data involved.

The future generation of computer chips with the smallest line widths of 22 nm can only be manufactured with extremely short-wave light. Special photonic technologies need to be developed for this purpose. This guarantees the continued validity of Moore's law, which predicts that the number of transistors per chip will double every two years.

In addition to processing information, visualizing it is another domain within photonics. Extremely compact, energy-efficient and yet inexpensive systems are in demand here in order to facilitate the social trend toward mobility and high availability of information. One approach in this regard is the array projector, which is based on principles at work in compound eyes; it will facilitate designing bright, energy-efficient, ultra-compact devices.

Humanity's need for safety is an important driver of image capturing and visualization. Powerful and intelligent photonic sensors supply solutions that can increase safety in everyday situations and in the struggle against global threats; they may be involved in detecting harmful substances, monitoring infrastructure and large events, or controlling traffic.

Solutions with light mean efficient information technology and increased safety.



1

## ALUMINIUMBASIERTE REFLEKTOREN FÜR DAS DUV UND VUV

### ALUMINIUM REFLECTORS FOR THE DUV AND VUV

Für hochreflektierende Schichtsysteme bei Wellenlängen im tiefen Ultraviolett (DUV,  $\lambda < 300$  nm) und Vakuum Ultraviolett (VUV,  $100$  nm  $< \lambda < 200$  nm) stellen dielektrisch verstärkte Aluminiumspiegel eine elegante Lösung dar.

Das dabei erreichbare Reflexionsvermögen wird durch die Qualität der aufgetragenen Metallschicht und deren Schutz vor Oxidation wesentlich bestimmt.

Als Schutzschicht im Vakuum-Ultraviolett kommen aufgrund der geringen intrinsischen Absorption insbesondere  $\text{MgF}_2$  (Kantenlage ca. 116 nm) und LiF (Kantenlage ca. 104 nm) in Frage. In einem optimierten Aufdampfprozess an der Syrus Pro 1100 Beschichtungsanlage konnte durch Verwendung beider Fluoride ein Reflexionsvermögen von über 57 % bei 115 nm und nahezu senkrechtem Lichteinfall erreicht werden. Die damit immer noch große Differenz zu dem theoretisch möglichen Reflexionsvermögen bei diesem System (Abb. 2, links) lässt somit auch die Erprobung alternativer Lösungen aussichtsreich erscheinen.

Dielectric enhanced aluminum mirrors are an elegant solution for high reflective coating systems in the deep ultraviolet (DUV,  $\lambda < 300$  nm) and vacuum ultraviolet (VUV,  $100$  nm  $< \lambda < 200$  nm) spectral ranges.

The achievable reflectivity with this will essentially be determined by the quality of the deposited metal coating and its protection against oxidation.

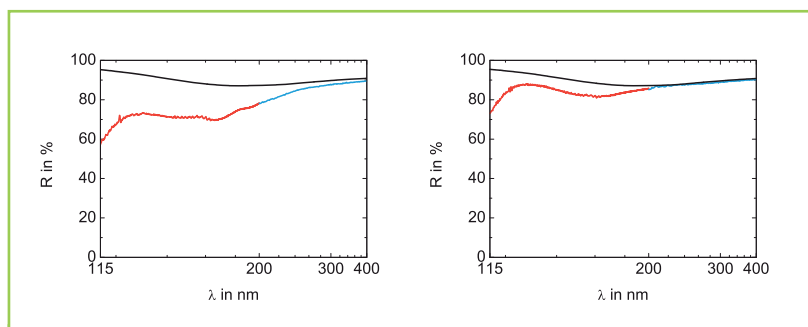
Low intrinsic absorption of  $\text{MgF}_2$  (edge approx. 116 nm) and LiF (edge approx. 104 nm) makes these materials well suited as protective coatings in vacuum ultraviolet. A high reflectivity of more than 57 % at 115 nm for nearly normal incidence of light has been achieved in an optimized evaporation process for the deposition unit Syrus Pro 1100 using both fluorides. The remaining large difference to the theoretically possible reflectance of the coating (Fig. 2, left) preserves potential to investigate alternative solutions.

Im Rahmen des laufenden DIVE-Projekts wurden erste Reflektoren mit einer zusätzlichen  $\text{AlF}_3$ -Schicht realisiert. Die dabei bessere Übereinstimmung zwischen dem theoretisch möglichen und praktisch erreichten Reflexionsvermögen (Abb. 2, rechts) manifestiert sich durch ein Reflexionsvermögen von über 73 % bei 115 nm und nahezu senkrechtem Lichteinfall.

First reflectors with an additional  $\text{AlF}_3$  layer have been deposited in the scope of the ongoing DIVE project. The better agreement between theoretically possible and practically achieved performance (Fig. 2, right) results in a reflectivity of more than 73 % at 115 nm and nearly normal incidence of light.

Die Autoren danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des DIVE-Projekts (Förderkennzeichen 13N11375).

The authors are grateful to the BMBF for financial support in the DIVE project (grant number 13N11375).



**2** Theoretisches (schwarz) und gemessenes Reflexionsvermögen (rot: VUV-Messung bei Korth Kristalle GmbH, blau: UV-Messung am IOF) von dielektrisch verstärktem Aluminium (links: Schutzschicht aus  $\text{LiF}$  und  $\text{MgF}_2$ , rechts: Schutzschicht mit zusätzlicher  $\text{AlF}_3$ -Schicht). | Theoretical (black) and measured (red: VUV measurement at Korth Kristalle GmbH, blue: UV measurement at IOF) reflectance of dielectric enhanced aluminum (left: protective coating with  $\text{LiF}$  and  $\text{MgF}_2$ , right: protective coating with additional  $\text{AlF}_3$  layer).

## AUTHORS

Steffen Wilbrandt

Olaf Stenzel

Hanno Heiße

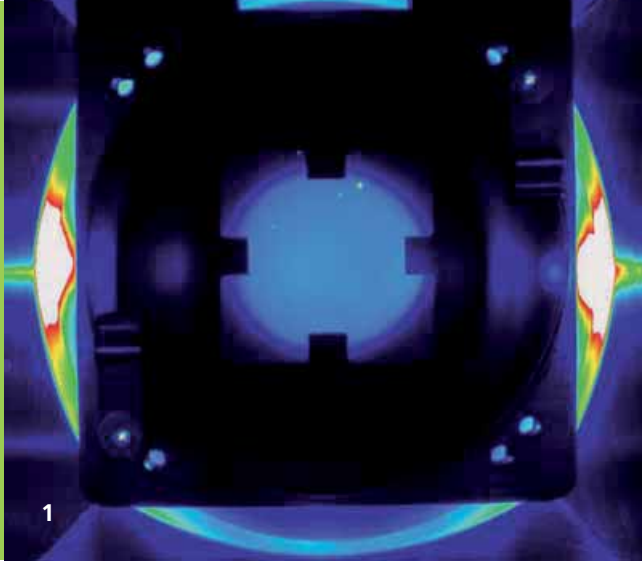
Norbert Kaiser

## CONTACT

Dr. Steffen Wilbrandt

Phone +49 3641 807-272

steffen.wilbrandt@iof.fraunhofer.de

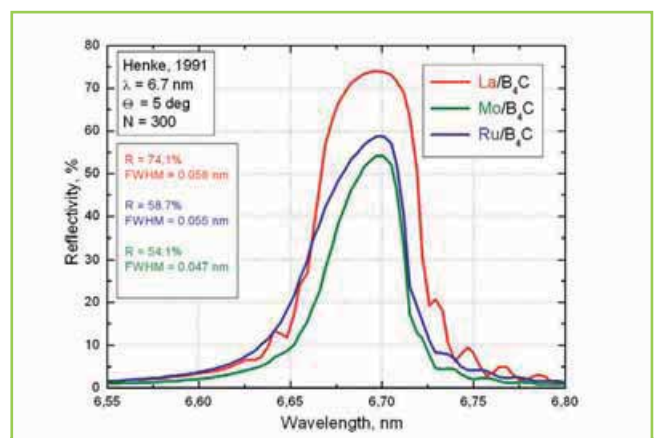


# REFLEXIONSOPTIKEN FÜR DIE NÄCHSTE LITHOGRAPHIEGENERATION

## REFLECTIVE OPTICS FOR THE NEXT GENERATION OF LITHOGRAPHY

Die Entwicklung stabiler Mo/Si Multilayerspiegel für die Wellenlänge 13,5 nm ist mit Reflexionswerten bis zu 70 % nahezu an ihrem Limit angelangt. Es wurde gezeigt, dass La/B Multilayerspiegel mit einer theoretischen Maximalreflexion bis zu 79 % bei der Wellenlänge 6,67 nm (Abb. 2) im Hinblick auf die maximale Transmission eines optischen Abbildungssystems die vielversprechendsten Reflexionsoptiken für die nächste Generation der EUV Lithografie darstellen. Gleichzeitig sind La/B Spiegel extrem schmalbandig (FWHM = 0,06 nm) im Vergleich zu konventionellen Mo/Si Spiegeln (FWHM = 0,6 nm). Die höchste bisher demonstrierte Reflektivität von 49 % bei der Wellenlänge 6,67 nm [1] wurde kürzlich mit einer La/B<sub>4</sub>C Multilayerschicht erreicht, die für nahezu senkrechten Lichteinfall ausgelegt war. In dieser Arbeit lag der Schwerpunkt auf einer Vergleichsstudie verschiedener B-basierter Schichtsysteme: La/B<sub>4</sub>C, Ru/B<sub>4</sub>C und Mo/B<sub>4</sub>C.

The development of stable Mo/Si multilayer coatings designed for the wavelength of 13.5 nm with high reflective optical performance up to 70 % is close to saturation. It was shown that La/B multilayer mirrors with theoretical peak reflectivity up to 79 % @ 6.67 nm (Fig. 2) are the most promising reflective coatings for the next generation of EUV lithography in terms of maximizing throughput of an optical system.



2 Reflexion von den B-basierten Multischichtspiegeln (Theorie). | Optical performance of studied B-based multilayer mirrors.

1 EUV-Bestrahlung von vier Mo/Si-Multischichtspiegeln im ETS. | EUV exposure of four Mo/Si multilayers at ETS.

Die theoretisch erreichbaren Reflexionswerte der untersuchten Materialkombinationen sind in Abb. 2 dargestellt. Die Multilayerspiegel wurden mittels konventionellem Magnetron-sputtern abgeschieden und mittels EUV-Reflektometrie durch die PTB (Berlin) vermessen. Ohne vollständige Optimierung von Multilayerdesigns und Abscheidprozessen wurden für nahezu senkrechten Lichteinfall Reflexionswerte von 32,1 %, 26,0 % und 18,0 % bei einer Wellenlänge nahe 6,67 nm mit La/B<sub>4</sub>C, Mo/B<sub>4</sub>C und Ru/B<sub>4</sub>C Multilayerspiegeln erreicht (Abb. 3). Die experimentell bestimmte Bandbreite der B<sub>4</sub>C-basierten Multilayer lag bei etwa 0,05 nm.

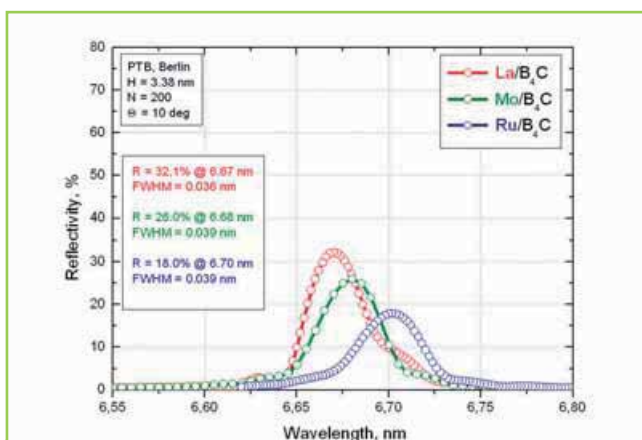
**Literatur/References**

[1] Platonov, Y. et al.: Multilayers for next generation EUVL at 6.X nm, Proc. SPIE 8076, 2011.

At the same time, it should be noted that La/B mirrors are extremely narrowband (FWHM = 0.06 nm) in comparison to conventional Mo/Si mirrors (FWHM = 0.6 nm). The highest reported experimental reflectivity of 49 % @ 6.67 nm [1] was recently achieved on La/B<sub>4</sub>C multilayer coatings designed for near-normal incidence.

In this study we focused our interest on a comparative study of different B-based systems: La/B<sub>4</sub>C, Ru/B<sub>4</sub>C and Mo/B<sub>4</sub>C.

Theoretical performances of the studied multilayers are shown in Fig. 2. The multilayer mirrors were deposited by conventional magnetron sputtering and measured by reflectometry at the PTB, Berlin. Maximum normal incidence reflectivities of 32.1 %, 26.0 % and 18.0 % at a wavelength close to 6.67 nm for La-B<sub>4</sub>C, Mo/B<sub>4</sub>C and Ru/B<sub>4</sub>C multilayer mirrors have been achieved without full optimization of multilayer design and deposition parameters (Fig. 3). An experimental band width of B<sub>4</sub>C- based multilayers was around 0.05 nm.



3 Experimentale Reflexion von den B-basierten Multischichtspiegeln. | Experimental performance of studied B-based mirrors.

**AUTHORS**

Sergiy Yulin  
 Viatcheslav Nesterenko  
 Torsten Feigl  
 Norbert Kaiser

**CONTACT**

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





## LED-ARRAY-PROJEKTOR »LICHTKACHEL«

### HIGH-FLUX LED ARRAY PROJECTOR “LIGHT TILE”

Die Darstellung großflächiger und dennoch tagheller, statischer Projektionsbilder erfolgt nach dem bisherigen Stand der Technik durch einkanalige optische Systeme. Diese sog. Gobo-Projektoren sind aufgrund von Skalierungsregeln der klassischen Optik nur eingeschränkt miniaturisierbar. Wegen der hohen Helligkeitsanforderungen werden bisher nahezu ausschließlich Hochdruck-Entladungslampen als Lichtquellen verwendet, deren – im Vergleich zu modernen LED-Lichtquellen – geringe Lebensdauer und deren eingeschränkte Dimmbarkeit nachteilig sind. Das Darstellen von Bildsequenzen ist in dieser Art von Projektoren nur durch zusätzliche Diawechsler realisierbar, was die Größe und Komplexität der Systeme drastisch vergrößert.

Die Technologie der Array-Projektion überwindet diese Einschränkungen klassischer Projektoren und ermöglicht durch einen neuartigen optischen Vielkanal-Aufbau sowohl eine drastische Reduzierung der notwendigen Systembautiefe und eine effiziente Verwendung von LED-Clustern als Lichtquelle als auch das Darstellen von Bildsequenzen ohne aufwendige Zusatzmechanik.

Up to now the projection of large and daylight-compatible bright pictures has been realized by state of the art optical systems with a single-aperture layout. These so called Gobo-projectors suffer from their large overall size caused by the required optical track length due to scaling rules of classical optics. Furthermore, most devices use high-pressure lamps to achieve the required image brightness, with reduced life-time compared to modern solid-state LED light sources. Switchable image contents always require large additional mechanics that increase both system size and complexity.

The array projection technology overcomes these constraints of conventional setups and enables both a dramatic system size reduction through its innovative multi-aperture layout, an efficient application of LED light sources and the display of electronic switchable image sequences.

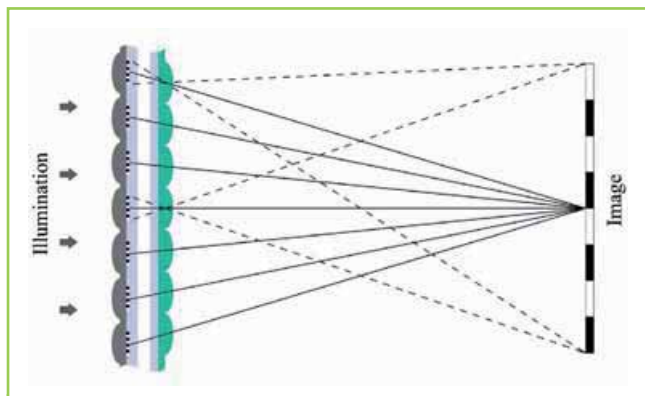
**1** Größenvergleich eines Array-Projektors »Lichtkachel« zu einem 1 Cent-Stück. Die Dicke beträgt 24 mm. | Size comparison of an array projector “light tile” to a Euro-cent coin. The total thickness is 24 mm.

Während ein klassischer Projektor den gesamten Lichtstrom durch einen einzigen Kanal übertragen muss, wofür eine Mindestbaugröße unumgänglich ist, wird das lichtstarke Gesamtbild eines Array-Projektors durch parallele, pixelgenaue Überlagerung einer Vielzahl von Mikroprojektoren, mit jeweils sehr kurzer Baulänge erzeugt. Es erfolgt so eine Illuminanzvervielfachung unter Beibehaltung von Systemdicken von wenigen Millimetern. Die Mikroprojektoren bestehen jeweils aus einer Kondensorlinse, einem vergrabenen Dia und einer Projektionslinse, die sich im Abstand einer Brennweite bzgl. des zugehörigen Dias befindet (Abb. 2). Alle Projektoren befinden sich in einer zweidimensionalen Anordnung zueinander, wobei die konstruktive Superposition der Einzelbilder durch eine definierte Dezentrierung der Objekte bzgl. ihrer korrespondierenden Mikroobjektive über das Array erreicht wird [1].

Die am PC erstellten Diastrukturen werden zunächst durch Elektronenstrahlolithographie in eine Mastermaske übertragen und anschließend durch Kontaktkopieren auf Cr-beschichtete Glaswafer transferiert. Jedes der Einzeldias enthält dabei die komplette Bildinformation aus 400 x 300 Bildpunkten bei einem Pixelpitch von 1,5 µm. Zur Darstellung von Graustufen wird die Fläche der Pixel in 256 Stufen angepasst, um einen definierten Helligkeitswert des Pixels wiederzugeben.

While a conventional projector transmits the entire flux through only one optical channel, which requires a certain track length, the array projector creates a bright composite image by parallel pixel-precise superposition of a multitude of images projected by very short microprojectors. The illuminance is multiplied while maintaining ultra-compact system thickness. Each microprojector consists of a condenser lens, a buried slide structure below and a projection lens distanced by one focal length (Fig. 2). All microprojectors are positioned in a regular two-dimensional setup; the superposition of all sub-images is achieved by a defined decentering of the sub-slides to their corresponding projection lenses [1].

The CAD-created mask is written by e-beam lithography onto a mask master that is contact-copied onto a Cr-coated glass wafer. Every sub-image contains the entire image information of 400 x 300 pixels with a pixel pitch of 1.5 µm. Gray-tone images are realized by an adaption of the adjusted pixel area in the mask corresponding to the aimed gray level.



2 *Optischer Aufbau und Projektionstrahlengang eines Array-Projektors. | Optical layout and projection light path of an array projector.*



Das Werkzeug zum Abformen der Mikrolinsen auf das Glassubstrat entsteht durch Verflüssigen zylindrischer Lackstrukturen mit definierter Außengeometrie. Das Schmelzen der Zylinder resultiert in Ausbildung sphärischer Linsenoberflächen mit definiertem Krümmungsradius. Die Replikation der Linsenarrays auf den mit Diastrukturen versehenen Glaswafer erfolgt durch UV-Abformung eines Hybrid-Polymers in einem Mask-Aligner [1].

Die Projektionsoptik der »Lichtkachel« besteht aus einem 4" Mikrooptik-Wafer mit 9098 hexagonal dicht gepackten Einzelprojektoren mit einem Durchmesser von je ca. 760  $\mu\text{m}$ . Ein Pitch-Unterschied von 460 nm zwischen Dia-Array und Projektionslinsen ergibt eine Projektionsdistanz von 3,7 m. Die nur 3,3 mm dünne Projektionsoptik besteht zur Erhöhung der Flexibilität bzgl. des Temperatureintrags der Lichtquelle aus zwei Einzelementen, die nach aktiver Justage unter Betriebsbedingungen mittels UV-Kleber miteinander verbunden werden. Die Array-Projektionsoptik wird von einem Cluster aus 61 RGBW LEDs (Weiß: 29, Grün: 16, Blau: 8, Rot: 8) mit einer Gesamtleistungsaufnahme von 130 W beleuchtet. Jede der vier LED-Farbgruppen besitzt eine programmierbare PWM-Steuereinheit, die durch jeweils zugewiesene Dias innerhalb des Wafers das sequentielle Darstellen von unterschiedlichen Projektionsbildern auf dem Schirm ermöglicht.

Der mechanische Aufbau der Lichtkachel besteht aus einer mehrlagigen LED-Platine mit Kupferkern, flächig verbunden mit einem massiven Kupfer-Kühlelement, einem Konzentratoren-Array, das die kollimierte Beleuchtung der Projektionsoptik gewährleistet, sowie dem eigentlichen Optikwafer, der direkt auf den Konzentratoren aufliegt.

The tool for lens molding is made by tempering of cylindrical lacquer structures with defined geometries resulting in spherical surfaces with very precise radii of curvature. The lens replication is based on UV-molding of hybrid-polymer onto the prestructured glass substrate inside a customized mask aligner [1].

The projection optics of the demonstrator contains 9098 hexagonally packed single projectors with a diameter of 760  $\mu\text{m}$  on a 4 inch wafer. A difference in pitch between slide array and projection lenses of 460 nm results in a projection distance of 3.7 m. The projection optics has a total thickness of only 3.3 mm and consists of two elements that are actively adjusted and fixed by UV-glue to enhance the flexibility for different temperature inputs of the light source. The projector wafer is illuminated by a cluster of 61 LEDs (white: 29, green: 16, blue: 8; red: 8) with a total power consumption of 130 W. Each color group has a separate wireless PWM-control that enables, along with a predefined assignment of image contents to a certain LED group, the display of variable image sequences.

The mechanics consists of multi-layer LED-board with copper core that is connected with a monolithic Cu heat-sink, a concentrator array ensuring LED collimation and the projection optics, which is placed directly on top.

3 Projektionsoptik mit RGBW-LED-Beleuchtung. | Array projection optics with RGBW LED illumination.



Der Aufbau mit Gehäuse besitzt eine Dicke von 24 mm und eine lateralen Ausdehnung von 140 x 140 mm<sup>2</sup>. Die extrem kompakte Bauform entspricht etwa 10 % des Volumens eines kommerziell verfügbaren Gobo-Projektors.

Der realisierte Hochleistungs-LED Array-Projektor »Lichtkachel« erzeugt in 3,7 m Entfernung kontrastreiche Bildsequenzen einer Größe von 100 x 75 cm<sup>2</sup>. Der maximale Lichtstrom von 1800 Lumen ermöglicht eine gute Sichtbarkeit der dargestellten Bildsequenzen, selbst bei hellem Tageslicht.

#### Literatur/References

[1] Sieler, M. et al.: Ultra-slim fixed-pattern projectors with inherent homogenization of illumination, Appl. Opt. 51, 64–74 (2012).

The demonstrator has a thickness of 24 mm with a lateral extent of 140 x 140 mm<sup>2</sup>. The achieved volume of the device corresponds to about 10 % of a comparable, commercially available gobo-projector.

The realized high-flux array projector creates sharp image sequences with a size of 100 x 75 cm<sup>2</sup> at 3.7 m distance. The maximum flux of 1800 lumens enables a very good visibility, even in the presence of bright ambient daylight.

## AUTHORS

*Marcel Sieler*

*Peter Schreiber*

*Bernd Höfer*

*Peter Dannberg*

*Antje Oelschläger*

*Wolfgang Buss*

*Tino Benkenstein*

*Andreas Bräuer*

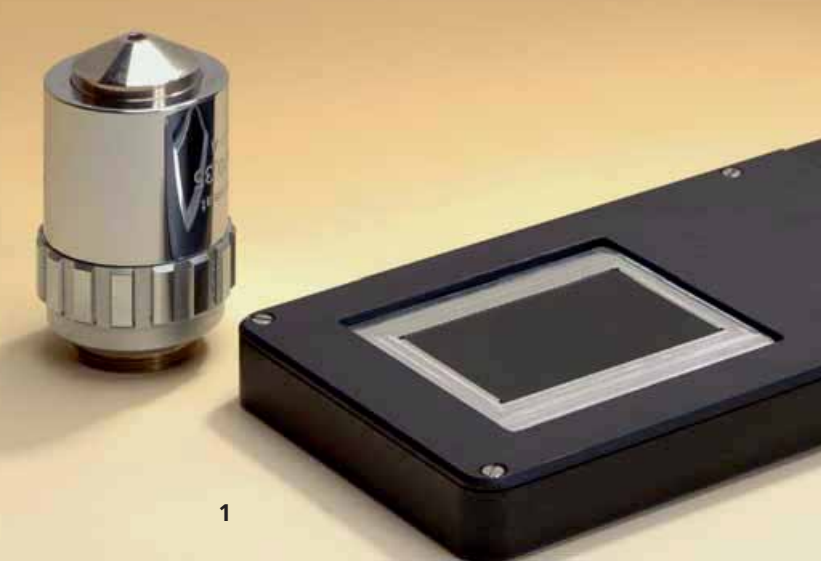
## CONTACT

*Marcel Sieler*

*Phone +49 3641 807-369*

*marcel.siel@iof.fraunhofer.de*

4 Triptychon von Lichtkacheln im Foyer des Fraunhofer IOF. | Triptychon of light tiles in the IOF foyer.



## FACETVISION – INSEKTENINSPIRIERTE ABBILDENDE OPTISCHE SYSTEME

### FACETVISION – INSECT INSPIRED OPTICAL IMAGING SYSTEMS

Die digitale Bildaufnahme hat in den letzten Jahren die konventionelle analoge Technik nahezu vollständig abgelöst. Durch die vorangetriebene Miniaturisierung konnten zusätzlich Digitalkameras in mobile Consumer Elektronik wie Laptops und allem voran Mobiltelefone integriert und damit ein völlig neuer Absatzmarkt etabliert werden, der über ein Volumen von aktuell 1,6 Milliarden Kameramodulen pro Jahr verfügt. Der Wettbewerb in diesen Märkten wird durch drei treibende Faktoren bestimmt – Preis, Miniaturisierung und Auflösung.

Im Wesentlichen entsprechen sämtliche derzeit angebotenen Systeme miniaturisierten klassischen Kameras mit einem einzigen Abbildungskanal, der aus entlang der optischen Achse angeordneten Linsen besteht, und basieren auf der Substitution des analogen Films durch einen opto-elektronischen Bildwandler. Das genutzte Prinzip der Einzelaperturabbildung, das in der Natur unter anderem beim Menschen vorzufinden ist, ermöglicht zwar hochauflösende Objektive, jedoch skaliert deren Bauhöhe mit dem Bildkreisdurchmesser, der wiederum von der Anzahl

In recent years digital imaging has replaced conventional analog technology almost completely. Due to the advanced miniaturization, digital cameras could be integrated into mobile consumer electronics such as laptops and mobile phones, thus establishing a completely new market with a current volume of 1.6 billion camera modules per year. The competition in these markets is driven by three factors – price, miniaturization and resolution.

Essentially all systems offered at present correspond to miniaturized classical cameras, having a single imaging channel with lenses along the z-axis and are based on the substitution of the analog film by an opto-electronic imager. The applied single aperture imaging concept – which has its natural antetype in the human eye – enables high resolution objectives, but the overall height of the objectives is scaled by the image circle diameter, which is determined by the number of pixels and their size setting a lower limit to the attainable objective miniaturization. Thus, a high reduction of the installation space of the camera can only be achieved by decreasing the

1 Ultra-dünnes Mikroskop mit 5,3 mm Bauhöhe und großem Objektfeld von 36 × 24 mm<sup>2</sup>. | Ultra-thin microscope with 5.3 mm optical track length and large object field of 36 × 24 mm<sup>2</sup>.

an Pixeln und deren Größe bestimmt wird und somit der erreichbaren Objektivminiaturisierung eine untere Grenze setzt. Die Bauraumverkleinerung der Kameras kann also nur durch Verringerung der Pixelanzahl oder Reduzierung der Pixelgröße erreicht werden. Da ersteres den Marktanforderungen widerspricht, erfolgte in den letzten Jahren die stetige Verkleinerung der Pixel auf aktuell etwa 1,4 µm mit bekannten Auswirkungen auf das Rauschverhalten.

Entgegen analogen Kameras entfällt bei digitalen Bildaufnahmesystemen die Forderung nach Generierung eines durchgehenden, hochaufgelösten und möglichst zeichnungs-freien einzelnen Gesamtbildes durch das Objektiv, sondern es besteht vielmehr die Möglichkeit, durch Konvergenz von Optik, Elektronik und Bildverarbeitung bestehende Barrieren konventioneller Objektive zu überwinden. Dies bildete den wissenschaftlich-technologischen Inhalt des von der Fraunhofer Zukunftsstiftung mit etwa drei Millionen Euro finanzierten Projekts »facetvision«, das auf den Vorarbeiten in Projekten zu miniaturisierten Einzelaperturobjektiven und von Insektenaugen inspirierten künstlichen Facettenaugen aufsetzt und den Aufbau eines möglichst umfassenden Patentportfolios als Grundlage für die Generierung Lizenzeinnahmen zum Ziel hat.

Im Projekt wurden zwei technische Lösungen entwickelt, die unterschiedliche Ausführungsformen des sogenannten Clusteraugenprinzips als Lösungsansatz für flachbauende, multikanalige Abbildungsoptiken darstellen und als eine Kreuzung aus Einzelaperturkamera (alle Pixel hinter einer Blendenöffnung) und den bei den Insekten auftretenden Appositionsaugen (ein Pixel pro Blendenöffnung) verstanden werden können. Die Varianten unterscheiden sich in der Art ihres Teilbildanschlusses, wobei bei der erst Ausführungsform als optisches Clusterauge die Teilbilder lückenlos aneinander anschließen, was vorteilhafterweise die Nutzung eines konventionellen Bildwändlers ermöglicht.

number of pixels or the reduction of pixel size. Since the first contradicts the market requirements, the constant reduction of the pixel size occurred and is currently approximately 1.4 µm, with well-known negative effects on the noise behavior.

In contrast to analog cameras, digital imaging systems do not have to rely on the generation of a continuous, highly resolved and distortionless single image. Rather, they provide the possibility of overcoming existing barriers of conventional objectives by the convergence of optics, electronics, and image processing. This formed the scientific content of the "facetvision" project, based on previous projects on miniaturized single aperture objectives and artificial compound eyes inspired by insects, which is supported by the Fraunhofer Zukunftsstiftung with a budget of around three million euros. Apart from the technical developments, the build-up of a comprehensive patent portfolio forms the core of the project as the basis for later IP-licensing.

Two technical solutions are being developed in the project relying on the so-called cluster eye principle as solutions for ultra-thin multi-channel imaging optics, which can be understood as a cross between a single aperture camera (all pixels behind a single aperture) and the apposition eye found in insects (a single pixel per aperture). The technical approaches can be divided into optical and electronic cluster eyes with both principles based on the splitting of the object field into different imaging channels arranged next to each other and the generation of partial images as the key to z-height reduction.





Hierzu wurden Demonstratorsysteme mit hohen Auflösungen von bis zu 17 Megapixeln für potenzielle Anwendungen in der technischen und medizinischen Mikroskopie entwickelt, die als wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen Mikroskopen über eine enorme Miniaturisierung der Bauhöhe auf lediglich etwa fünf Millimetern und einem lateral quasi unbegrenzt großem Objektfeld verfügen, was mit konventionellen Lösungen nicht erreicht werden kann und damit ein Alleinstellungsmerkmal darstellt.

Beim elektronischen Clusterauge hingegen schließen die Teilbilder nicht aneinander an, sondern werden unter Nutzung von Software zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Zur Erzielung möglichst geringer Herstellungskosten müssen Objektiv und Kamera minimalen Flächenbedarf aufweisen, was die Nutzung eines an das Abbildungsprinzip angepassten Bildwandler erforderlich macht. Hierzu wurden am beteiligten Partnerinstitut IIS, Erlangen, Demonstratoren speziell angepasster Bildwandler erarbeitet. Als entscheidenden Unterschied zu konventionellen Imagern verfügt die maßgeschneiderte Lösung über kleine, separierte Pixelmatrizen zur Aufnahme der Teilbilder.

Erforderliche, lichtunempfindliche Elektronikblöcke wie zum Beispiel Analog-Digital-Konvertoren, die normalerweise das zusammenhängende Pixelfeld konventioneller Bildwandler umgeben, sind in der angepassten Lösung in kleinere Funktionseinheiten aufgespalten und in die Bereiche zwischen die Teilmatrizen gelegt, um eine optimale Flächenausnutzung erzielen zu können.

**2 Elektronische Clusteraugenkamera, gefertigt in Wafer Level Technologie. | Electronic cluster eye camera based on wafer level fabrication processes.**

The solutions differ in the kind of image stitching, whereby in the optical cluster eye the individual images stitch together by design, which favorably enables the use of a conventional imager. Systems with high resolutions up to 17 megapixels were developed for potential applications in the fields of technical and medical microscopy, demonstrating the substantial advantages of enormous miniaturization with an overall z-height of only five millimeters and a lateral quasi-unlimited size object field, which cannot be achieved with conventional solutions.

In contrast, in electronic cluster eyes the partial image fields do not stitch together by design, but have to be joined by software to generate the overall image. Objective and imager must exhibit minimum area consumption in order to have the lowest possible manufacturing costs, which requires an image converter adapted to the illustration principle. This was conducted by the Fraunhofer Institut IIS, Erlangen, developing demonstrators of adapted CMOS-imagers. As a critical difference to conventional imagers, the adapted device features small, separated pixel matrices for the detection of the partial images.

Required, light insensitive electronic blocks, such as analog-to-digital converters – usually located around the consistent pixel matrix – are split into smaller units and folded in-between the partial matrices for optimum area consumption. The synergetic design of optics and image processing allows for a channel-wise correction of residual distortion and lateral color by implementing sufficient algorithms leading to a much simplified optical setup along with reduced fabrication cost. Due to the dependence of the image stitching from the object distance, special algorithms for parallax compensation were implemented.

Die synergetische Auslegung von Optik und angepasster Bildverarbeitung ermöglicht die kanalweise, softwaretechnische Korrektur von Verzeichnung und Farbquerfehlern durch Implementierung entsprechender Algorithmen, was zu einer Vereinfachung der Optik und damit Verringerung der Herstellungskosten führt. Da der Anschluss der Teilbilder auch vom Objektstand abhängt, wurden Algorithmen zur automatischen Parallaxekorrektur integriert.

Das Objektiv, basierend auf dem elektronischen Clusterauge, verfügt als entscheidenden Vorteil über eine Reduzierung der Bauhöhe von 50 % gegenüber konventionellen Kameras gleicher Auflösung und Bildpunktgröße. Neben der Miniaturisierung resultiert parallel eine einfachere und mithin preiswertere Fertigung im Vielfachnutzen auf Wafer Level, die aus der Nutzung von Mikrolinsen geringer Pfeilhöhe resultiert. Ein Demonstrator mit VGA-Auflösung erreicht eine Objektivhöhe von 1,4 mm bei Verwendung vergleichsweise großer und damit lichtempfindlicher Pixel von 3,2 µm Kantenlänge. In einer weiteren Variante wird eine Auflösung im 720p-Standard unter Nutzung eines vom im Projekt beteiligten Partnerinstitut IIS, Erlangen, entwickelten, angepassten Bildwandlers erzielt. Zukünftige Arbeiten zielen auf höhere Auflösungen im Bereich mehrerer Megapixel ab.

As the decisive advantage, objectives based on the electronic cluster eye principle allow for a reduction of the overall height of 50 % compared to conventional cameras of the same resolution and pixel size. In addition to the miniaturization aspect a simpler, and therefore more cost-effective, manufacturing on wafer level results due the use of micro lenses of small sag height. A demonstrator with VGA resolution features an objective height of 1.4 mm when using comparatively large, and thus light sensitive, pixels of 3.2 µm pixel pitch. Additionally, another prototype with a resolution according to the 720p-standard will be realized using an application-specific imager chip developed by the partner institute IIS, Erlangen. Goals for future activities are resolutions in the multi mega pixel range.

## AUTHORS

*Frank Wippermann  
Andreas Brückner  
Alexander Oberdörster  
Robert Leitel  
Dana Sachse  
Holger Breitenborn  
Andreas Bräuer  
Andreas Tünnermann*

## CONTACT

*Dr. Frank Wippermann  
Phone +49 3641 807-437  
frank.wippermann@iof.fraunhofer.de*





# SPEKTRALE STRAHLKOMBINATION VON VIER HOCHLEISTUNGSFASERVERSTÄRKERN

## HIGH AVERAGE POWER SPECTRAL BEAM COMBINING OF FOUR FIBER AMPLIFIERS

Der Ytterbium-dotierte Faserlaser mit einer Emissionswellenlänge um  $1\ \mu\text{m}$  hat sich in den letzten Jahren als zuverlässige und leistungsskalierbare Laserarchitektur etabliert. Dieses Lasersystem ist typischerweise durch thermische und optische Überbeanspruchung oder durch nichtlineare optische Effekte begrenzt. Die Leistungsskalierung von kontinuierlicher sowie gepulster Strahlung über die Grenzen eines einzelnen Faserlasers hinaus sind Gegenstand derzeitiger Forschung. Ein erfolgversprechendes Konzept ist das der inkohärenten spektralen Strahlkombination (SBC), was eine erhebliche Leistungssteigerung mit sich bringen kann.

Ein wesentlicher Punkt bei dieser Herangehensweise ist, dass jeder Strahl eine andere Wellenlänge besitzt. Aufgrund des breiten Emissionsspektrums Yb-dotierter Glasfasern können Faserlasersysteme sehr viele Strahlen unterschiedlicher Wellenlängen verstärken und sind daher ein perfektes Medium für SBC.

Ytterbium-doped fiber lasers with emission at  $1\ \mu\text{m}$  wavelength have been established as a reliable power scalable laser architecture in the past years. The power limit is usually set by damage, thermal issues or nonlinear optical effects. The generation of output powers beyond the limits of a single fiber is considered in current research activities for cw and pulsed operation. A promising concept is the incoherent spectral beam combination (SBC) of several amplifier systems which allows considerably higher output powers.

The crucial point about this approach is that each amplifier system has a distinct wavelength. Due to the broad emission spectrum of Yb-doped glass, fiber amplifier systems are capable of amplifying tens of different wavelengths and therefore are perfectly suited as active medium for SBC.

Various kinds of spectrally selective elements can be used to combine these beams, such as volume Bragg gratings, interference filters or, and that is the component we prefer, a polarization-independent dielectric reflection grating.

1 Hochleistungsfaserlaser-Verstärkersysteme. | High power fiber-amplifier systems.

Zur eigentlichen Strahlkombination können eine Reihe wellenlängenselektiver optischer Elemente genutzt werden, darunter Volumen Braggitter, Interferenzfilter oder Beugungsgitter. Letzteres stellt auch gleichzeitig unsere bevorzugte Methode dar.

Anhand der hier beschriebenen Strategie konnte mit einer Kombinationseffizienz von ~99 % (polarisationsunabhängiges Reflexionsgitter) eine cw-Ausgangsleistung von 8,2 kW erzeugt werden. Die Beugungsmaßzahl des Ausgangsstrahls beträgt dabei  $M^2 \sim 4,3$ , was in erster Linie auf die Strahlqualität der Einzelemissionen zurückzuführen ist. Bis 2,3 kW konnte eine nahezu beugungsbegrenzte Strahlqualität von  $M^2 < 1,5$  beibehalten werden. Mit dem Konzept der SBC und einer größeren Anzahl an Faserverstärkern ist es prinzipiell möglich, Ausgangsleistungen bis zu 100 kW zu erzeugen.

By means of the strategy described here, we report on further power scaling. Four individual amplifiers have been scaled up to a power of 2.1 kW. With a combining efficiency of 99 % we obtained a maximum power of ~8.2 kW with a beam quality of  $M^2 \sim 4.3$ , primarily limited by the beam quality of the individual beams. At power levels up to 2.3 kW after combination, the beam quality  $M^2$  was still below 1.5. By using a higher number of individual fiber amplifiers, the fiber-based SBC-method allows output powers up to 100 kW.

## AUTHORS

*Christian Wirth*<sup>2</sup>

*Oliver Schmidt*<sup>2</sup>

*Igor Tsybin*<sup>2</sup>

*Thomas Schreiber*<sup>2</sup>

*Ramona Eberhardt*<sup>2</sup>

*Jens Limpert*<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*

## Literatur/References

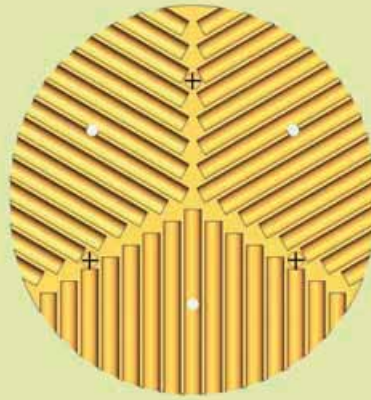
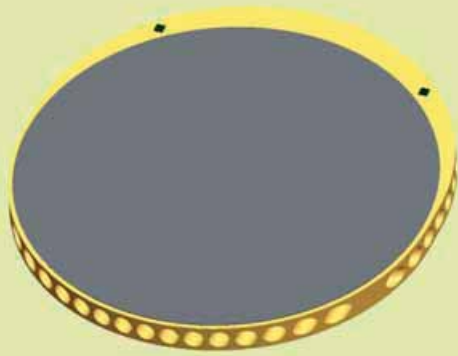
[1] Wirth, C.; Schmidt, O.; Tsybin, I.; Schreiber, T.; Eberhardt, R.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Ludewigt, K.; Gowin, M.; Have, E.; Jung, M.: High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW, Opt. Lett. 36, 3118–3120 (2011).

## CONTACT

*Dr. Thomas Schreiber*

*Phone +49 3641 807-352*

*thomas.schreiber@iof.fraunhofer.de*



1

## ELEKTROSTATISCHE CHUCKS FÜR DIE LITHOGRAPHIE MIT 450 MM WAFERN

## ELECTROSTATIC CHUCKS FOR NEXT GENERATION LITHOGRAPHY WITH 450 MM WAFERS

Die Lithographieverfahren der nächsten Generation sollen integrierte elektronische Bauelemente mit Strukturen von 22 nm und darunter ermöglichen. Dies erfordert eine Überdeckungsgenauigkeit der aufeinander folgenden Belichtungsschritte im Bereich weniger Nanometer. Gleichzeitig soll der Durchsatz der Chipfertigung durch den Einsatz größerer Wafer mit 450 mm Durchmesser weiter gesteigert werden.

Mit dem Durchmesser des Wafers steigen die Anforderungen an die Wafer-Halterung (Chuck) und deren Positioniergenauigkeit, da viele Fehler mit der Größe skalieren. Eine größere Masse induziert Trägheit und senkt die Schwingungsfrequenzen des Chucks, was die Steuerung der Belichtungsanlage erschwert. Durchbiegungen des Chucks und damit verbundene Verzerrungen des Wafers bzw. Belichtungsfehler werden größer. Nicht zuletzt macht sich die thermische Ausdehnung zunehmend bemerkbar.

Am IOF werden seit langem hochgenaue elektrostatische Chucks entwickelt. Mittels Finiter-Elemente-Simulationen wurden nun innovative 450 mm Chuck-Designs aus verschiedenen keramischen Materialien unter Leichtgewichts-Gesichtspunkten vergleichend untersucht.

Next-generation lithography should allow integrated electronic devices with critical dimensions of 22 nm or less. This requires an overlay accuracy of a few nanometers in successive exposure steps. Most important, the throughput of chip manufacturing will be further increased by using larger wafers of 450 mm diameter.

With larger wafer diameter, the requirements on the wafer clamps (chucks) and positioning accuracy increase significantly, since many errors scale with the wafer size. A larger chuck mass increases its inertia and lowers its vibrational frequencies, which makes it more difficult to control the exposure system. Furthermore, chuck bending and associated wafer distortions tend to rise and generate larger exposure errors. Last but not least, the thermal expansions of wafer and chuck become an issue.

At IOF, high precision electrostatic chucks have been developed for many years. Innovative concepts for 450 mm wafer chucks were generated using finite element modeling (FEM). Light-weight structures of various ceramic materials were examined and compared to each other.

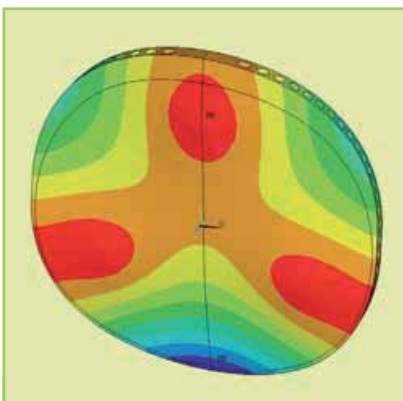
1 *Leichtgewicht-Chuck-Design.* | *Light-weight chuck design.*

Die zu erwartenden Struktur-Verzerrungen durch Durchbiegungen der Wafer-Halterungen wurden berechnet und Ebenheit und Steifigkeit im Chuck-Design entsprechend verbessert. Eine deutliche Erhöhung der Eigenfrequenzen wurde erzielt. Auch die mit der Belichtung verbundene lokale Erwärmung und thermische Ausdehnung des Si-Wafers wurden analysiert. Die resultierende Strukturverzerrung kann durch geeignete Materialauswahl beim Chuck – trotz hoher Belichtungsleistung und Vakuum-Umgebung – voraussichtlich auf ein erträgliches Maß reduziert werden.

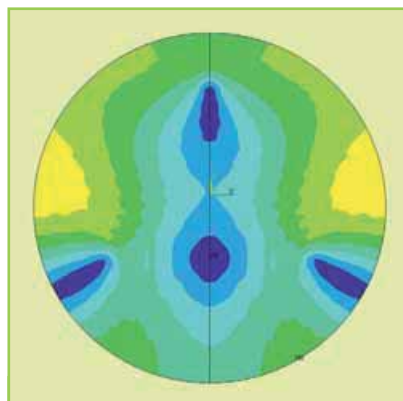
Die vorliegenden Ergebnisse entstanden in enger Zusammenarbeit mit der Firma Vistec Electron Beam GmbH Jena. Die Arbeiten werden im Rahmen des Projekts EEMI-450 vom BMBF und ENIAC (Europäische Gemeinschaft) unter Kontrakt Nr. 13N10988 gefördert.

Anticipated structural distortions at the wafer surface from chuck bending were calculated and utilized to improve flatness and rigidity of the chuck-design. A significant increase in eigenfrequencies was achieved. Another objective was the investigation of local heating and associated thermal expansion of the wafer during exposure. With an appropriate selection for the chuck materials, the resulting structural distortions can probably be reduced to a tolerable level – in spite of high exposure power and vacuum environment.

These results were developed in close collaboration with Vistec Electron Beam GmbH Jena. The work is funded within the BMBF project EEMI-450 and by ENIAC (European Community) under Contract no. 13N10988.



**2** Durchbiegung eines 450 mm Leichtgewicht-Chucks aus SiC-Keramik unter dem Eigengewicht. | Gravity induced bending of a 450 mm light-weight chuck made from SiC ceramics.



**3** Die zugehörigen Verzerrungen in der Waferoberfläche sind  $\leq 0,5$  nm. | The corresponding distortions in the wafer surface are  $\leq 0.5$  nm.

## AUTHORS

Thomas Peschel  
Gerhard Kalkowski  
Stefan Risse

## CONTACT

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



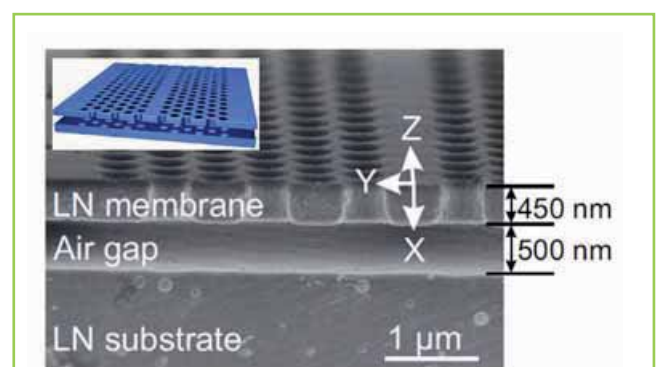
# LICHTAUSBREITUNG IN PHOTONISCHEN KRISTALLEN AUS LITHIUMNIOBAT

## LIGHT PROPAGATION IN LITHIUM NIOBATE PHOTONIC CRYSTALS

Im Zuge fortschreitender Miniaturisierung und Funktionalisierung optischer Bauelemente tritt das Anliegen, nichtlineare und integrierte Optik zu verbinden, zunehmend in den Vordergrund. Die Effizienz optisch nichtlinearer Effekte, wie bspw. optisch parametrischer Oszillation, wird verstärkt, wenn Licht mit einem Medium auf kleinem Volumen wechselwirkt.

Eine Realisierungsmöglichkeit hierfür sind photonische Kristalle, die aus hexagonal angeordneten Luftlöchern in einer etwa 500 nm dicken Membran bestehen. Licht kann hier durch Weglassen einzelner Löcher oder ganzer Lochreihen in Linien- oder Punktdefekten lokalisiert werden. Als optisch nichtlineares Material wird Lithiumniobat verwendet. Zur Strukturierung von Lithiumniobat entwickelten wir das ionenstrahlverstärkte Ätzen, das es ermöglicht, beliebige elektronenstrahlolithographisch definierte Geometrien in freischwebende Membranen zu übertragen [1]. Die optische Charakterisierung photonischer Kristalle mit Liniendefekt erfolgte durch optische Rasternahfeldmikroskopie (Abb.1).

The growing need to miniaturize functional optical elements led to the objective to combine the fields of nonlinear and integrated optics. The efficiency of nonlinear optical effects, e. g. optic parametric oscillation, is enhanced by decreasing the interaction volume of light and nonlinear medium.



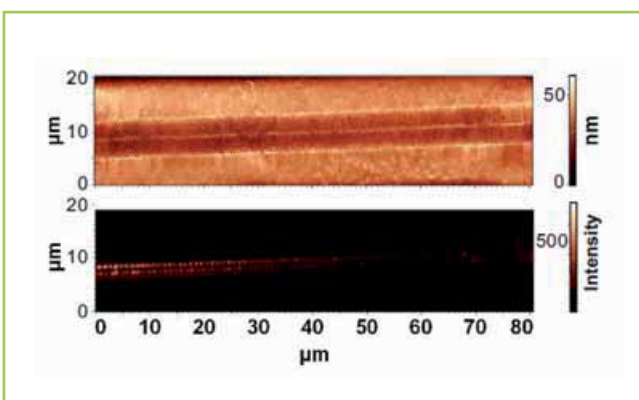
1 REM Aufnahme eines photonischen Kristalls mit Liniendefekt in Lithiumniobat (LN). | SEM images of a photonic crystal with line defect in lithium niobate (LN) [2].

Exemplarisch in Abb. 2 dargestellt, erkennt man deutlich die gewünschte Lokalisierung des eingekoppelten Lichts entlang des Liniendefekts [2]. Diese Ergebnisse befähigen uns, auch noch komplexere Strukturen für Anwendungen in der nichtlinearen Optik umzusetzen.

**Literatur/References**

- [1] Hartung, H. et al.: Ultra thin high index contrast photonic crystal slabs in lithium niobate, *Opt. Mat.* 33, 19 (2010).
- [2] Geiss, R. et al.: Light propagation in a free-standing lithium niobate photonic crystal waveguide, *Appl. Phys. Lett.* 97, 131109 (2010).

One way to implement this concept is the use of photonic crystals formed by a hexagonal lattice of air holes in a 500 nm thick membrane. By omitting single holes or complete lines of holes, light can be localized to those point or line defects. Lithium niobate was selected as an optically nonlinear material system. Ion-beam enhanced etching has been developed for the patterning of lithium niobate, which allows for the transfer of arbitrary geometries, defined by electron beam lithography, into suspended membranes [1]. A photonic crystal with line defect was characterized optically by scanning near-field microscopy (Fig. 1). In an example in Fig. 2 the desired localization of light coupled to the structure along the waveguide can be seen clearly [2]. Now, those results enable us to realize more complex structure for the application in nonlinear optics.



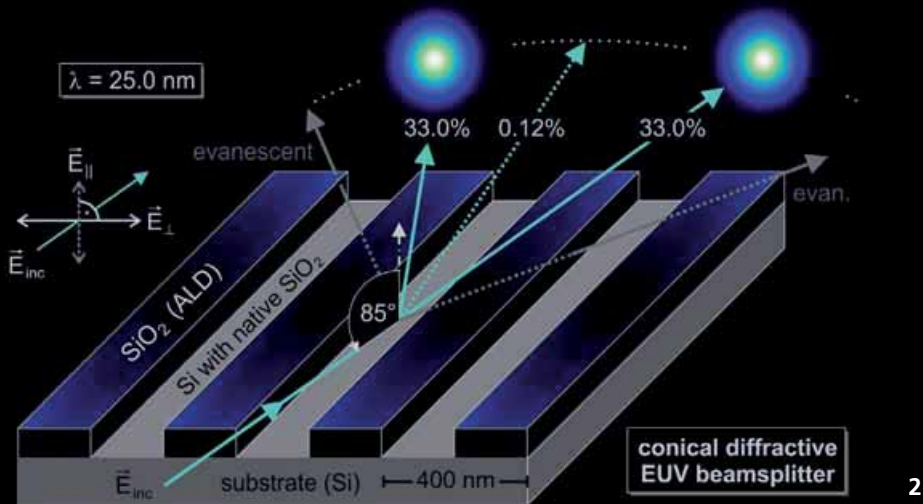
2 Topographie (oben) und optisches Nahfeld (unten) eines photonischen Kristalls mit Liniendefekt bei 1400 nm. | Topography (top) and optical near-field (bottom) of a photonic crystal with line defect at 1400 nm [2].

**AUTHORS**

Reinhard Geiß<sup>1</sup>  
 Séverine Diziain<sup>1</sup>  
 Frank Schrepel<sup>1</sup>  
 Thomas Pertsch<sup>1</sup>  
 Ernst-Bernhard Kley<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik,  
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

**CONTACT**

Reinhard Geiß  
 Phone +49 3641 947-833  
 geiss@iap.uni-jena.de



## HOCHEFFIZIENTE EUV- UND RÖNTGENGITTER ZUR PLASMA-ANALYSE

## HIGHLY EFFICIENT EUV AND X-RAY GRATINGS FOR PLASMA DIAGNOSTICS

Lichtstarke diffraktive Optiken sind von entscheidender Bedeutung für Anwendungen mit geringem Signal-Niveau, beispielsweise in der Astronomie. Im Gegensatz zu reflektiven Komponenten ermöglichen leichtgewichtige Transmissionsgitter in normaler Inzidenz eine unübertroffene effektive Fläche, bezogen auf ihre Masse. Unter Verzicht auf jegliches Substrat erreichen freistehende binäre Phasengitter, hergestellt aus einem ultra-nanokristallinen Diamantfilm mit einer Dicke von  $0,3 \mu\text{m}$ , im Wellenlängenbereich von  $5,0 \text{ nm}$  bis  $7,5 \text{ nm}$  eine Effizienz von bis zu  $28 \%$  in  $(\pm 1)$ . Ordnung, während die nullte Ordnung nahe  $6,8 \text{ nm}$  bis auf  $1 \%$  unterdrückt wird. Beugungsverluste in anderen Ordnungen bis zur  $(\pm 3)$ . belaufen sich auf  $\sim 7 \%$ . Die nicht vernachlässigbare Druckspannung des Diamantfilms begrenzt den realisierbaren Gitterdurchmesser derzeit auf  $\sim 400 \mu\text{m}$ . Eine Erweiterung auf Dimensionen von praktischem Interesse, d. h. auf mehrere  $(10^{-3} - 10^{-2}) \text{ m}$ , ist daher für die Zukunft geplant.

In – terrestrischen – Laboratorien wird die komplexe Emission von Plasmen allerdings häufig mit interferometrischen Methoden untersucht. Konventionelle Gitter-Strahlteiler, essentiell für Aufbauten im Mach-Zehnder-Verfahren, sind wesentlich durch Probleme bei der Austarierung der Beugungseffizienzen beeinträchtigt.

High throughput diffractive optics are of crucial interest for low-signal applications, in astronomy for instance. In contrast to reflective components, lightweight normal-incidence transmission gratings provide an unprecedented effective area per unit mass. Without any substrate layer, true stand-alone binary phase grating membranes made of an ultra-nanocrystalline diamond film with a thickness of  $0.3 \mu\text{m}$  reach an efficiency of up to  $28 \%$  in the  $(\pm 1)^{\text{st}}$  order in the wavelength range between  $5 \text{ nm}$  and  $7.5 \text{ nm}$ , whereas the  $0^{\text{th}}$  order is suppressed down to  $1 \%$  near  $6.8 \text{ nm}$ . Diffraction losses into other orders up to the  $(\pm 3)^{\text{rd}}$  one amount to  $\sim 7 \%$ . The non-negligible compressive stress of the diamond film currently sets an upper limit to feasible grating diameters of  $\sim 400 \mu\text{m}$ . An extension to dimensions of practical interest, i. e. several  $(10^{-3} - 10^{-2}) \text{ m}$ , is thus planned for future (Fig. 1).

**2** *Diffraktiv-reflektiver Strahlteiler in konischer Inzidenz unter streifendem Einfall. Die propagierenden Ordnungen sind türkis gezeichnet. | Diffraction by an EUV beamsplitter in conical grazing incidence. Propagating orders are drawn in turquoise.*

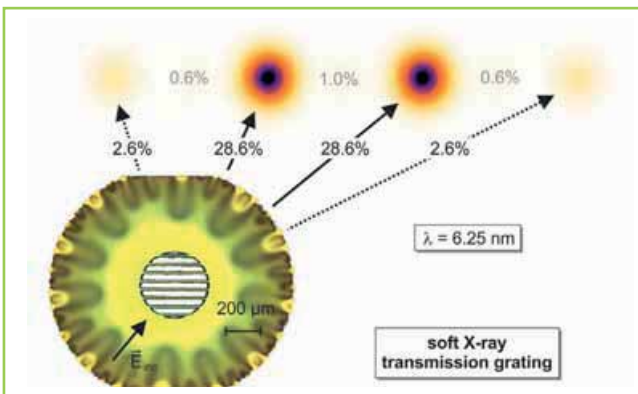
Ein alternatives Design, basierend auf konischer Beugung unter streifendem Einfall, erscheint daher naheliegend: Die Symmetrie binärer Profile gestattet nun unter externer Totalreflexion bei einer Wellenlänge von 25 nm die natürliche Angleichung der Effizienz in den ersten Ordnungen, die zu jeweils 33 % für ein erstes aus Si und SiO<sub>2</sub> gefertigtes Exemplar gemessen wurde.

Andererseits wird die nullte Ordnung durch destruktive Interferenz in der binären Grabenstruktur auf 0,12 % reduziert. Höhere Ordnungen jenseits der ( $\pm 1$ ). sind sogar evaneszent und können nicht propagieren. Mit einer absoluten Differenz von 0,01 % zwischen den Intensitäten der ( $-1$ ). und der ( $+1$ ). Ordnung kann ein fast perfekter Interferenzkontrast von  $1 - \epsilon$  mit  $\epsilon \sim 10^{-7}$  erreicht werden.

In (ground based) laboratories, however, the complex plasma emission is often investigated using interferometry. Conventional grating beamsplitters, essential for Mach-Zehnder method setups, suffer from severe difficulties in balancing the diffraction efficiencies.

An alternative design, based on conical grazing incidence diffraction, so appears to be straightforward: The symmetry of binary profiles, now allowed in total external reflection at a wavelength of 25 nm, permits a natural equalization of the ( $\pm 1$ )<sup>st</sup> order efficiency, which is found as high as 33 % in each of them for an initial sample made of Si and SiO<sub>2</sub>.

On the other hand, the 0<sup>th</sup> order is reduced to 0.12 % by means of destructive interference from the binary groove pattern. Higher orders beyond the ( $\pm 1$ )<sup>st</sup> one are even evanescent and cannot propagate. With an absolute intensity difference of 0.01 % between the ( $-1$ )<sup>st</sup> and the ( $+1$ )<sup>st</sup> order, a nearly perfect interference contrast of  $1 - \epsilon$  with  $\epsilon \sim 10^{-7}$  might be obtained (Fig. 2).



1 *Beugung durch ein freistehendes Phasen-Transmissionsgitter, hergestellt aus einer ultradünnen Diamantmembran. | Diffraction by a stand-alone phase transmission grating made of an ultrathin diamond membrane.*

## AUTHORS

Christoph Braig<sup>1</sup>

Ernst-Bernhard Kley<sup>1</sup>

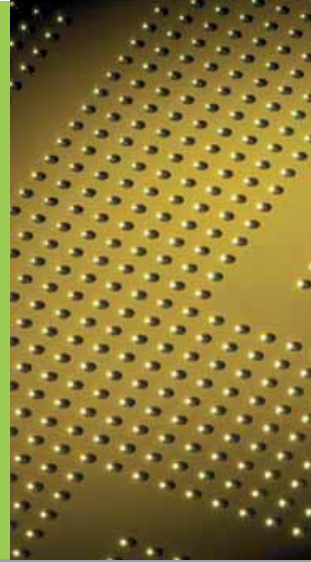
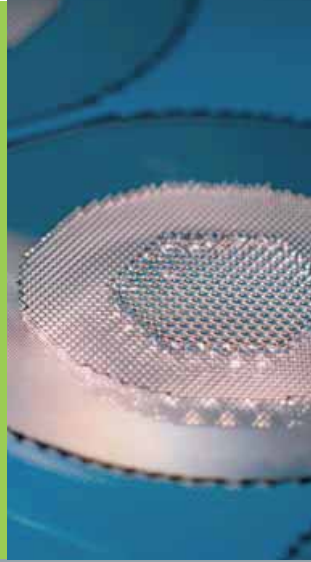
<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

## CONTACT

Dr. Christoph Braig

Phone +49 3641 947-838

christoph.braig@uni-jena.de



## FÜR LÖSUNGEN MIT LICHT ...

... BEWÄHRTE PROZESSE VERBESSERN  
UND NEUE TECHNOLOGIEN ENTWICKELN.

## FOR SOLUTIONS WITH LIGHT ...

... IMPROVE ESTABLISHED PROCESSES  
AND DEVELOP NEW TECHNOLOGIES.

# TECHNOLOGIE TECHNOLOGY

Das Fraunhofer IOF und das IAP der FSU sind spezialisiert auf die industriennahe Entwicklung von Verfahren zur Funktionalisierung optischer Oberflächen, zur Fertigung optischer Komponenten, zur Integration optischer Systeme sowie für Bildgebung und Messtechnik.

Auf modernsten Maschinen und in Kombination mit neuester Messtechnik werden die technologischen Möglichkeiten erforscht und optimiert, um den steigenden Anforderungen an optische Systeme Rechnung zu tragen. Ein Beispiel ist ein Testsystem für Mikro-elektro-mechanische Systeme (MEMS), wie etwa miniaturisierte Druck- oder Beschleunigungssensoren in mobilen Kommunikationsgeräten oder auch IR-Strahlungsdetektoren in Wärmebildkameras. Das entwickelte Messsystem besteht aus einem Array von Mikrointerferometern auf einem Mess-Wafer.

Technologien zur direkten Herstellung oder zur Beschichtung optischer Komponenten werden am Fraunhofer IOF kontinuierlich weiterentwickelt. So konnten zum Beispiel spezielle reflexionsgeminderte Chromschichten hergestellt werden oder auch arrayhafte Masterstrukturen für die UV-Replikation von Mikrooptiken.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden innovative Füge-, Montage- und Integrationstechnologien zur Verbesserung der Funktionalität, Zuverlässigkeit und Präzision komplexer opto-mechanischer und opto-elektro-mechanischer Mikro- und Makrosysteme. Entsprechendes Know-how wird ständig weiterentwickelt, z. B. das Bonden von Glas als hochtemperatur- und laserstrahlungsfestes Fügeverfahren für Hochleistungsanwendungen.

Angepasste Entwicklungsplattformen, Technologien und Prozesse bilden die Basis für innovative Lösungen mit Licht.

The Fraunhofer IOF and the IAP at FSU specialize in collaborating closely with industry to develop processes to functionalize optical surfaces, produce optical components, integrate optical systems, and processes for imaging and measurement.

We research and optimize technological opportunities using advanced equipment and the latest measurement technology in order to meet the increasing demands placed on optical systems. One example is a test system for micro-electric-mechanical systems (MEMS), such as miniature pressure or acceleration sensors in mobile communications devices or IR radiation detectors in thermal imaging cameras. The measurement system we have developed consists of an array of micro-interferometers on a measurement wafer.

Technologies to directly manufacture or coat optical components are continually being refined at the Fraunhofer IOF. For example, this led to the manufacture of special reduced-reflection chrome layers and array-like master structures for UV replication of micro-optics.

Another area of focus is innovative joining, assembly and integration technologies intended to improve the functionality, reliability and precision of complex opto-mechanical and opto-electromechanical micro- and macrosystems. We are perpetually developing new expertise, e. g. glass bonding in a high-temperature and laser-radiation-hardened joining process for high-performance applications.

Custom development platforms, technologies and processes form the basis for innovative solutions with light.





## STRUKTURIERBARE REFLEXIONSGEMINDERTE CHROMSCHICHTEN

### STRUCTURABLE CHROMIUM COATINGS WITH REDUCED REFLECTANCE

Die Herstellung von Skalen, Maßstäben, Strichplatten, Blenden und Kalibriernormalen ist ein wichtiges Gebiet der praktischen Optik. Solche Mikrostrukturen finden vielfältige Anwendungen in der industriellen Bildverarbeitung, der Medizintechnik, der Mikroskopie, der Sport- und Militäroptik, der Messtechnik und in Foto- und Filmkameras. Neue Anwendungen verlangen dabei strukturierbare Schichten mit neuen oder verbesserten optischen oder mechanischen Eigenschaften. Besonders bei Chromstrukturen in optischen Systemen stören beispielsweise häufig die Reflexe des metallischen Chroms. Unter Verwendung von oxidiertem Chrom lassen sich diese Reflexe jedoch in einem weiten spektralen Bereich erfolgreich reduzieren.

Die breitbandige Reflexionsminderung beruht auf der Entspiegelung einer optisch dichten Chromschicht durch ein Chromoxid-Schichtsystem. Auf diese Weise lässt sich die Reflexion der Chromschicht in einem sehr breiten Spektralbereich deutlich verringern. So ist beispielsweise eine Reflexion  $< 5\%$  in einem Spektralbereich von 300 bis 1200 nm realisierbar.

The manufacture of scales, benchmarks, reticles, apertures, and calibration standards is a very important area of practical optics. These microstructures are commonly used in industrial image processing, medical engineering, microscopy, sports and military optics, metrology, and in photographic cameras. New applications require structurable coatings with new or enhanced optical or mechanical properties. Especially for structures which are applied in optical systems, reflexes of the metallic chromium structures impair the system's performance. When applying chromium oxide, these reflexes can be significantly reduced in a wide spectral range.

The reduced reflectivity is realized by applying a chromium oxide based anti-reflection coating on an optically dense chromium layer. The reflectivity of the chromium layer can be significantly reduced in a wide spectral range using this coating. For example, a reflectivity below 5% in the spectral range 300–1200 nm is possible.

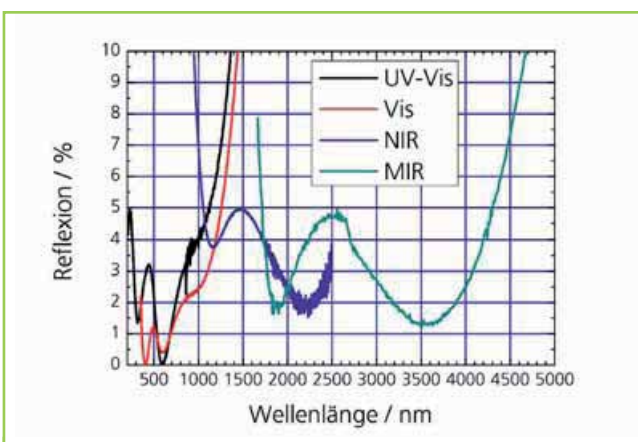
1 *Strukturierte reflexionsgeminderte Schicht auf einer  $\text{CaF}_2$ -Linse. | Structured coating with reduced reflectivity on a  $\text{CaF}_2$ -lens.*

Durch Anpassung der Schichtdicken kann der entspiegelte Bereich wahlweise weiter in den UV-Bereich oder in den Infrarotbereich geschoben werden. Die Schichten sind mittels Standard-Strukturierungsprozessen wie Lift-Off-Verfahren, nasschemischem Ätzen oder Trockenätzen strukturierbar. Je nach Anwendung kann außer einer Entspiegelung der Chromschicht zum Umgebungsmedium auch eine Entspiegelung zur Substratseite notwendig sein. Neben Glassubstraten wurden diese Schichten auch schon für Silizium-, Germanium-, Zink-sulfid-, Zinkselenid- und Calciumfluoridsubstrate angepasst.

Die Autoren bedanken sich bei der Thüringer Aufbaubank für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten im Rahmen des Verbundprojekts »SOS – Strukturierbare optische Schichten«.

By adjustment of the individual layer thicknesses this spectral range can be shifted either to the UV range or to the infrared range. The coatings can be structured by standard processes, such as Lift-Off technology, wet-chemical etching or dry etching. Depending on the requirements of the application, the anti-reflection coating can not only be applied on the ambient medium side of the chromium layer, but also on the substrate side. In addition to glass-substrates, this coating has already been applied to silicon, germanium, zinc sulfide, zinc selenide, and calcium fluoride substrates.

The authors acknowledge the financial support for this work by the Thüringer Aufbaubank in the scope of the project "SOS – Strukturierbare optische Schichten".



2 Reflexionsgeminderte Chromschichten für verschiedene Spektralbereiche. | Chromium coatings with reduced reflectivity for different spectral ranges.

## AUTHORS

Mark Schürmann

Paul-Johannes Jobst

Norbert Kaiser

Frank-Ulrich Luck<sup>1</sup>

Bernd Beier<sup>1</sup>

Michael Thaut<sup>1</sup>

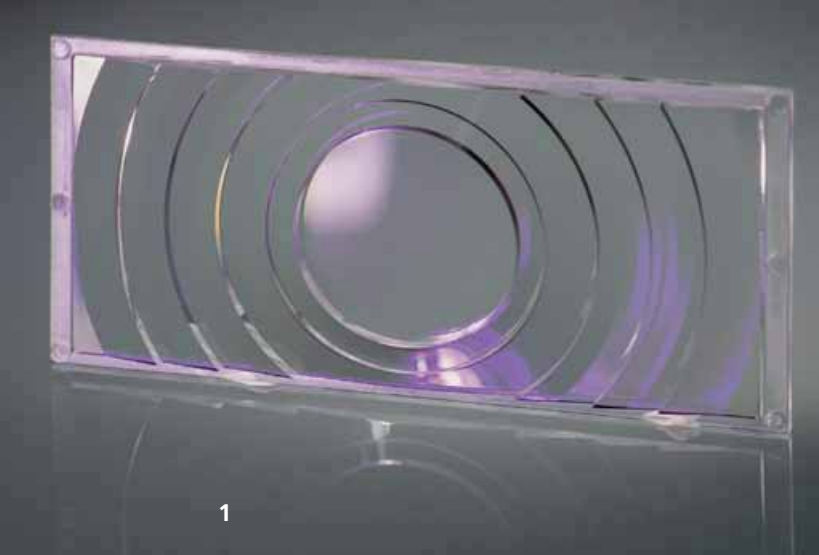
<sup>1</sup> POG Präzisionsoptik Gera GmbH

## CONTACT

Dr. Mark Schürmann

Phone +49 3641 807-322

mark.schuermann@iof.fraunhofer.de



1



2

## KUNSTSTOFFBESCHICHTUNG UNTER INDUSTRIELLEN BEDINGUNGEN

### COATING OF POLYMERS UNDER INDUSTRIAL CONDITIONS

Die Verbreitung von Kunststoffoptiken im Bereich anspruchsvoller optischer Systeme lässt auch die Nachfrage nach Beschichtungen mit komplexen Filterfunktionen steigen. Einfache Entspiegelungen mit nur wenigen Schichten sind auf Kunststoff inzwischen Stand der Technik [1]. Interferenzfilter erfordern jedoch die nanometergenaue Abscheidung von teilweise mehr als 100 Einzelschichten und können dabei Dicken von mehreren Mikrometern erreichen [2]. Spritzgussteile aus Kunststoff sind zudem oft komplex geformt bzw. die Optikelemente schon im Gehäuse eingegossen (Abb. 2), was eine homogene Dickenverteilung der Schichten erschwert.

In einem vom BMWi geförderten Kooperationsprojekt mit der Fa. Jenoptik Polymer Systems GmbH wurde die Applizierbarkeit dicker Filterbeschichtungen auf optischen Kunststoffbauteilen untersucht. Dazu wurde beispielhaft ein UV-Kurzpassfilter, der Licht im Spektralbereich 350–390 nm durchlässt und ab 400 nm sperrt, entwickelt.

Es musste eine Kombination von Substrat- und Beschichtungsmaterialien gefunden werden, mit denen sowohl die UV-Durchlässigkeit als auch Schichthaftung und Klimabeständigkeit erfüllt werden konnten. Wie in Abb. 3 gezeigt, wurde auf Zeonex® und Zeonor® eine Transmission von über 85 % im gewünschten UV-Spektralbereich erzielt.

The prevalence of plastic optics in the field of sophisticated optical systems also increases the demand for coatings with complex filter functions. Nowadays simple antireflection coatings with a few layers are state of the art on polymer substrates [1]. However, interference filters require nanometer-precise deposition of sometimes more than 100 single-layers and they can reach a total thickness of several micrometers [2]. Injection molded plastic parts are often complex shaped or the optical elements are already cast in the housing (Fig. 2), which leads to an unfavorable layer thickness distribution.

In a BMWi funded collaborative project with Jenoptik Polymer Systems GmbH, the applicability of thick filter coatings was examined on plastic optical components. A UV short-pass filter with a passing range from 350 nm to 390 nm and a blocking range from 400 nm, was developed as a demonstrator.

1 *Komplex geformtes Optikelement aus Kunststoff. | Complex shaped plastic optical element.*

2 *Im Gehäuse eingegossenes Linsenelement. | Lens element casted in housing.*

Der am IOF entwickelte Beschichtungsprozess wurde dann bei Jenoptik Polymer Systems in ein produktionsreifes Stadium überführt.

Diese Ergebnisse entstanden im Rahmen des Projekts »OPTIKS« (Optische Interferenzfilter für komplex geformte Spritzguss-Elemente, FKZ KF2590602FK0), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

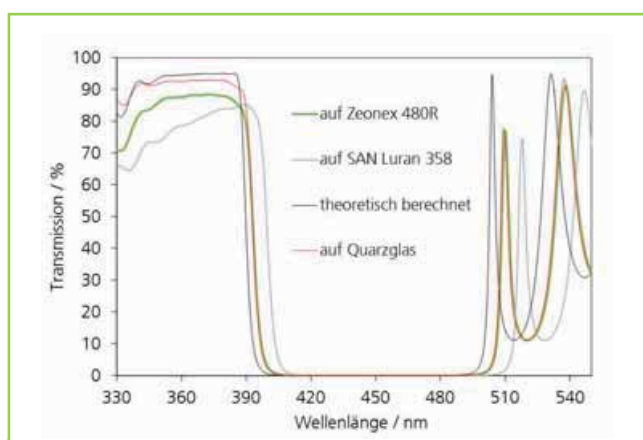
#### Literatur/References

- [1] Schulz, U.: Review of modern techniques to generate antireflective properties on thermoplastic polymers, Appl. Opt. 45 (2006) 1608–1618.
- [2] McLeod, A.: Thin Film Optical Filters, Adam Hilger Ltd., Bristol, 2001.

The challenge was to find a combination of substrate and coating materials enabling the required UV transmission and a good coating adhesion as well as climatic resistance. As shown in Fig. 3, coated Zeonex® and Zeonor® samples achieved a transmission of more than 85 % over the desired UV spectral range.

The IOF developed coating process was then transferred to Jenoptik Polymer Systems into the production line.

These results were obtained in the project "OPTIKS" (Optical interference filters for complex shaped injection-molded parts, FKZ KF2590602FK0), funded by the Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.



3 Gemessene Transmission eines UV-Kurzpassfilters auf verschiedenen Kunststoffsubstraten. | Measured transmittance of a UV short-pass filter on various plastic substrates.

## AUTHORS

Peter Munzert

Susanne Gaumitz<sup>1</sup>

Ulrike Schulz

Norbert Kaiser

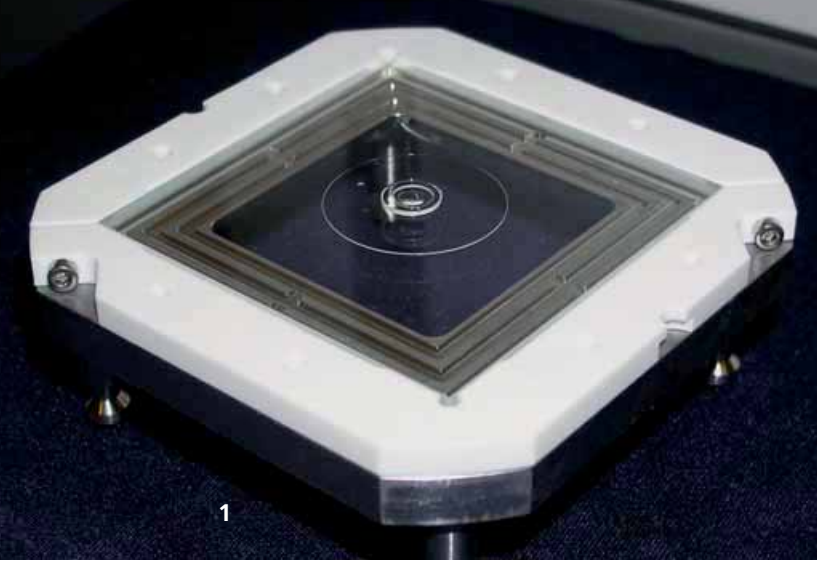
<sup>1</sup> Jenoptik Polymer Systems GmbH

## CONTACT

Dr. Peter Munzert

Phone +49 3641 807-271

peter.munzert@iof.fraunhofer.de



## ARRAYHAFFE MASTERSTRUKTUREN FÜR UV-REPLIKATION MITTELS STEP & REPEAT-PROZESS

### ARRAY-LIKE MASTER STRUCTURES FOR UV-REPLICATION USING THE STEP & REPEAT PROCESS

Die Entwicklung der mikroelektronischen Herstellungstechnologien ermöglichte durch die Parallelisierung von Fertigungsverfahren Komponenten mit wesentlich verringerten Kosten und Baugrößen. Dieses Grundkonzept wird zunehmend für die Herstellung abbildungsoptischer Komponenten genutzt, die auf einer Fertigung auf Wafer Level beruhen. Aktuell dominiert hierbei die UV-Replikation von Polymeren, bei der ein Werkzeug, das die Formen der herzustellenden Linsen in einer Arrayanordnung enthält, mit zunächst flüssigem Polymer in Kontakt gebracht wird und mittels UV-Bestrahlung gehärtet werden kann. Folglich muss in einem vorgelagerten Schritt eine arrayartige Masterstruktur hergestellt werden, die zur Fertigung der zur gewünschten Linsenform komplementären Formeinsätze genutzt wird. Abbildungsoptiken erfordern zumeist asphärische Linsenprofile mit vergleichsweise großen Pfeilhöhen im Bereich einiger Hundert Mikrometer.

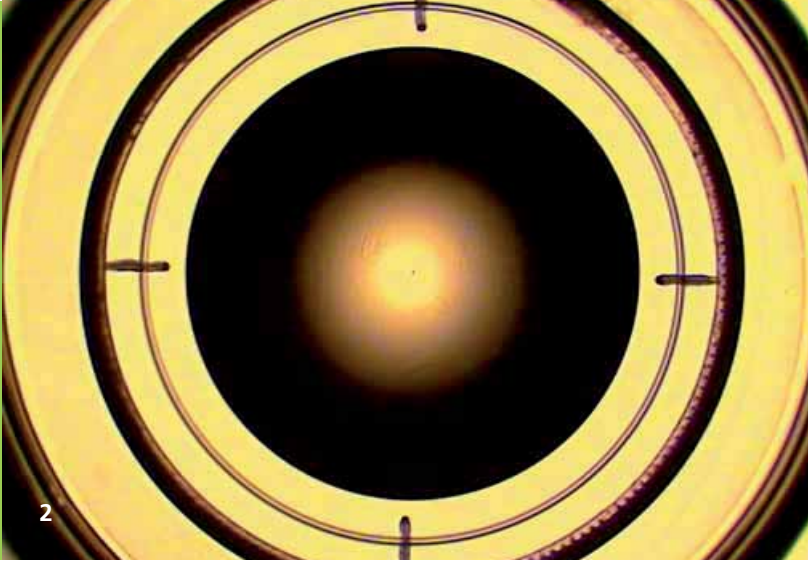
Derartige Strukturen können mittels spanender Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen erstellt werden, was eine wesentliche Erweiterung der Freiheiten im Design und in der Herstellung mikrooptischer Linsenarrays darstellt. Neben der zerspanenden Bearbeitung des Masters als Ganzes [1] kann ein Arraymaster

1 Auf einem Substrat angeordneter Abformstempel in Halterung. | Tool placed on a glass substrate which is clamped to a stocker.

As demonstrated in microelectronics fabrication, the parallelization of processes can lead to a significant reduction in costs as well as in size. This concept is also being applied to the fabrication of imaging optics fabricated on wafer level. Currently the wafer level fabrication of optical components is predominantly based on UV-replication where an array-like tool accommodating the molds of the individual lens surfaces is brought into contact with a liquid polymer which hardens under exposure to UV-radiation. Consequently, an array-like master structure has to be produced in a first step containing the inverse shape of the lens to be finally generated. In order to achieve sufficient imaging performance, aspheric lenses usually additionally require comparable large sag heights in the range of several hundred microns.

These structures can be manufactured using diamond machining, which is a powerful tool in the mastering process, boosting the degrees of freedom in optical design and fabrication of micro-optical lens arrays. In addition to the machining of a master as whole [1], an array-like master consisting of identical micro-structures can be fabricated based on subsequent UV-replications of a single lens master in a step & repeat process. Advantageously, the single high-sag and aspheric lens can be produced by conventional diamond turning and an excellent pitch tolerance in the range of  $\pm 1 \mu\text{m}$  can be achieved,





identischer Linsen durch die wiederholte und nebeneinander ausgeführte UV-Abformungen eines Einzellinsenwerkzeugs erstellt werden. Vorteilhafter Weise muss hierfür nur das Einzellinsenwerkzeug mittels Diamantbearbeitung hergestellt werden und es kann eine gute Abstandstoleranz der Linsen von etwa  $\pm 1 \mu\text{m}$  erreicht werden, die aus der Präzision der Verfahrtschritte der genutzten Step & Repeat-Anlage resultiert. Zu Beginn des Prozesses wird ein Polymertropfen auf dem Substrat dosiert (Abb. 1). Danach wird der auf einem luftgelagerten Tisch befindliche Wafer unter den Abformstempel gefahren. Im dritten Schritt wird der Stempel auf den Polymertropfen abgesetzt und die Härtung des Polymers mittels UV-Strahlung durchgeführt, sobald das Polymer die Form ausgefüllt hat. Hiernach verfährt der Stempel vom Wafer weg und löst sich vom verfestigten Polymer, das dem Substrat anhaftet und die Kontur des Formeinsatzes trägt. Besondere Anforderungen werden an das Stempelmaterial gestellt wie Transparenz im UV-Bereich, chemische Beständigkeit gegenüber dem auszuhärtenden Polymer, Formbeständigkeit zur Erzielung konstanter Abformergebnisse und einfache Entformbarkeit. Gegenwärtig werden Stempel aus elastischem Silikon und festem Polymer mit zusätzlicher Antifhaftbeschichtung genutzt (Abb. 2). Nach Auffindung der Prozessparameter wie Dosiermenge, Intensität und Dosis der härtenden UV-Strahlung, Stempelbewegungsprofil und Geschwindigkeiten konnten asphärische Oberflächenprofile mit  $250 \mu\text{m}$  Pfeilhöhe erstellt werden.

#### Literatur/References

- [1] Scheiding, S. et. al.: Aspheric Lens Array Machining and Replication, Proceedings EOS Conference at the World of Photonics Congress 2009 – Session: High Volume Manufacturing of Optical Components, 15.–17.6.2009, Munich (CD-ROM)

depending on the precision of the alignment stages of the step & repeat machine used. At the beginning of the process, a drop of liquid polymer is dispensed on the substrate (Fig. 1). Afterwards, the wafer is positioned laterally such that the drop is placed under the stamp. In the third step, the stamp is moved down to a specified position and contacts the drop. The UV-illumination and hence the curing starts after the polymer has filled the mold. Finally, the stamp moves up again and detaches from the polymer which is now rigid, attaches to the wafer, and contains the surface profile of the mold. Special requirements apply to the stamp material, such as transparency in the UV-radiation range, high chemical resistance against the polymer to be cured, dimensional stability in order to achieve constant replication results, and easy de-molding. Currently in the process flow, the single lens stamp is made of flexible silicone or a rugged polymer material coated with an anti-adhesive layer (Fig. 2). After adjusting the critical lens imprint parameters, such as polymer dispense, intensity and dose of curing UV-radiation, stamp motion trajectory and speed, continuous aspherical surface profiles with  $250 \mu\text{m}$  sag height were generated.

## AUTHORS

*Frank Wippermann*

*Andreas Reimann*

*Gilbert Leibeling*

*Ralf Steinkopf*

*Wilko Fuhlrott*

## CONTACT

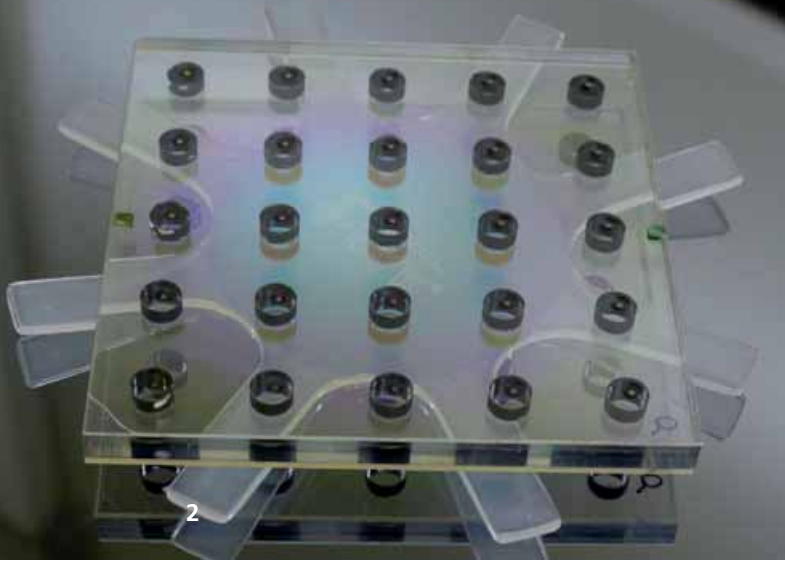
*Dr. Frank Wippermann*

*Phone +49 3641 807-437*

*frank.wippermann@iof.fraunhofer.de*

2 Mikroskopaufnahme einer abgeformten Linse mit Justierstrukturen. | Microscopic image of a replicated lens including alignment marks.





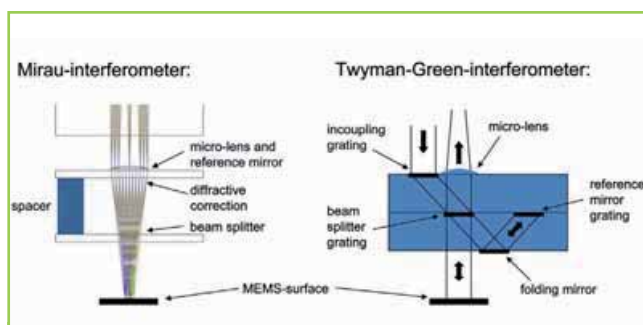
# INTEGRIERTE MIKRO-INTERFEROMETER ARRAYS FÜR PARALLELE MEMS-INSPEKTION

## INTEGRATED MICRO-INTERFEROMETER ARRAYS FOR PARALLEL MEMS-TESTING

Der Einsatz von sogenannten Mikro-Elektro-Mechanischen Systemen (MEMS) hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Prominente Beispiele sind miniaturisierte Druck- oder Beschleunigungssensoren in mobilen Kommunikationsgeräten und Kraftfahrzeugen oder IR-Strahlungsdetektoren für Wärmebildkameras. Die Herstellung solcher Elemente basiert auf der lithographischen Strukturierung von Silizium. Die funktionale Inspektion der Chips während der Herstellung stellt dabei einen äußerst zeitkritischen Schritt in der Prozesskette dar.

The use of the so called Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) has gained a significant importance in recent years. Prominent examples are miniaturized pressure or acceleration sensors in mobile communication systems and cars, or IR-radiation detectors for thermal imaging cameras. The realization of such elements is based on the lithographic patterning of silicon. During the fabrication process the single elements need to be tested according to their functionality which is an extremely time-critical step.

In the framework of the EU-project "Smart Inspection System for High Speed and Multifunctional Testing of MEMS and MOEMS – SMARTIEHS", a collaboration of European partners has developed an innovative optical MEMS-inspection system operating with a large number of parallel channels. Key components of the system are the measurement wafers developed at the Fraunhofer IOF, each containing an array of 5 x 5 micro-interferometers of Mirau- or Twyman-Green type. Figure 1 shows an optical design scheme of a single channel of the two interferometer arrays.



1 Strahlengänge der miniaturisierten Interferometer. | Schematic beam path of the miniaturized interferometers.

2 Wafer mit 5 x 5 Mirau-Interferometern (laterale Auflösung < 5 µm). | Wafer carrying an array of 5 x 5 Mirau-interferometers (lateral resolution < 5 µm).



Im Rahmen des EU-Projekts »Smart Inspection System for High Speed and Multifunctional Testing of MEMS and MOEMS - SMARTIEHS« wurde in enger Kooperation mit europäischen Partnern ein neuartiges paralleles optisches Sensorsystem für diese Messaufgabe entwickelt. Schlüsselkomponenten des Systems stellen die beiden am Fraunhofer IOF entwickelten Messwafer dar, die jeweils ein Array von 5 x 5 Mikrointerferometern vom Mirau- bzw. Twyman-Green-Typ enthalten. In Abb. 1 ist schematisch der optische Strahlengang in je einem Einzelkanal der beiden Interferometerarrays dargestellt.

Die 25 Mirau-Interferometer bestehen aus refraktiven Mikrolinsen, die mit einer zusätzlichen diffraktiven Korrektur achromatisiert sind. Der Referenzspiegel ist auf dem die Linsen tragenden Wafer integriert [1]. Im Fall des Twyman-Green Interferometerarrays besteht der optische Strahlengang aus insgesamt drei hochauflösenden Gittern unterschiedlicher Funktion (Strahlableitung, Strahlteilung, Referenzspiegel) und einer abbildenden Mikrolinse [2]. Alle erforderlichen Komponenten wurden im Wafermaßstab hergestellt und zu den in Abb. 2 und 3 gezeigten komplexen optischen Mikrosystemen montiert.

Der erfolgreich demonstrierte parallele Ansatz erlaubt eine signifikante Erhöhung des Durchsatzes bei der Herstellung der MEMS-Chips.

#### Literatur/References

- [1] Albero, J. et al.: J. Micromech. Microeng. 21, 065005 (2011).
- [2] Oliva, M. et al.: Twyman-Green-type integrated laser interferometer array for parallel MEMS testing, accepted for publication in J. Micromech, Microeng, (2011).

The 25 Mirau-interferometers consist of refractive micro-lenses which are achromatized with an additional diffractive correction lens. The reference mirror is integrated into the wafer carrying the lenses [1]. In the case of the Twyman-Green interferometer array, the optical path contains 3 high-resolution gratings providing different functions (beam deflection, beam splitting, reference mirror), and a micro-lens for imaging purposes [2]. All required components have been fabricated in wafer-scale and assembled to the complex micro-systems shown in Figs. 2 and 3.

The successfully demonstrated parallel approach allows for a significant throughput increase in the fabrication of MEMS-chips.

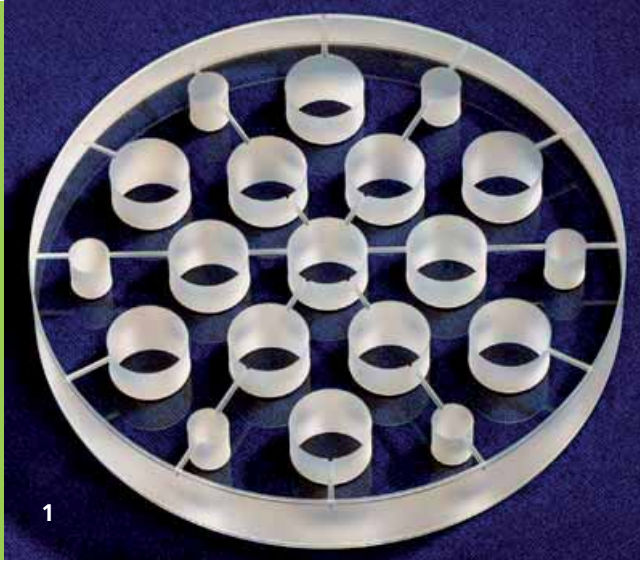
## AUTHORS

Uwe D. Zeitner  
 Maria Oliva  
 Peter Dannberg  
 Tino Benkenstein  
 Torsten Harzendorf

## CONTACT

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

3 Ausschnitt mit einem Kanal des Twyman-Green Gitterinterferometerarrays. | Enlarged view of one channel of the Twyman-Green interferometer array.



## SILIKATISCHES UND DIREKTES BONDEN: HOCHWERTIGE FÜGETECHNOLOGIEN FÜR GLAS

## SILICATE AND DIRECT BONDING: PREMIUM JOINING TECHNOLOGIES FOR GLASS

Kleben ist die bekannteste Fügetechnologie für Glas, früher mit »Canada-Balsam«, heute mit Brechzahl angepassten Polymeren. Häufig sind solche Verbindungen jedoch nicht ausreichend. Temperatur-Schwankungen erzeugen Spannungen durch die große thermische Ausdehnung der Klebstoffe und Intensive Laserstrahlung führt zur Zerstörung der Polymerschicht. Für Hochleistungs-Anwendungen bietet das IOF je ein materialangepasstes und ein Zwischenschicht freies Fügeverfahren an: das silikatische und das direkte Bonden.

Beim silikatischen Bonden werden die beteiligten Glasoberflächen durch eine alkalische Flüssigkeit vorübergehend angelöst, ehe durch eine nachfolgende Wärmebehandlung die Feuchtigkeit wieder ausgetrieben und eine stoffschlüssige, feste Verbindung geschaffen wird.

Beim direkten Bonden werden die Glasoberflächen lediglich gereinigt und über einen Plasma-Prozess aktiviert und hydrophilisiert. Danach werden die Oberflächen kontaktiert und durch eine Wärmebehandlung unter Druck im Vakuum verbunden.

**1** 150 mm-Leichtgewichtstruktur (plan-plan) in »Sandwichbauweise« (beidseitig direkt gebondet). | 150 mm light-weight composite in "sandwich" structure (both sides direct bonded).

Gluing is the most common technology for joining glass substrates directly, previously with "Canada-wax" and now with index matched adhesives. Yet, this doesn't always give adequate bonds. Temperature fluctuations generate stresses through the high coefficients of thermal expansion of adhesives. Also, intense laser radiation deteriorates the polymer bonding layer. For high-performance applications, Fraunhofer IOF offers silicate bonding and direct bonding, two glass bonding technologies that are materials adapted or interlayer free, respectively.

With silicate bonding, the glass surfaces to be joined are temporarily etched by an alkaline solution, before the liquid is later expelled in a tempering process and solid, permanent bonding is achieved.

With direct bonding, the glass surfaces are only cleaned and subsequently activated by a low-pressure plasma process to make them hydrophilic. Then the surfaces are contacted and bonded by a tempering process under pressure in a vacuum environment.

Both bonding methods require highly planar (conforming) glass surfaces of low roughness, although requirements are slightly less demanding for silicate bonding as compared



Beide Bondverfahren setzen sehr gute Ebenheit (Konformität) und geringe Rauheit der Glasoberflächen voraus, wobei die Anforderungen beim silikatischen Bonden naturgemäß schwächer ausfallen, als beim direkten Bonden. Der Verbund unbeschichteter Proben weist im 3-Punkt-Biegebruchversuch eine Festigkeit von ca. 60 % des massiven Glasmaterials auf.

Sowohl das direkte wie das silikatische Bonden wurden an Substraten aus Kieselglas (fused silica) und ULE-Glas (ultra-low expansion) erfolgreich erprobt. Abbildung 1 zeigt eine Leichtgewicht-Struktur aus ULE, die durch direktes Bonden in »Sandwichbauweise« (zwei dünne Glas-Wafer umschließen ein Substrat mit Bohrungen) erstellt wurde. Abbildung 2 zeigt ein analoge Leichtgewichtstruktur, bei der zunächst zwei in einander passende (konforme) sphärische Flächen durch silikatisches Bonden gefügt wurden, ehe die planare Rückseite durch direktes Bonden mit einem Glaswafer verschlossen wurde.

Diese Arbeiten wurden vom BMWI/DRL unter dem Förderkennzeichen Nr. 50 YB 0814 unterstützt.

#### Literatur/References

- [1] Kalkowski, G.; Risse, S.; Rohde, M.; Rothhardt, C.; Eberhardt, R.: Optical contacting of low expansion materials, Proc. of SPIE Vol. 8126 (2011) 81261F-6.

to direct bonding. For uncoated samples, 3-pt-bending-fracture tests reveal a bonding strength for the compound of about 60 % of the bulk materials.

Both silicate bonding and direct bonding have been successfully tested with substrates made from fused silica and ULE glass (ultra-low expansion). Figure 1 shows a light-weight "sandwich" structure of ULE as obtained from direct bonding of two glass wafers to the surfaces of a glass substrate supplied with drilled holes and planar on both sides. Figure 2 shows a similar light-weight composite, where the drilled structure is spherically curved on one side and planar on other. Here, the spherical surface was first joined by silicate bonding to a conformal surface of another massive glass element, before closing the planar backside by direct bonding.

This work has been supported by the German Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie under contract no. 50 YB 0814.

## AUTHORS

*Gerhard Kalkowski*

*Stefan Risse*

*Ramona Eberhardt*

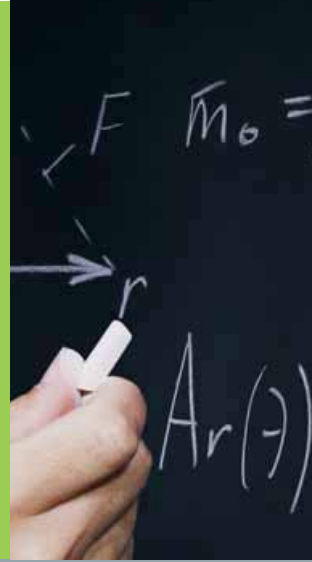
## CONTACT

*Dr. Gerhard Kalkowski*

*Phone +49 3641 807-337*

*gerhard.kalkowski@iof.fraunhofer.de*

2 Leichtgewichtstruktur (konkav-plan) in »Sandwichbauweise« (Oberseite silikatisch gebondet). | Light-weight composite (plain-concave) in "sandwich" structure (top side silicate bonded).



## FÜR LÖSUNGEN MIT LICHT ...

... NEUE MATERIALIEN ERFORSCHEN  
UND NEUE PHÄNOMENE ENTDECKEN.

## FOR SOLUTIONS WITH LIGHT ...

... INVESTIGATE NEW MATERIALS  
AND DISCOVER NEW PHENOMENA.



# GRUNDLAGEN BASIC RESEARCH

Grundlagenforschung im Bereich der Photonik beflügelt nicht nur die Phantasie, sondern verschiebt auch die Grenzen des Machbaren und ist langfristig die Basis für erfolgreiche Innovationen.

Ein Beispiel für die Verknüpfung von Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung ist die Entwicklung von Metamaterialien, künstlich hergestellten optischen Materialien. Deren besondere, in der Natur nicht vorkommende Eigenschaften, wie etwa ein negativer Brechungsindex oder plasmonische Resonanzen, bieten die Chance, die optische Abbildung zu perfektionieren und fundamentale Grenzen in der Optik zu überschreiten.

Auf dem Gebiet der Modellierung und Simulation optischer Effekte arbeitet das Fraunhofer IOF mit international renommierten Institutionen zusammen. Die erarbeiteten Grundlagen sind als Vorlaufforschung essentiell für kundenspezifische Entwicklungen und Systeme. Ein Beispiel sind neue Designs von Faseroptiken für Ultrakurzpulslaser, mit deren Hilfe Leistungsfähigkeit und Anwendungsgebiete der Systeme erweitert werden. So ist die interne Strukturierung von transparenten Materialien mit Femtosekunden-Laserpulsen eine innovative Technologie zur Erzeugung von Nanogittern, welche beispielsweise zur Realisierung komplexer dreidimensionaler Phasenelemente zur Polarisationssteuerung genutzt werden.

Die enge Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer IOF und dem IAP der Friedrich-Schiller-Universität sichert den wissenschaftlichen Vorlauf und schafft die Voraussetzung für zukünftige Lösungen mit Licht.

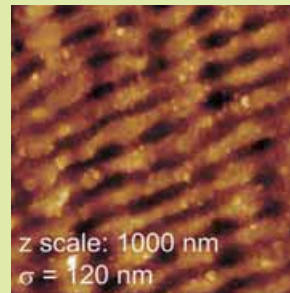
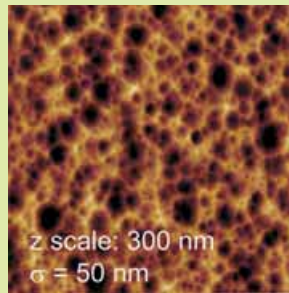
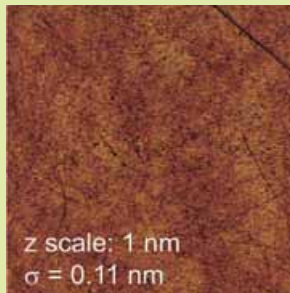
Basic research in photonics not only inspires the imagination, it expands the limits of what is possible, and forms the basis for successful innovations over the long-term.

An example of one way basic research has been combined with applied research is the development of metamaterials, artificially-produced optical materials. Their properties, which do not occur in nature, such as a negative refraction index or plasmonic resonances, give us the opportunity to perfect optical representation and exceed fundamental limits in optics.

The Fraunhofer IOF is working with renowned international institutions in the area of modeling and simulation of optical effects. The principles discovered are essential research steps toward developing customer-specific innovations and systems. New fiberoptics designs for ultra-short-pulse lasers used to expand the system's power and areas of application are just one example. Another is internal structuring of transparent materials with femto-second laser pulses, which is an innovative technology used to construct nano-grids, which themselves can be used to implement complex three-dimensional phase elements to control polarization.

The close cooperation between the Fraunhofer IOF and the IAP at Friedrich Schiller University ensures academic leadership and lays the groundwork for future solutions with light.





1

## UNIVERSELLE STREULICHTMODELLIERUNG GLATTER BIS STRUKTURIERTER OBERFLÄCHEN

## UNIVERSAL LIGHT SCATTER MODELING OF SMOOTH TO STRUCTURED SURFACES

Die Analyse von gestreutem Licht und das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Oberflächenstruktur und Streulichteigenschaften sind von enormer Bedeutung für viele technologische Entwicklungen, unter anderem in den Bereichen verlustarme optische Oberflächen und Schichten, strukturierte Solarzellen bis hin zu funktionalen technischen Oberflächen. Das Fraunhofer IOF verfügt über eine international ausgewiesene Kompetenz auf dem Gebiet der Messung und Modellierung der Streulichteigenschaften von Oberflächen, Schichtsystemen und Materialien bei Wellenlängen vom EUV über sichtbares Licht bis in den IR-Bereich. Zur Verbindung struktureller und optischer Eigenschaften sind analytische Streulichtmodelle unabdingbar. Diese zeichnen sich gegenüber rigorosen Modellen vor allem dadurch aus, dass sie anschauliche Einblicke in die zugrundeliegenden Streulichtmechanismen ermöglichen, deutlich weniger Rechenaufwand benötigen und in vielen Fällen ohne großen Aufwand umgekehrt werden können. Dies ermöglicht neben der Vorhersage der Streulichteigenschaften gegebener Strukturen beispielsweise auch die vorteilhafte Charakterisierung von Oberflächen-Nanostrukturen durch Streulichtmessverfahren [1].

Light scattering analysis and understanding the relationships between the structural and the scattering properties of surfaces are of crucial importance for many technological developments. Examples are low-loss optical surfaces and coatings, structured solar cells, and functional engineering surfaces. The Fraunhofer IOF has established a worldwide reputation with respect to light scattering measurement and modeling of surfaces, thin film coatings and materials at wavelengths ranging from the EUV over the visible to the IR spectral regions.

Analytical scatter models are essential in order to link structural and optical properties and to gain insight into the relevant scatter mechanisms. Compared to rigorous models, they usually require much less computational effort and can often be inverted directly. In addition to predicting the scattering properties of a given structure, this enables surface nanostructures to be characterized using light scattering techniques [1].

1 *Optische und funktionale Oberflächen mit zunehmender Rauheit. Superpoliertes Quarzglas (links), Geätzte TCO-Schicht (mitte), Laserstrukturierte Stahloberfläche (rechts). AFM Messfeld 10 x 10 µm². | Optical and functional surfaces with increasing roughness. Superpolished fused silica (left), etched TCO coating (center), laser-treated steel surface (right). AFM 10 x 10 µm².*

Bisherige analytische Modelle waren allerdings entweder auf sehr kleine Oberflächenrauheiten (Rayleigh-Rice-Theorie), wie z. B. optische Oberflächen (Abb. 1, links), oder aber kleine Streuwinkel (Beckmann-Kirchhoff-Theorie) beschränkt. Für viele neue Anwendungsfelder wie optische Oberflächen für extrem kurze Wellenlängen (EUV Lithographie), Light-trapping-Strukturen für die Photovoltaik (Abb. 1, mitte) oder aber die streulichtbasierte Charakterisierung technisch rauer Oberflächen (Abb. 1, rechts) sind diese Annahmen jedoch zunehmend nicht mehr gerechtfertigt.

In Rahmen einer Kooperation mit dem College of Optics and Photonics/CREOL der University of Central Florida wurde eine dort entwickelte neue Theorie in ein Software-Tool implementiert und experimentell überprüft. Die sogenannte Generalisierte Harvey-Shack (GHS) Theorie erlaubt die Streulichtmodellierung für beliebige stochastisch raue Oberflächen ohne Einschränkungen hinsichtlich Parametern wie Rauheit, Korrelationslänge oder Autokorrelationsfunktion [2]. Sie vereint damit prinzipiell die Vorteile bisheriger analytischer Modelle ohne deren Limitierungen. Dies bedeutet nicht zuletzt, dass die Streulichteigenschaften einer gegebenen beliebig rauen Oberflächenstruktur ohne a-priori-Annahmen kohärent mit einem einzigen Modell vorhergesagt werden können.

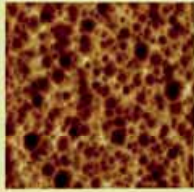
Beispielhaft wurde für eine strukturierte TCO-Oberfläche (Abb. 1, Mitte) das mittels GHS-Theorie berechnete winkelaufgelöste Streulicht (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) als Funktion der Lichtwellenlänge berechnet. Durch Rauheitsmessungen im gesamten Bereich relevanter Ortsfrequenzen wird zunächst das Rauheitsspektrum der Oberflächenstruktur (Surface Power Spectral Density function, PSD) ermittelt.

Unfortunately, existing analytical models were confined to either low roughness levels (Rayleigh-Rice theory) like in the case of optical surfaces (Fig. 1, left) or small scatter angles (Beckmann-Kirchhoff theory). For many new fields of applications, however, such as optics for extremely short wavelengths (EUV lithography), light trapping structures for photovoltaics (Fig. 1, center), or the scatter-based characterization of technically rough surfaces (Fig. 1, right), these conditions are no longer satisfied.

In cooperation with the College of Optics and Photonics/ CREOL of the University of Central Florida, a new theory was implemented into a software tool and verified experimentally. The so called Generalized Harvey-Shack (GHS) theory enables scatter modeling of arbitrary stochastically rough surfaces without limitation regarding parameters such as roughness, correlation length, or autocovariance function [2]. The theory thus exhibits the advantages of both the Rayleigh-Rice theory and the classical Beckmann-Kirchhoff theory, with the limitations of neither. As a result, the scattering properties can be modeled using one single model and do not rely on any a priori assumptions about the structure.

As an example, the angle resolved scattering (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) of a structured TCO surface (Fig. 1, center) was modeled as a function of the wavelength using the GHS theory. First, the roughness spectrum (Power Spectral Density function, PSD) within the entire range of relevant spatial frequencies was determined based on roughness measurements.

Surface topography (AFM)



2



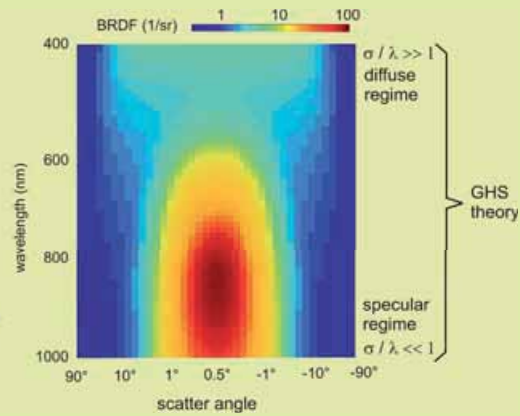
Power spectral density function



GHS theory



Scattered power as a function of scatter angle, wavelength, ...



Auf Basis dieser PSD wird die BRDF bei den gewünschten Parametern berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 2 dargestellt.

The BRDF was then calculated using the PSD as input. The results are shown in Fig. 2.

Die streulichtrelevante rms-Rauheit der TCO-Schicht beträgt 60 nm. Damit kann die Oberfläche bei Wellenlängen oberhalb von 900 nm noch als spiegelnd glatt angesehen werden (specular regime). In diesem Bereich ist die konventionelle Rayleigh-Rice-Theorie gerade noch anwendbar. Hin zu kürzeren Wellenlängen wird jedoch zunehmend Energie aus der spekularen Richtung in größere Streuwinkel umverteilt. Unterhalb von 600 nm erscheint die Oberfläche diffus (diffuse regime). Im Übergangsbereich um 800 nm sagt das Modell eine signifikante Effizienzsteigerung durch Light-Trapping voraus, wenn diese Struktur in einer Dünnschichtszelle eingesetzt wird. Das Beispiel verdeutlicht die Stärke des neuen Modellierungsverfahrens, den gesamten Parameterbereich kontinuierlich abzudecken. Die Gültigkeit und Grenzen der neuen GHS-Theorie wurde durch Vergleiche mit rigorosen Rechnungen und experimentellen Ergebnissen im Detail untersucht [3]. In Abb. 3 sind mittels GHS-Theorie berechnete Streulichtverteilungen von strukturierten Stahloberflächen mit zunehmender Rauheit im Vergleich zu Ergebnissen von Streulichtmessungen bei 325 nm dargestellt. Abgesehen von leichten Abweichungen, die durch die Inhomogenität der Oberflächen erklärt wurde, stimmen Theorie und Experiment sehr gut überein.

The scatter-relevant rms roughness of the TCO film is 60 nm. The surface can therefore be considered optically smooth at wavelengths longer than 900 nm (specular regime). In this range, the Rayleigh-Rice theory is still valid. However, towards shorter wavelengths, an increasing fraction of the energy is sucked out of the specular beam and redistributed into larger scatter angles. Below 600 nm, the surface appears to be diffuse (diffuse regime). In the transition region around 800 nm, the model predicts a significant efficiency enhancement through light trapping if the structure is employed in a thin film solar cell. This example illustrates the capability of the new approach to continuously cover the entire range of relevant parameters. The range of validity of the new GHS theory was investigated in detail through comparisons with rigorous calculations and experimental results [3]. In Fig. 3, scattering distributions of structured steel surfaces of increasing roughness predicted using the GHS theory compared to results of scatter measurements at 325 nm are shown. Aside from slight deviations caused by inhomogeneities of the samples, there is a good agreement between experimental and modeling results.

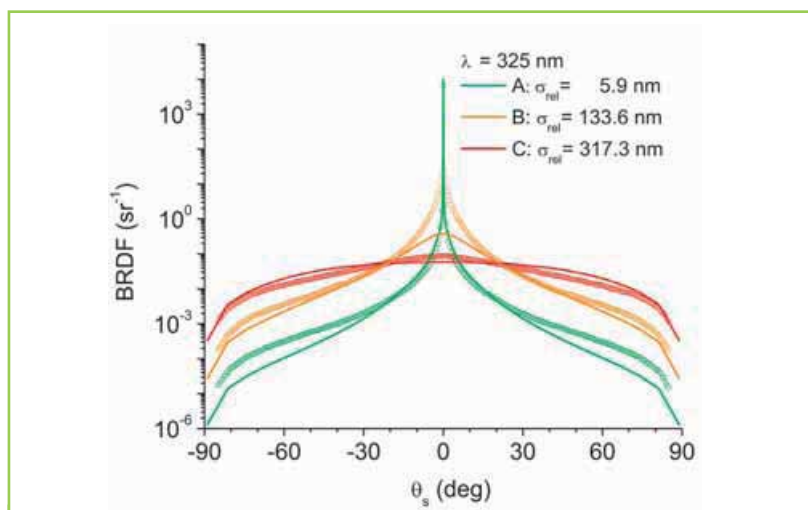
Mit der realisierten Implementierung der GHS-Theorie wird die Kompetenz des Fraunhofer IOF bei der Modellierung von Streulichteigenschaften signifikant in Richtung rauere Strukturen erweitert. Zusammen mit den am IOF und am IAP vorhandenen rigorosen Berechnungs-Tools können damit verschiedenste Aufgabenstellungen im Bereich der optischen Eigenschaften strukturierter Oberflächen tiefgehend und gleichzeitig mit direktem Bezug zur Anwendung gelöst werden.

2 Modellierung des winkelaufgelösten Streulichts einer strukturierten TCO-Oberfläche mittels GHS Theorie (schematisch). | Modeling of angle resolved scattering of structured TCO surface through GHS theory (schematic).

## Literatur/References

- [1] Trost, M.; Schröder, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: Influence of the substrate finish and thin film roughness on the optical performance of Mo/Si multilayers, Appl. Opt. 50, C148–C153 (2011).
- [2] Krywonos, A.; Harvey, J. E.; Choi, N.: Linear systems formulation of scattering theory for rough surfaces with arbitrary incident and scattering angles, J. Opt. Soc. Am. A 28, 1121–1138 (2011).
- [3] Schröder, S.; Duparré, A.; Coriand, L.; Tünnermann, A.; Penalver, D. H.; Harvey, J. E.: Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness, Opt. Express 19, 9820–9835 (2011).

With the implementation of the GHS theory, the expertise of Fraunhofer IOF in modeling light scattering properties was significantly enhanced towards structured surfaces. Together with the rigorous calculation tools at IOF and IAP, this enables various tasks related to optical properties of structured surfaces to be solved thoroughly and at the same time with a direct link to the application.



3 Winkelaufgelöstes Streulicht (BRDF) bei 325 nm von strukturierten Stahloberflächen zunehmender Rauheit. Vergleich Modellierung mittels GHS-Theorie (Linien) mit Messungen bei 325 nm (Punkte). | Angle resolved scattering at 325 nm of increasingly rough structured steel surfaces. Comparison of modeling using GHS theory (lines) with measurement results at 325 nm (dots).

## AUTHORS

Sven Schröder

James E. Harvey<sup>1</sup>

Angela Duparré

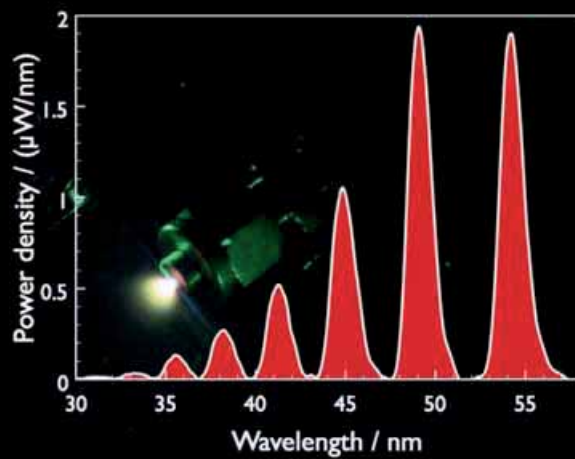
<sup>1</sup> University of Central Florida,  
College of Optics and Photonics/  
CREOL

## CONTACT

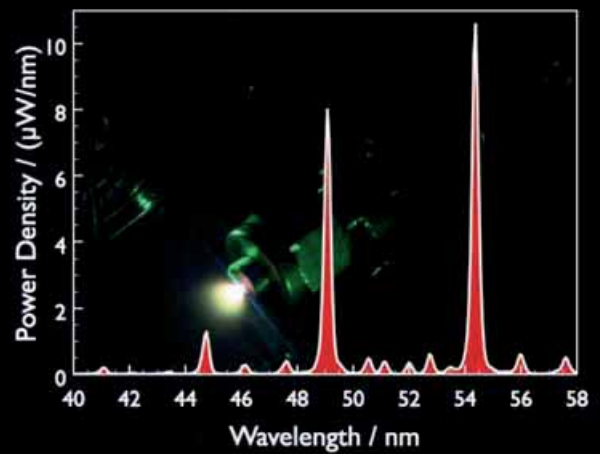
Dr. Sven Schröder

Phone +49 3641 807-232

sven.schroeder@iof.fraunhofer.de



1 a



1 b

## ERZEUGUNG HOHER GASHARMONISCHER BEI HOHEN PULSFOLGEFREQUENZEN

### HIGH HARMONIC GENERATION AT HIGH REPETITION RATE

Kohärente, gepulste und kurzwellige Strahlung hat das Potential eine Vielzahl von fundamentalen Fragestellungen in Physik, Biologie und Chemie zu beantworten. Typischerweise wird diese Strahlung an großen Forschungseinrichtungen erzeugt. Eine interessante Alternative ist die laserbasierte Erzeugung hoher Gasharmonischer [1]. Dabei wechselwirkt ein Laserpuls mit einem Gas bei so hohen Intensitäten, dass nur Wiederholraten von einigen kHz erzielt werden können. Die stetige Entwicklung der Faserlasertechnologie hat jetzt die Möglichkeit eröffnet, die Wiederholraten drastisch zu steigern.

Nichtlineare Kompression eines Faserverstärkersystems in Hohlfasern führt zu 40 fs Pulsen mit mehr als 0,5 mJ Pulsenergie und einer Spitzenleistung von über 7 GW [2]. Mit diesem System konnte eine Durchschnittsleistung von 3,2  $\mu\text{W}$  in einer einzelnen Harmonischen bei 49 nm Wellenlänge und 50 kHz erzeugt werden, was bereits einen Rekordwert für direkte Erzeugung darstellt. Ähnliche Level können sonst nur durch Leistungsüberhöhung in einem externen Resonator hoher Güte erreicht werden [3].

Coherent, pulsed and short-wavelength radiation has the potential to help answer fundamental questions in physics, biology and chemistry. Typically, such radiation is generated at large-scale research facilities. Laser-based generation by means of high gas harmonics is an interesting alternative [1]. In this process, a laser pulse interacts with a gas at such high intensities, that repetition rates of only a few kHz can be achieved. The continual development of fiber laser technology has now opened the possibility to significantly increase the repetition rate.

Nonlinear compression of a fiber amplifier system in hollow core fibers leads to 40 fs pulses with an energy of more than 0.5 mJ and a pulse peak power of over 7 GW [2]. An average power of 3.2  $\mu\text{W}$  at 49 nm wavelength in a single harmonic could be generated at 50 kHz with such a system, which already constitutes a record value for direct generation. Usually, similar power levels can only be achieved by enhancement in an external resonator of high quality [3].

1 *Spektrum der hohen Gasharmonischen, die mit einer Wiederholrate von 50 kHz (a) bzw. 1 MHz (b) erzeugt wurden. | Spectrum of high gas harmonics generated with a repetition rate of 50 kHz (a) and 1 MHz (b), respectively.*

Eine Steigerung auf bis zu 1 MHz Wiederholrate wurde durch die Verwendung eines neuartigen Large Pitch Faserdesigns möglich. Damit liefert das Lasersystem eine Ausgangsleistung von 200 W, was in mehrere  $\mu$ W Leistung in einer einzelnen Harmonischen umgesetzt werden konnte.

A further increase to 1 MHz repetition rate became possible by the use of an innovative large pitch fiber design. The laser system provided with this an average output power of 200 W, which could be converted to several  $\mu$ W of power in a single harmonic.

Die vorgestellten Arbeiten werden durch das European Research Council in dem European Union's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013)/ERC unter Projekt-Nr. 240460 gefördert.

This work is supported by the European Research Council under the European Union's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013)/ERC Grant agreement no. 240460.

#### Literatur/ References

- [1] Ferray, M.; L'Huillier, A.; Li, X.; Lompre, L.; Mainfray, G.; Manus, C.: Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 21 (1988) L31.
- [2] Hädrich, S.; Krebs, M.; Rothhardt, J.; Carstens, H.; Demmler, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: Generation of  $\mu$ W level plateau harmonics at high repetition rate, *Opt. Express* 19 (2011) 19374.
- [3] Jones, J.: Intracavity high harmonic generation with fs frequency combs, in *High Intensity Lasers and High Field Phenomena*, OSA Technical Digest (CD) (2011) paper HFB5.

## AUTHORS

*Steffen Hädrich*<sup>1</sup>

*Manuel Krebs*<sup>1</sup>

*Jan Rothhardt*<sup>1</sup>

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

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

<sup>2</sup> *Fraunhofer IOF*

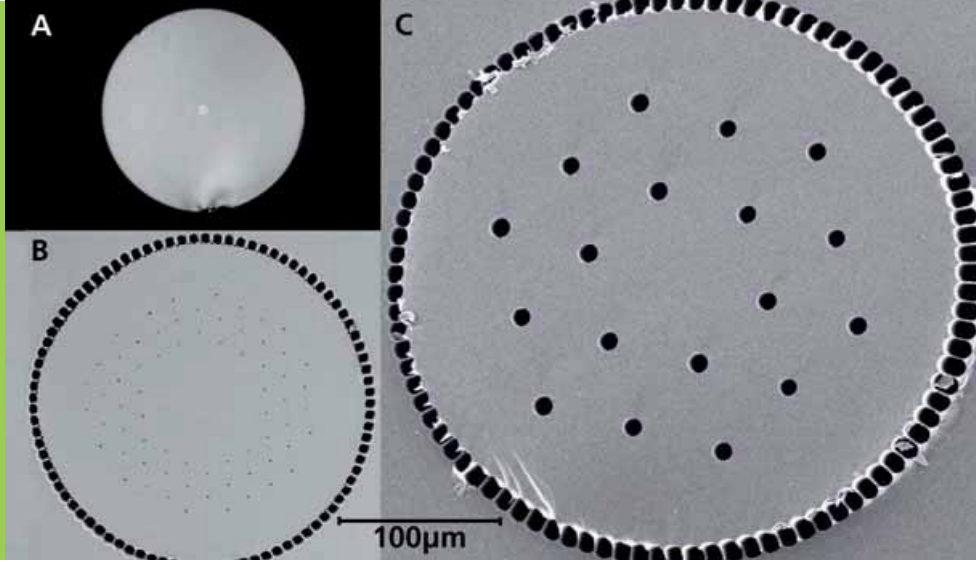
## CONTACT

*Prof. Dr. Jens Limpert*

*Phone +49 3641 947-811*

*jens.limpert@iof.fraunhofer.de*





## DESIGN GRUNDMODIGER AKTIV DOTIERTER GROSSKERNFASERN

### DESIGNING ACTIVELY DOPED LARGE MODE AREA FIBERS

Faserlasersysteme sind gekennzeichnet durch ihre exzellente Strahlqualität und hohe Effizienz. Vor allem für gepulste Hochleistungslasersysteme stellen aber parasitäre nichtlineare Effekte die größte Herausforderung dar und machen die Anwendung aktiv dotierter Großkernfasern notwendig. Hierbei gilt es insbesondere grundmodigen Betrieb und somit optimale Strahlqualität sicherzustellen.

Die neuartigen Large-Pitch Fasern nutzen eine photonische Struktur von wenigen hexagonal angeordneten Löchern in großem Lochabstand (Abb. 1), um Moden höherer Ordnung zu delokalisieren. Die Delokalisierung bewirkt einerseits eine reduzierte Anregung dieser Moden durch das zu verstärkende grundmodige Signallicht und andererseits einen verringerten Überlapp mit dem aktiv dotierten Kernbereich. Folglich wird die Grundmode der Faser sowohl in der Anregung am Faseranfang als auch in der Verstärkung bevorzugt. Die Einfachheit des Faserdesigns garantiert eine hervorragende Reproduzierbarkeit.

Fiber laser systems are characterized by their excellent beam quality and high efficiency. However, parasitic nonlinear effects are challenging for pulsed high power laser systems. Therefore, actively doped fibers with very large mode areas are required. Herein, it is most important to ensure single-mode operation and, therewith, excellent beam quality.

The innovative large-pitch fibers employ a photonic structure consisting of few hexagonally arranged air holes with large hole-to-hole distances (Fig. 1) to achieve a delocalization of higher order modes. The delocalization reduces the excitation of these modes by the seed signal and minimizes their overlap with the actively doped region. Therefore, the fundamental mode experiences an improved excitation at the fiber input and a preferential amplification. The simplicity of the fiber design ensures an excellent reproducibility. As the fiber design is not based on resonant effects, it is easily scalable by increasing the hole-to-hole distance.

**1** Mikroskopaufnahmen (gleich skaliert) einer a) Standard-Stufenindexfaser mit einem 6  $\mu\text{m}$  Kern und einem Außendurchmesser von 125  $\mu\text{m}$ , b) 85  $\mu\text{m}$  Kern Stabfaser mit 200  $\mu\text{m}$  Luftmanteldurchmesser und c) 108  $\mu\text{m}$  Kern Large-Pitch Faser mit 340  $\mu\text{m}$  Luftmantel. | Microscope images (all at the same scale) of a) standard step index fiber with 6  $\mu\text{m}$  core and 125  $\mu\text{m}$  outer diameter, b) 85  $\mu\text{m}$  core rod type photonic crystal fiber with 200  $\mu\text{m}$  air-clad diameter, and c) 108  $\mu\text{m}$  core large-pitch fiber with 340  $\mu\text{m}$  airclad diameter.

Da das Faserdesign nicht auf resonanten Effekten beruht, ist es durch Erhöhung des Lochabstandes leicht skalierbar und wurde mit Lochabständen von 30 µm bis 75 µm realisiert. Mit Hilfe dieser Fasern konnten neue Maßstäbe in der Kombination von höchster gepulster Ausgangsleistung und größter Modenfeldfläche im grundmodigen Betrieb gesetzt werden. Bei Modenfelddurchmessern über 50 µm konnten Ausgangsleistungen von bis zu 300 W Durchschnittsleistung bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität ( $M^2 < 1,4$ ) gezeigt werden [1]. Auch die Grenze von 100 µm Modenfelddurchmesser im grundmodigen Betrieb konnte erfolgreich überschritten werden und ermöglichte Pulsenergien von 2,2 mJ bei einer Pulsspitzenleistung von 3,8 GW und Pulsdauern unter 500 fs [2]. Somit bilden diese Fasern das Rückgrat zukünftiger Faserlasersysteme mit höchsten Pulsenergien.

Die Forschungen wurden mit Mitteln des Europäischen Forschungsrats gefördert (FP7, ERC Grant Nr. 240460 »PECS«).

#### Literatur/References

- [1] Stutzki, F.; Jansen, F.; Eidam, T.; Steinmetz, A.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation, *Opt. Lett.* 36, 689–691 (2011).
- [2] Eidam, T.; Rothhardt, J.; Stutzki, F.; Jansen, F.; Hädrich, S.; Carstens, H.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power, *Opt. Express* 19, 255–260 (2011).

Values between 30 µm and 75 µm have been realized. These fibers raised the bar for highest average output power at largest mode field areas under single-mode operation. Up to 300 W of average output power were demonstrated at mode field diameters of more than 50 µm while maintaining nearly diffraction limited beam quality of  $M^2 < 1.4$  [1]. Finally, even a mode field diameter of 100 µm in the single-mode regime could be successfully exceeded and enabled pulse energies of 2.2 mJ at pulse peak powers of 3.8 GW and pulse durations below 500 fs [2]. Hence, large-pitch fibers will serve as the backbone of future fiber laser systems with maximum pulse energies.

The research leading to these results has received funding from the European Research Council under the European Union's Seventh Framework Programme (FP7, ERC Grant agreement no. 240460 "PECS").

## AUTHORS

*Florian Jansen*<sup>1</sup>

*Fabian Stutzki*<sup>1</sup>

*Cesar Jauregui*<sup>1</sup>

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

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

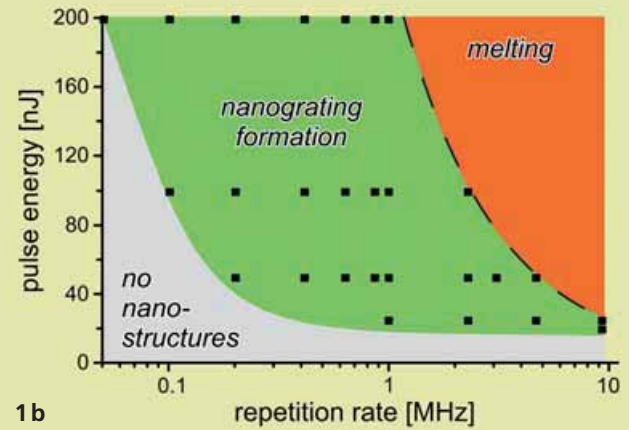
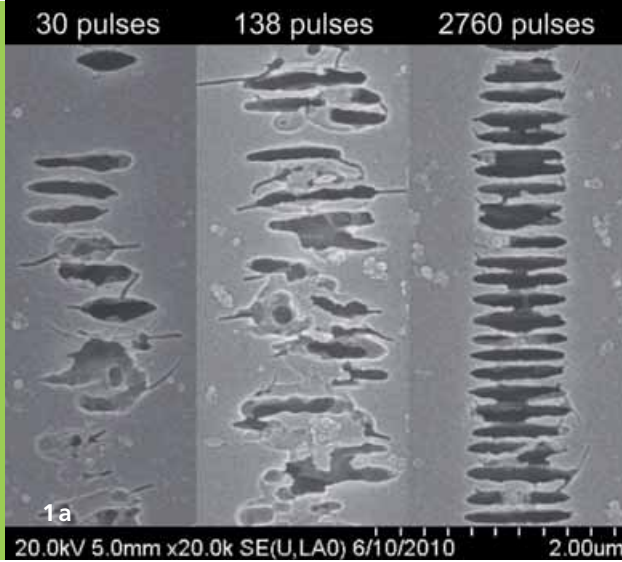
<sup>2</sup> *Fraunhofer IOF*

## CONTACT

*Prof. Dr. Jens Limpert*

*Phone +49 3641 947-811*

*jens.limpert@iof.fraunhofer.de*



## KOMPLEXE PHASENELEMENTE AUF BASIS FS LASERINDUZIERTER NANOGRITTER

### ADVANCED PHASE ELEMENTS BASED ON FS LASER INDUCED NANOGRATINGS

Die interne Strukturierung von transparenten Materialien mit Femtosekunden-Laserpulsen steht seit einigen Jahren im Fokus intensiver Forschung. Kieselglas hat sich für diese Art der Mikromaterialbearbeitung als besonders vielseitige Plattform erwiesen. Für bestimmte Prozessparameter bilden sich unter Einwirkung mehrerer Laserpulse selbstorganisierte periodische Strukturen [1].

Die Dimensionen dieser sogenannten Nanogitter können dabei durch die Laserparameter gezielt beeinflusst werden, was eine präzise Kontrolle von Stärke und Orientierung ihrer doppelbrechenden Eigenschaften erlaubt [2]. Dank der Freiheitsgrade der Einschreibtechnik können Nanogitter somit beispielsweise zur Realisierung komplexer dreidimensionaler Phaselemente zur Polarisationssteuerung genutzt werden.

The internal structuring of transparent materials with femtosecond laser pulses has been the subject of intense research in recent years. Fused silica has proven to be a particularly versatile platform for this type of micro-machining. In a certain range of fabrication parameters, self-organized periodic structures emerge upon exposure to multiple femtosecond laser pulses [1].

The structural properties of these so-called nanogratings can be tuned by the exposure parameters. This enables a precise control of both strength and orientation of the induced form birefringence [2]. In combination with the degrees of freedom provided by the inscription technique, nanogratings can be used to realize e.g. complex three-dimensional phase elements for polarization control.

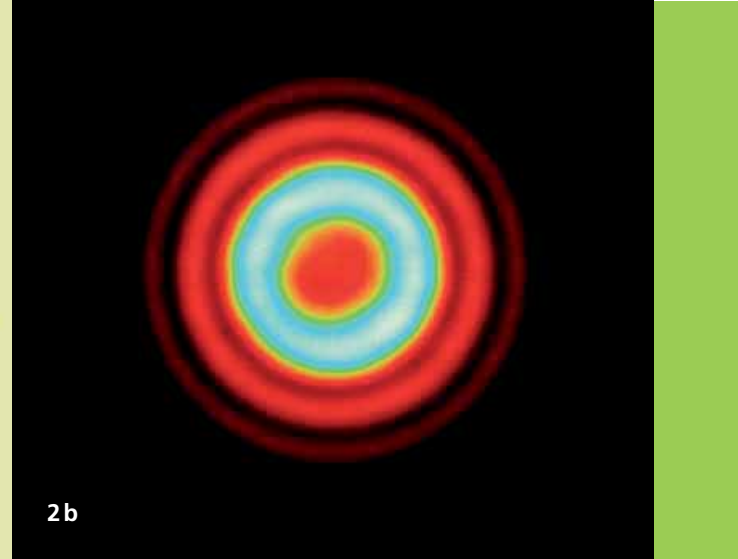
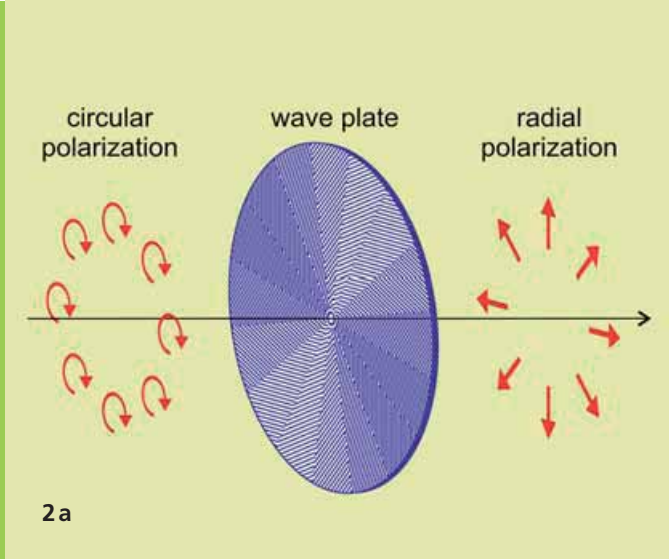
<sup>1</sup> (a) Femtosekunden-laserinduzierte Nanogitter in unterschiedlichen Stadien des Wachstums [3]. Die Gitterebenen sind stets senkrecht zur Polarisation des Einschreiblasers orientiert und rufen eine lokalisierte Formdoppelbrechung im ansonsten isotropen Wirtsmaterial hervor. (b) Parameterfenster zur Erzeugung von Nanogittern [3]. | (a) Growth stages of femtosecond laser-induced nanogratings [3]. The grating planes are oriented perpendicularly to the writing laser polarization and introduce localized form birefringence within the isotropic host material. (b) Parameter window for nanograting inscription [3]. Optimized process parameters allow inscription at high repetition rates yielding high processing speeds.

Optimierte Prozessparameter erlauben das schnelle Einschreiben von Nanogittern bei hohen Repetitionsraten. Unsere Untersuchungen des Wachstumsprozesses zeigen, dass zufällig verteilte Inhomogenitäten auf Nanometer-Ebene als Keimzellen der Gitterbildung wirken.

Das Zusammenspiel von Feldüberhöhung und kurzlebigen Defekten [3] führt dazu, dass sich im Laufe mehrerer hundert Pulse gleichförmige Gitterdomänen herausbilden (Abb. 1a). Bisher gelang die Erzeugung von Nanogittern nur unter Verwendung von Ti:Saphir-Verstärkersystemen mit hoher Pulsenergie. Dabei begrenzte die niedrige Repetitionsrate solcher Laser (1–100 kHz) aufgrund der großen Anzahl benötigter Pulse die Schreibgeschwindigkeit. Durch die Verwendung eines Hochleistungs-Femtosekundenoszillators mit einer Repetitionsrate von 9,4 MHz [4] gelang es uns, diese erhebliche Einschränkung zu überwinden (Abb. 1b).

Our investigations of the formation process reveal that nanogratings grow from intrinsic nanometer-scale inhomogeneities which are randomly distributed in the host material.

The collaborative action mediated by the interplay of field enhancement and transient defects [3] results in uniform nanogratings after several hundred laser pulses (Fig. 1a). Until recently, nanogratings had only been demonstrated with high pulse energy Ti:sapphire CPA laser systems. Due to the substantial number of pulses per spot required, the low repetition rate of such lasers (typically 1–100 kHz) severely restricts the processing speed. We were able to overcome this limitation by utilizing a high power femtosecond oscillator with a repetition rate of 9.4 MHz [4] (Fig. 1b).



Zur Demonstration der Vielseitigkeit unserer Technik realisierten wir ein Phasenelement zur Erzeugung eines radial polarisierten Strahls.

Das eingeschriebene Nanogitter-Muster besitzt eine Retardation von  $\lambda/4$  mit ortsabhängiger Orientierung. Das zirkular polarisierte Eingangslicht wird somit in lineare Polarisation in radialer Richtung überführt (Abb. 2a). Im Gegensatz zu konventionellen Herstellungsmethoden für solche Phasenelemente erlaubt die Verwendung von Nanogittern eine graduelle Veränderung der Ausrichtung der Doppelbrechung ohne zusätzlichen Aufwand. In Abb. 2b ist das für radiale Polarisation charakteristische ringförmige Strahlprofil im Fernfeld dargestellt.

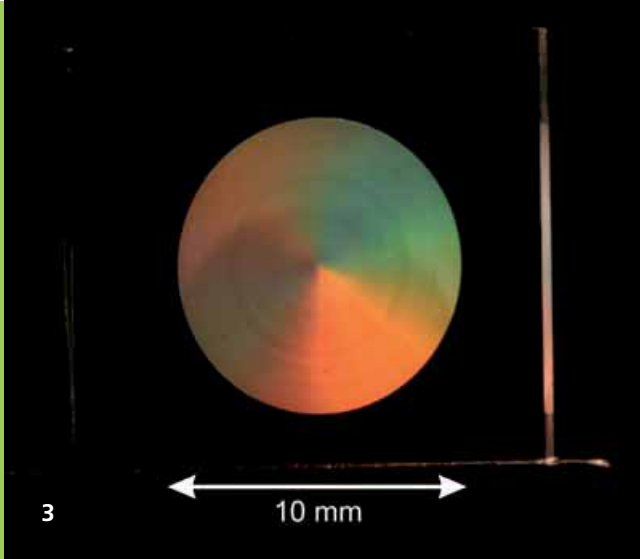
Die Verwendung von Femtosekunden-Oszillatoren mit hoher Repetitionsrate ermöglicht die Verwendung von Nanogittern als Bausteine für komplexe dreidimensionale Phasenelemente. Durch die Kombination aus großem Transparenzbereich und hoher Zerstörswelle des Wirtsmaterials Kieselglas sowie der thermischen Widerstandsfähigkeit der eingeschriebenen Strukturen erschließt sich eine Vielzahl von Anwendungen in der Strahlformung bis hin zur hochauflösenden Mikroskopie.

In order to demonstrate the versatility of our technique, we realized a wave plate which converts circularly polarized input light into a radially polarized beam.

The inscribed nanograting pattern features a retardation of  $\lambda/4$  with spatially varying orientation, thus locally converting the circularly polarized input beam into linearly polarized light with radial orientation (Fig. 2a). In contrast to other techniques, our approach naturally allows a continuously varying orientation of the birefringence without additional effort. Figure 2b shows the intensity profile of the output beam in the far field with its characteristic doughnut shape.

In conclusion, the use of high repetition rate lasers allows for nanogratings to be utilized as building block of intricate three-dimensional phase elements. The combination of the high damage threshold and broad transparency range of the host material fused silica as well as the thermal stability of the inscribed structures paves the way for a multitude of applications ranging from beam shaping to high resolution microscopy.

**2 Erzeugung eines radial polarisierten Strahls (a) Schematischer Aufbau: Die Radial-Wellenplatte prägt dem zirkular polarisierten Eingangsstrahl eine Retardation von  $\lambda/4$  auf, deren Orientierung ortsabhängig ist. (b) Die charakteristische Ring-Form des nun radial polarisierten Strahls kommt im Fernfeld durch destruktive Interferenz im zentralen Bereich zustande. | Generation of a radially polarized doughnut beam. (a) Schematic setup: The wave plate introduces a retardation of  $\lambda/4$  with spatially varying orientation, thus converting the circularly polarized input beam into radially polarized light. (b) Measured far-field beam profile. The characteristic doughnut shape emerges upon propagation as opposing polarizations interfere destructively in the central region.**



Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1327 »Optisch induzierte sub – 100 nm Strukturen für biomedizinische und technische Anwendungen«.

This work has been supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft in the framework of priority programme 1327 "Optically induced sub – 100 nm structures for biomedical and technological applications".

#### Literatur/References

- [1] Itoh, K.; Watanabe, W.; Nolte, S.; Schaffer, C.: Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials, MRS Bulletin 31, 620 (2006).
- [2] Ramirez, L.P.R.; Heinrich, M.; Richter, S.; Dreisow, F.; Keil, R.; Korovin, A.V.; Peschel, U.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Tuning the structural properties of femtosecond laser-induced nanogratings, Appl. Phys. A. 100, 001 (2010).
- [3] Richter, S.; Jia, F.; Heinrich, M.; Döring, S.; Peschel, U.; Tünnermann, A.; Nolte, S.: The role of self trapped excitons and defects in the formation of nanogratings in fused silica, (Opt. Lett., submitted).
- [4] Richter, S.; Heinrich, M.; Döring, S.; Tünnermann, A.; Nolte, S.: Formation of femtosecond laser-induced nanogratings at high repetition rates, Appl. Phys. A. 104, 503 (2011).

## AUTHORS

*Matthias Heinrich<sup>1</sup>*

*Sören Richter<sup>1</sup>*

*Stefan Nolte<sup>1</sup>*

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

## CONTACT

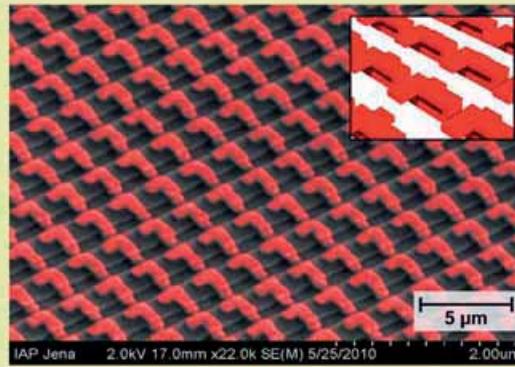
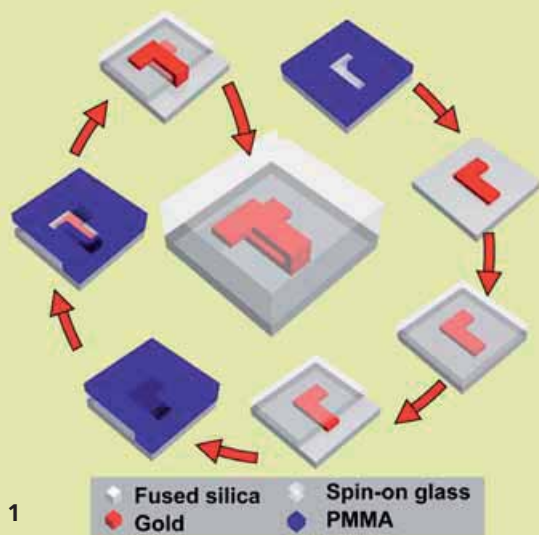
*Dr. Matthias Heinrich*

*Phone +49 3641 947-822*

*heinrich@iap.uni-jena.de*

**3** Nanogitter-basierte Radialwellenplatte in Kieselglas. | Nanograting-based radial wave plate inscribed in fused silica.





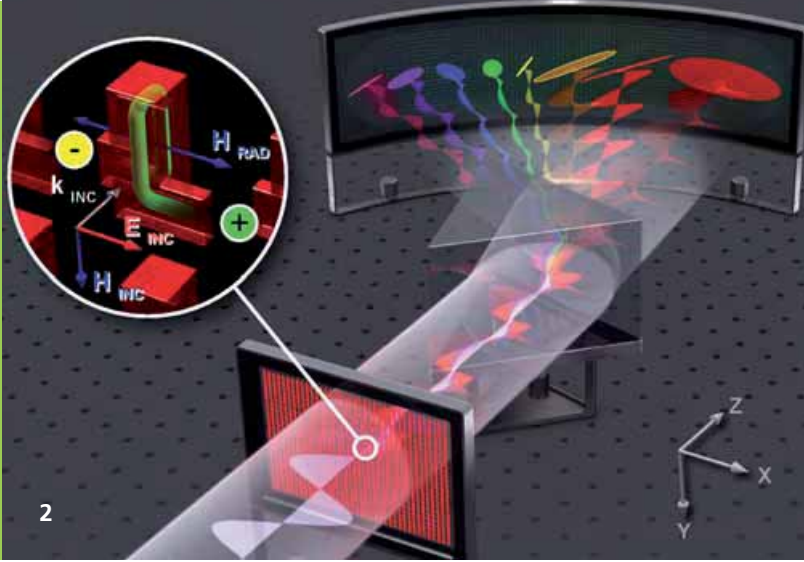
## 3-DIMENSIONALES CHIRALES METAMATERIAL MIT SEHR HOHER OPTISCHER AKTIVITÄT

## THREE-DIMENSIONAL CHIRAL METAMATERIAL WITH GIANT OPTICAL ACTIVITY

Künstliche Nanomaterialien können räumliche Strukturformen fernab vom thermodynamischen Gleichgewichtszustand aufweisen, was sie maßgeblich von natürlich vorkommenden Materialien unterscheidet. Dies wurde eindrucksvoll an optischen Metamaterialien gezeigt, welche aus nanoskaligen Strukturen bestehen. Durch den gezielten Bruch ihrer räumlichen Symmetrien treten völlig neue Effekte auf, wie beispielsweise eine richtungsabhängige Asymmetrie der optischen Transmission [1]. Ebenso können natürliche Effekte außergewöhnlich verstärkt werden. Ein Beispiel ist optische Aktivität, also die Beeinflussung des Polarisationszustand des Lichts. Wir untersuchten hierzu ein optisches Metamaterial (Abb. 1) bestehend aus drei-dimensionalen, chiralen Einheitszellen [2]. Daran wurden alle Komponenten der komplexen Jones-Matrix optisch gemessen, woraus ein kompletter experimenteller Datensatz bezüglich aller mit der Transmission korrelierten Eigenschaften des Metamaterials für sichtbares und nah-infrarotes Licht hervorgeht (Abb. 2).

Artificial nanomaterials may exhibit a topology far off the thermodynamic equilibrium, which is their primary difference to natural materials. This has been impressively demonstrated by optical metamaterials which consist of nanoscale structures. By deliberately breaking their spatial symmetries new effects occur, such as a directional asymmetry in the optical transmission [1]. Likewise, natural effects are extraordinarily enhanced, such as the manipulation of the polarization state of light, commonly referred to as optical activity. In this context we investigated an optical metamaterial (Fig. 1) composed of three-dimensional, chiral unit cells [2]. Exemplarily we measured all entries of its broadband complex Jones matrix, obtaining a complete data set that comprises all transmission properties of the metamaterial for visible and near-infrared light (Fig. 2). Amongst them, a peak polarization azimuth rotation of linearly polarized light exceeding  $50^\circ$  was found for a wavelength of  $1.08 \mu\text{m}$ . Normalizing this record-breaking value, based on entirely experimental means, to the light propagation path, it exceeds comparable

1 *Herstellungsprozess eines optisch aktiven, plasmonischen, chiralen Nanomaterials sowie eine entsprechende eingefärbte Rasterelektronenmikroskopaufnahme während der Herstellung. | Fabrication procedure of the optically active plasmonic chiral nanomaterial and a false-colored scanning electron microscope image at an intermediate fabrication step. Adapted with permission from [2]. Copyright 2011 American Chemical Society.*



Unter anderem konnte ein Spitzenwert bezüglich der Drehung eines linearen Polarisationszustands von über  $50^\circ$  bei einer Wellenlänge von  $1,08 \mu\text{m}$  nachgewiesen werden. Normiert auf den Lichtausbreitungsweg übertrifft dieser Rekordwert, der ausschließlich auf experimentellen Daten beruht, alle bisher bekannten passiven und reziproken optischen Medien um Größenordnungen.

Dieser Nachweis stellt einen substantiellen Fortschritt bezüglich des aktuellen Forschungsstandes optischer Metamaterialien dar. Die gezeigte Methodik ermöglicht die Charakterisierung des komplexen Fernfelds einer sehr allgemeinen Klasse dispersiver Medien und wird wichtige Auswirkungen für deren Design, Herstellung und experimentelle Untersuchung haben. Darüber hinaus können die erarbeiteten Konzepte direkt auf die Realisierung miniaturisierter optischer Systeme auf der Basis von optisch aktiven Medien angewandt werden.

#### Literatur/References

- [1] Menzel, C.; Helgert, C.; Rockstuhl, C.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.; Lederer, F.: Asymmetric transmission of linearly polarized light at optical metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* 104, 253902 (2010).
- [2] Helgert, C.; Pshenay-Severin, E.; Falkner, M.; Menzel, C.; Rockstuhl, C.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Lederer, F.; Pertsch, T.: Chiral metamaterial composed of three-dimensional plasmonic nanostructures, *Nano Lett.* 11, 4400–4404 (2011).

2 Das optisch aktive Nanomaterial wandelt linear polarisiertes einfallendes Licht in Abhängigkeit von der Wellenlänge in elliptisch polarisiertes Licht um. | The optically active nanomaterial converts a linearly polarized input spectrum into wavelength dependent elliptical polarization states. Reprinted with permission from [2]. Copyright 2011 American Chemical Society.

criteria of any known passive and reciprocal optical media by orders of magnitude. This proof constitutes a substantial advancement in the current state of optical metamaterials. Our applied methods open the way to the complex far field characterization of a very general class of dispersive media and will have important implications for their design, realization and experimental evaluation. Moreover the reported concepts and methods can be straightforwardly applied to the realization of miniaturized optical systems based on optically active media.

## AUTHORS

Christian Helgert<sup>1</sup>  
Ekaterina Pshenay-Severin<sup>1</sup>  
Matthias Falkner<sup>1</sup>  
Christoph Menzel<sup>2</sup>  
Carsten Rockstuhl<sup>2</sup>  
Falk Lederer<sup>2</sup>  
Ernst-Bernhard Kley<sup>1</sup>  
Andreas Tünnermann<sup>1,3</sup>  
Thomas Pertsch<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Institut für Festkörpertheorie u. -optik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>3</sup> Fraunhofer IOF

## CONTACT

Prof. Dr. Thomas Pertsch  
Phone +49 3641 947-840  
thomas.pertsch@uni-jena.de





# DAS FRAUNHOFER IOF IN NETZWERKEN

## THE FRAUNHOFER IOF IN NETWORKS

Als einer der erfolgreichsten Optikstandorte in Europa gehört die Region Jena zu den maßgeblichen Akteuren der deutschen Optikszenen. Mehr als 14.400 Beschäftigte erwirtschaften einen Umsatz von über 2,6 Mrd. Euro jährlich auf dem Gebiet der Optischen Technologien. Das Umsatzwachstum im Cluster betrug in den vergangenen Jahren durchschnittlich 6 %.

Die erfolgreiche interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wirtschaft und Wissenschaft in der modernen Optik wird seit langem weltweit als Beispiel für effektive regionale Kooperation und als Beweis für das Leistungsvermögen des Standorts Jena angesehen.

1999 haben sich die Akteure der Region im **OptoNet e.V.** zusammengeschlossen. Zu den Akteuren des Optik-Netzwerkes zählen auf den jeweiligen Märkten führende Unternehmen wie die Töchter der Carl Zeiss AG und der Schott AG sowie die Jenoptik AG. Hinzu kommen eine Vielzahl von wachstumsorientierten KMU sowie Hochschulen und Forschungseinrichtungen, u. a. die FSU Jena und das Fraunhofer IOF. Auf der Grundlage des kontinuierlich fortgeschriebenen Strategieprozesses erfolgte mit der Strategie CoOPTICS – Cooperate in Optics eine inhaltliche Neuausrichtung und Fokussierung des Clusters auf Wachstumsmärkte.

Mit der Gründung des Innovationsclusters JOIN – Jena Optical INnovations durch Fraunhofer und den Freistaat Thüringen im Jahr 2006 wurde eine Plattform für eine institutionsübergreifende vorwettbewerbliche Entwicklung von Basistechnologien und deren Überführung in die industrielle Fertigung geschaffen. 2010 erfolgte die strategische Ausrichtung des Innovationsclusters auf die Schaffung nachhaltiger Lösungen für die Zukunft mit Licht – »Green Photonics«.

As one of the most successful optics locations in Europe, the Jena region is one of the leading players on the German optics scene. More than 14,400 employees currently generate sales of over 2.6 billion euros every year in optical technologies. The cluster has experienced an average growth in sales of 6 % in recent years.

Across the world, the successful interdisciplinary cooperation between business and science in modern optics has for years been viewed as an example of effective regional cooperation and evidence of the Jena location's capabilities.

In 1999, the region's players merged as **OptoNet e.V.** Companies in their respective markets of the optics network include the subsidiaries of Carl Zeiss AG and Schott AG, as well as Jenoptik AG. To these must be added a multitude of growth-oriented SMEs as well as universities and research institutions, among these the FSU Jena and the Fraunhofer IOF. On the basis of a continuously updated strategy process, within the CoOPTICS – Cooperate in Optics strategy the substantive realignment and focus of the cluster toward growth markets took place.

The founding of the JOIN – Jena Optical INnovations cluster by Fraunhofer and the Free State of Thuringia in 2006 created a platform for pan-institutional precompetitive development of base technologies and their transfer to industrial production. Since 2010 the strategic alignment of the innovation cluster is concentrated to the generation of sustainable solutions using light – "Green Photonics".

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 mehr als 80 Forschungseinrichtungen, davon 60 Institute. Mehr als 20 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,8 Milliarden Euro. Davon fallen 1,5 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 erarbeiten können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Niederlassungen sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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 more than 80 research units in Germany, including 60 Fraunhofer Institutes. The majority of the more than 20,000 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of € 1.8 billion. Of this sum, more than € 1.5 billion 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 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.

Affiliated international research centers and representative offices provide contact with the regions of greatest importance to present and future scientific progress and economic development.

# DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

## THE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

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

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

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

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.





## 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 & Nichtlineare Optik
- Materialien der Optik & Photonik
- Mikromontage & Systemintegration
- Mikro- & Nanotechnologien
- Kohlenstofftechnologie
- Messverfahren & Charakterisierung
- Ultrapräzisionsbearbeitung
- Werkstofftechnologien
- Plasma- & Elektronenstrahlquellen

### Competence by networking

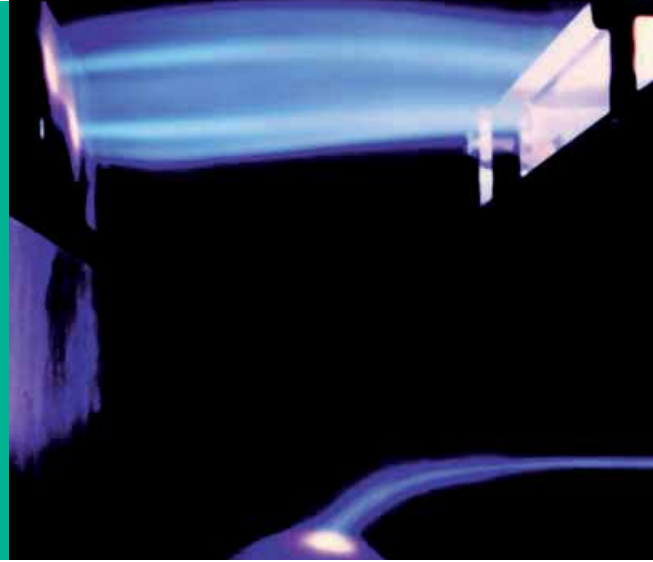
Six Fraunhofer institutes cooperate in the Fraunhofer Group Light & Surfaces. Co-ordinated competences allow quick and flexible alignment of research work on the requirements of different fields of application to answer actual and future challenges, especially in the fields of energy, environment, production, 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 and nonlinear optics
- Materials in optics and photonics
- Microassembly and system integration
- Micro and nano technology
- Carbon technology
- Measurement methods and characterization
- Ultra precision engineering
- Material technology
- Plasma and electron beam sources

### Kontakt/Contact

- Verbundvorsitzender/Group Chairman  
Prof. Dr. Andreas Tünnermann
- Verbundassistentin/Group Assistant  
Susan Oxfart  
Phone: +49 3641 807-207



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

Seit 1985 ist das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT ein gefragter FuE-Partner der Industrie für die Entwicklung innovativer Laserstrahlquellen, Laserverfahren und Lasersysteme. Die Technologiefelder umfassen Laser und Optik, Lasermesstechnik, Medizintechnik und Biophotonik sowie Lasermaterialbearbeitung. Hierzu zählen u. a. das Schneiden, Abtragen, Bohren, Schweißen und Löten sowie die Oberflächenbearbeitung, die Mikrofertigung und das Rapid Manufacturing. Übergreifend befasst sich das Fraunhofer ILT mit Laseranlagentechnik, Prozessüberwachung und -regelung, Modellierung sowie der gesamten Systemtechnik.

[www.ilt.fraunhofer.de](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, Schichtanwendung, Schichtcharakterisierung und Oberflächenanalyse. Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure arbeiten daran, Oberflächen der verschiedensten Grundmaterialien neue oder verbesserte Funktionen zu verleihen, um auf diesem Wege innovative, marktgerechte Produkte zu schaffen. Das Institut ist in folgenden Geschäftsfeldern tätig: Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrt, Werkzeuge, Energie, Glas und Fassade, Optik, Information und Kommunikation, Mensch und Umwelt.

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

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

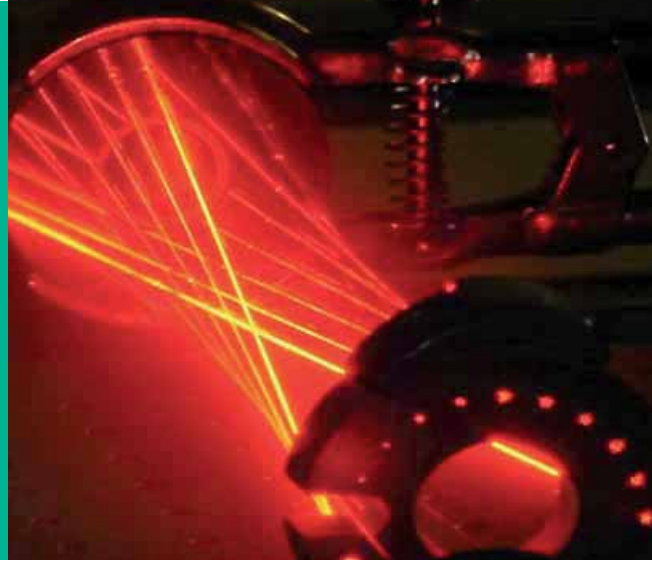
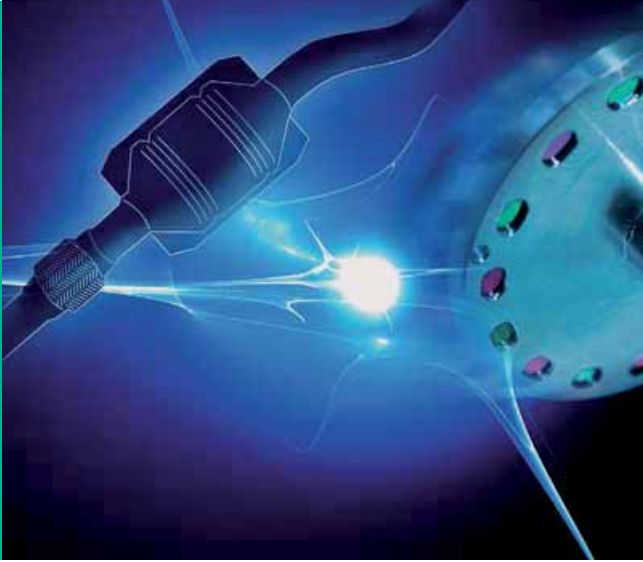
Since 1985 the Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT develops innovative laser beam sources, laser technologies, and laser systems for its partners from the industry. The technology areas cover the following topics: laser and optics, medical technology and biophotonics, laser measurement technology 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)



**Fraunhofer-Institut  
für Physikalische Messtechnik IPM**

Fraunhofer IPM entwickelt und realisiert optische Sensor- und Belichtungssysteme. Bei den vorwiegend laserbasierten Systemen sind Optik, Mechanik, Elektronik und Software ideal aufeinander abgestimmt. Die Lösungen sind besonders robust ausgelegt und jeweils individuell auf die Bedingungen am Einsatzort zugeschnitten. Auf dem Gebiet der Thermoelektrik verfügt das Institut über Know-how in Materialforschung, Simulation und Systemen. In der Dünnschichttechnik arbeitet Fraunhofer IPM an Materialien, Herstellungsprozessen und Systemen.

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

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

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

[www.iws.fraunhofer.de](http://www.iws.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, electronic and software components to create perfect solutions of robust design that are individually tailored to suit the conditions at the site of deployment. In the field of thermoelectrics, the institute has extensive know-how in materials research, simulation, and systems. Fraunhofer IPM also specializes in thin-film technologies for application in the production of materials, manufacturing processes and systems.

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

# NAMEN, DATEN, EREIGNISSE

## NAMES, DATES, ACTIVITIES

### Besondere Gäste | Special Guests

#### **Pedro Lovato Gomes Jardim**

University of Porto Alegre / Institute for Physics, Porto Alegre, Brasilien

#### **Niklas Borgquist, Mats Wernersson**

Sony Ericsson Mobile Communications AB, Lund, Sweden

#### **Erik Böttcher**

Nyfors Teknologi AB, Stockholm, Schweden

#### **Dr. Emiliano Descrivi**

Politecnico Torino, Turin, Italy

#### **H. Fujimoto, Y. Yamanaka**

RICOH COMPANY, LTD., Yokohama, Japan

#### **Dr. Manabu Kagami**

Toyota Central R & D LABS., Inc., Aichi, Japan

#### **Prof. Toshikuni Kaino, Prof. Sugihara**

Tohoku University, Sendai, Japan

#### **Philip Lalanne**

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, CNRS, Univ. Paris-Sud, Palaiseau cedex, France

#### **S. Longhi**

Dipartimento di Fisica, Politecnico di Milano, Italy

#### **Dr. Martin Maack**

NKT Photonics A/S, Birkerød, Denmark

#### **Prof. Francesco Michelotti**

University "La Sapienza", Rome, Italy

#### **Martin Muendel**

JDS Uniphase Corporation, Milpitas CA, USA

#### **Andrew Kulawiec**

QED Technologies, Rochester NY, USA

#### **Prof. Dr. Kathleen Richardson**

Clemson University, Clemson SC, USA

#### **Dominique Pierot**

Astrium SAS, Paris, France

#### **Dominique Thibault, Fabrice Camus**

Astrium SAS, Toulouse, Frankreich

#### **Kunio Yoshida**

AJI Co., Ltd, Kanagawa, Japan

### Internationale Kooperationen | International Co-operations

#### **Austria**

Universität Innsbruck, Institut für Experimentalphysik, Prof. Hans K. Pulker

#### **Brazil**

University of Porto Alegre, Institute for Physics, Prof. Flavio Horowitz

#### **Denmark**

Technical University of Denmark, Prof. Peter Bøggild

#### **France**

Université Jean Monnet, Saint-Etienne, Prof. Olivier Parriaux  
Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP), Yoan Micheau

#### **Indonesia**

Institute for Technology Bandung, Prof. Aleksander Iskander

#### **Ireland**

Trinity College Dublin, Prof. Werner Blau

#### **Israel**

Technion, Haifa, Prof. Abraham Marmor

#### **Italy**

University "La Sapienza", Rom, Prof. Francesco Michelotti

#### **Japan**

Tohoku University, Sendai, Prof. Toshikuno Kaino

#### **Norway**

SINTEF, Trondheim, Aage Jostein Thunem

#### **Russia**

Moscow State University, Prof. Alexander Tikhonravov



### Scotland

University of Edinburgh,  
Prof. Ian Underwood

### Switzerland

École Polytechnique Fédérale de  
Lausanne, Prof. Dario Floreano  
IMT University Neuchâtel,  
Prof. Hans-Peter Herzig

### Ukraine

National Technical University  
"Kharkov Polytechnic Institute",  
Prof. Valery V. Kondratenko

### USA

CREOL, Orlando (Florida), Prof. James Harvey  
University of Michigan, College of  
Engineering, Prof. Jerzy Kanicki  
The Ohio State University, Prof. Allen Yi

### Messebeteiligungen 2011 | Fairs Participations 2011

#### Photonics West

22.01.–27.01.2011, San Francisco, USA

#### EPIC Conference and Trade Show Green Photonics

04.04.–06.04.2011, Berlin, Germany

#### Control

03.05.–06.05.2011, Sinsheim, Germany

#### SID

22.05.–27.05.2011, Seattle, USA

### LASER World of PHOTONICS

23.05.–26.05.2011, München, Germany

### Mikrosystemtechnik-Kongress 2011

10.10.–12.10.2011, Darmstadt, Germany

### BIOTECHNICA

11.10.–13.10.2011, Hannover, Germany

### V2011

18.10.–20.10.2011, Dresden, Germany

### Vision

November 2011, Stuttgart, Germany

### Euromold

29.11.–02.12.2011, Frankfurt, Germany

### Aus- und Weiterbildung | Education and further training

#### Auszeichnung als Anerkannte Ausbilderin durch die IHK Ostthüringen

Antje Oelschläger

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 | Lectures

Dr. Ramona Eberhardt, Dr.-Ing. Erik Beckert

#### Optikmontage

Fachhochschule Jena

Nils Heidler

#### Design of Precision Devices

Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Norbert Kaiser

#### Beschichtungstechnik

#### Nanooptik

Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

#### Grundlagen der Laserphysik

#### Experimentelle Methoden der Atom- und Molekülphysik

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann,

Prof. Dr. Falk Lederer

#### Angewandte Photonik

Seminar für Doktoranden der FSU Jena



Dr. habil. Uwe Detlef Zeitner,

Prof. Dr. Frank Wyrowski

**Optical Modeling and Design I**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. habil. Uwe Detlef Zeitner

**Micro- and Nano-Technology**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

**Conferences – Workshops – Events**

**OTTI-Fachforum »Optische Technologien vom Design zum Produkt«**

2.–3. März 2011, Regensburg

**THIN FILM CENTER “Optical Coatings from Design through Manufacture”**

21.–25. März 2011, Fraunhofer IOF Jena

**54<sup>th</sup> SVC Annual Technical Conference “Optical Coatings”**

16.–21. April 2011, Chicago, USA

**OTTI-Fachforum »Schichten auf Glas«**

11.–12. Mai 2011, Regensburg

**SPIE International Symposium on Optical Systems Design “Advances in Optical Thin Films”**

5.–9. September 2011, Marseille, Frankreich

**1. Zukunftskonferenz Green Photonics – Nachhaltige Lösungen mit Licht**

18./19. Oktober 2011 in Jena

**V2011 – Workshop: »Beschichtungen für den optischen Gerätebau«**

19.–20. Oktober 2011,  
RAMADA Hotel Dresden

**VDI-Wissensforum: »Kunststoffe in optischen Systemen«**

8.–9. November 2011, Baden-Baden

**OTTI-Fachforum »Schichtherstellungstechniken für die Präzisionsoptik«**

9.–10. November 2011, Regensburg

**Diplomarbeiten | Diploma Theses**

Henning Carstens

**Hohlkernfaserkompression bei hohen Durchschnittsleistungen**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/11

Stefan Heist

**Untersuchungen zur 3D-Vermessung von Objekten mittels Streifenprojektionsverfahren durch Ausnutzung ihrer Transmissions- und Reflexionseigenschaften im UV-Bereich**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/11

Carsten Klein

**Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung eines fasergekoppelten portablen THz-Antennenarrays**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/11

René Siegmund

**Realisierung und Charakterisierung eines fasergekoppelten 2D-Terahertz-Zeitbereich-Spektrometers**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/11

Alexander Weigel

**Untersuchungen zur Profil- und Schichtdickenanalyse mit gepulster Terahertz-Strahlung**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/11

Felix Zimmermann

**Ultrakurzpuls-induzierte Volumenmodifikation transparenter Materialien zum lokalen Laserbonden**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/11

**Bachelorarbeiten | Bachelor Theses**

Matthias Böhme

**Charakterisierung von absorptionsarmen Dünnschichtsystemen durch Kombination von in-situ und ex-situ Spektroskopie**

Fachhochschule Jena, 01/11

Diana Burkhardt

**Entwicklung und Charakterisierung einer Montagevorrichtung für Laserresonatorspiegel**

Fachhochschule Jena, 08/11

Maik Dieckmann

**Untersuchung geeigneter Prüfbedingungen zur Bewertung von Oberflächen mit Antibeschlageigenschaften im Anwendungsbereich Automobil**

Fachhochschule Jena, 07/11

Cindy Goppold

**Untersuchung leitfähiger Schichten für die hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie**

Fachhochschule Jena, 09/11

Alexander Grimm

**Stabilisierung eines Diodenlasers mittels Pound-Drever-Hall-Technik**

Fachhochschule Jena, 09/11

Erik Hebestreit

**Development of a Cryogenic Scattering type scanning near-field optical microscope**

Fachhochschule Jena, 10/11

Tobias Holub

**Methodische Erarbeitung und konstruktive Umsetzung eines Experimentalstandes für vakuumtaugliche gasgeschmierte Führungselemente**

Fachhochschule Jena, 07/11

Franziska Jenkner

**Präparation von TiO<sub>2</sub>-, ZrO<sub>2</sub>- und HfO<sub>2</sub>-Schichten mittels Elektronenstrahlverdampfen**

Fachhochschule Jena, 10/11

Matthias Kraus

**Mikrooptisches Head-Mounted Display mit segmentiertem Gesichtsfeld**

Fachhochschule Jena, 09/11

Torsten Leichsenring

**Analyse und Erweiterung der Sensitivität und des Ortsfrequenzbereichs eines streulichbasierten Rauheitssensors**

Fachhochschule Jena, 08/11

Daniel Müller

**Konzipierung und Test eines Messaufbaus für die Bestimmung des Transmissionsvermögens von Sammellinsen im visuellen und ultravioletten Spektralbereich**

Fachhochschule Jena, 07/11

Matthias Pittner

**Charakterisierung eines High-Speed-Streifenprojektionssensors bzgl. der zeitlichen Stabilität und lokalen Verteilung seiner Messgenauigkeit**

Fachhochschule Jena, 08/11

Sebastian Sailer

**Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik eines deformierbaren Spiegels auf der Basis von PZT-Schichten**

Hochschule Esslingen 01/11

Maximilian Strecker

**Erzeugung von Kurzpulsen anhand des Konzeptes der PM-AM Konversion**

Fachhochschule Jena, 04/11

Julia Thiele

**Entwicklung und Charakterisierung eines Montageprozesses für Umlenkspiegel in einem Lasersystem**

Fachhochschule Jena, 08/11

André Turetschek

**Charakterisierung schmalbandiger Laserquellen mittels selbstheterodyner Detektion**

Westfälische Hochschule Zwickau, 04/11

Werner Uhlemann

**Einrichten und charakterisieren eines Messstands zur Oberflächenabstastung thermisch angeregter Proben**

Fachhochschule Jena, 11/11

Anika Wilms

**Aufbau und Charakterisierung eines Positionssensors basierend auf einem integrierten LED-Photodioden Sensormodul**

Fachhochschule Jena, 11/11

**Masterarbeiten | Master Theses**

Michael Appelfelder

**Mounting and characterization of a Unimorph deformable mirror**

Fachhochschule Jena, 02/11

Tobias Fiedler

**Herstellung und Eigenschaften von Melamin-Nanostrukturen**

Fachhochschule Jena, 01/11

Bing Han

**Investigation of a novel q-switched high power CO<sub>2</sub> laser**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/11

Fei Jia

**Investigation of Nanogratings Formation in Fused Silica**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/11

Ali Kiani

**Modelling the Resolidification of Liquid Solders**

Fachhochschule Jena, 09/11

Silvio Krause

**Charakterisierung von Alvarez-Humphrey-Linsen unter Verwendung eines Versuchsaufbaus für eine Optik variabler Brechkraft**

Fachhochschule Jena, 12/11

Theresa Kunz

**Mikrooptischer Array-Projektor für Head-Mounted Displays**

Fachhochschule Jena, 08/11

Markus Mundus

**Transversal mode analysis of ultrashort pulse written fiber Bragg gratings**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/11

Franziska Perske

**Konzeptionierung eines Positions- und Neigungssensors basierend auf einem bidirektionalen OLED-Mikrodisplay**

Fachhochschule Jena, 07/11

Anshuman Sing

**Inscription of chirped fiber Bragg gratings applying wavefront shaped ultrashort pulses**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/11

**Dissertationen | Dissertations**

Andreas Brückner

**Microoptical Multi-Aperture Imaging Systems**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/11

Frank Brückner

**Advanced mirror concept for high-precision metrology**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/11

Michael Flämmich

**Optical Characterization of OLED Emitter Properties by Radiation Pattern Analyses**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/11

Christoph Munkelt

**Aktive daten- und modellbasierte Sensorpositionierung zur 3-D Vermessung**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 10/11

Dirk Nodop

**Langperiodische Gitter zur Kontrolle nichtlinearer Effekte in Glasfasern**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/11

Christian Wirth

**Skalierung von Leistung und Brillanz schmalbandiger cw-Hochleistungsfaser-Verstärker**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/11

Benjamin Witschas

**Experiments on spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering in air**

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 10/11

Schutzrechte |  
Intellectual Property

Patentanmeldungen 2011 |  
Patent Applications 2011

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

**Mikropumpe**

DE 10 2011 107 046.3

Chen, Li; Schreiber, P.; Schierz, C. (TU Ilmenau); Walkling, A. (TU Ilmenau); Schwede, M. (Jenoptik Polymer System); Göhring, J. (Dilitronics)

**Reflection optics of a LED street lamp**

DE 10 2011 081 349.7

Danz, N.; Flämmich, M.; Frischeisen, J. (Uni Augsburg); Brütting, W. (Uni Augsburg); Krummacher, B. (Osram OS); Dobbertin, T. (Osram OS); Heuser, K. (Osram OS); Setz, D.-S. (Osram OS)

**Organische optoelektronische Bauelemente mit hoher Effizienz durch verbesserte Auskopplung mittels orientierten Farbmolekülen in Guest-Host-Systemen**

DE 10 2010 054 893.6

Gäbler, D.; Schulz, U.; Kaiser, N.; Ohl, A. (INP); Steffen, H. (INP)

**Plasmaionenquelle für eine Vakuumbeschichtungsanlage**

DE 10 2011 103 464.5

Großmann, C.; Notni, G.; Riehemann, S.

**Invers konfokaler Sensor zur Lage- und Abstandsmessung**

DE 10 2011 013 195.7

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

**Verfahren zur Erzeugung einer Leichtgewichtsstruktur aus Glas und damit erzielte Verbundstrukturen**

DE 10 2011 012 834.4

Kalkowski, G.; Rothhardt, C. (IAP); Eberhardt, R.; Rhode, M.

**Direktes Bonden massiver Substrate/ auch mit Beschichtung**

DE 10 2011 012 835.2

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

**Verfahren zur Erzeugung von azimutal und radial polarisierter Strahlung in optischen Wellenleiter**

PCT/EP2011/001881

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

**Large-mode-area-double-clad- multimode optical fibers with reduced overlap of higher-order modes**

EP 10 192 190.6

Oberdörster, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Neubauer, H. (IIS); Schweiger, T. (IIS)

**Bildsensor, Abbildungsvorrichtung und -verfahren für einen Bildsensor**

DE 10 2011 081 405.1

Oberdörster, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Neubauer, H. (IIS); Schweiger, T. (IIS)

**Abbildungsvorrichtung und Verfahren für eine Abbildungsvorrichtung**

DE 10 2011 081 408.6

Scheidung, S.; Damm, C.; Gebhardt, A.; Risse, S.; Scheiding, M. (AstroFeinwerk Berlin)

**Method for manufacturing a mirror comprising at least one cavity and optical mirror**

PCT/EP2011/003929

Schulz, U.; Munzert, P.; Thielsch, R. (Southwall Europe GmbH); Kleinhempel, R. (Southwall Europe GmbH); Schönberger, W. (FEP); Fohland, M. (FEP)

**Verfahren zur Herstellung entspiegelter Strukturen**

DE 10 2011 013 822.6

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

**Optisches Element mit einer Antireflexionsbeschichtung**

DE 10 2011 107 192.3

Sieler, M.; Schreiber, P.

**Projektionsdisplay und Verfahren zum Anzeigen eines Gesamtbildes für Projektionsfreiformflächen oder verkippte Projektionsflächen**

DE 10 2011 076 083.0

Steiner, S. (IAP); Kley, E.-B.

**Optischer Filter mit einem resonanten Wellenleitergitter**

DE 10 2011 084 055.9

von Finck, A.; Trost, M. (IAP);

Notni, G.; Duparré, A.

**Vorrichtung und Verfahren zur Streulichtmessung mit mehreren parallelen Messkanälen**

DE 10 2011 113 134.9

Voigtländer, C. (IAP); Nolte, S.; Thomas, J. U. (IAP); Tünnermann, A.; Williams, R. (Macquarie University Sydney)

**Herstellung eines Modenfilters in multimodigen Fasern**

DE 10 2011 114 586.2

Wächter, C.; Danz, N.; Michaelis, D.; Flämmich, M.

**Reflektive Strahlformer zur Einstellung beliebig gerichteter Abstrahlprofile von Flächenlichtquellen**

PCT/EP2011/066467

Weber, T. (IAP); Kley, E.-B.

**Metallstreifenpolarisator und Verfahren zur Herstellung desselben**

DE 10 2011 006 996.8

Weber, T. (IAP); Kley, E.-B.

**Polarisator und Verfahren zur Herstellung eines Polarisators**

DE 10 2011 079 030.6

Zwick, S.; Notni, G.; Kühmstedt, P.

**Vorrichtung und Verfahren zur Vermessung eines Gegenstandes**

DE 10 2011 014 779.9

Bruchmann, C. (IAP); Beckert, E.;

Peschel, T.; Damm, C.

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

DE 10 2008 014 619 B4

Brückner, A.; Duparré, J.; Wippermann, F.; Zufferey, J. C. (EPFL); Floreano, D. (EPFL);

Franceschini, N. (Univmed); Viollet, S.

(Univmed); Ruffier, F. (Univmed)

**Verfahren zur Herstellung eines künstlichen Facettenauges**

EP 2 306 230 B1

Duparré, J.; Brückner, A.;

Dannberg, P.; Bräuer, A.

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

US 7,897,903 B2

EP 1 979 769 B1

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

Schmid, W. (Osram OS)

**Kantenemittierender Halbleiterlaser**

DE 10 2008 058 435 B4

Füchsel, K.; Schulz, U.; Kaiser, N.; Stolz, C. (Rodenstock); Götz, B. (Rodenstock);

Scherg, G.-P. (Rodenstock)

**Kratzfeste, entspiegelte Oberfläche mit Antifog**

EP 1 987 378 B1

Kaiser, N.; Benoit, N.; Feigl, T.; Yulin, S.

**Thermisch stabiler Multilayer-Spiegel für den EUV- Spektralbereich**

RU 2410732

US 7,920,323 B2

Kalkowski, G.; Risse, S.

**Elektrostatiches Halteelement**

EP 1 378 936 B1

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Schreiber, T.;

Ortac, B. (IAP); Nielsen, C. (IAP)

**Faserlaser**

EP 1 929 594 B4

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Stein-

metz, A. (IAP); Nodop, D. (IAP)

**Gütegeschalteter Laser**

DE 10 2009 042 003 B4

Munkelt, C. (IAP); Schmidt, I.;

Kühmstedt, P.; Notni, G.

**Vorrichtung und Verfahren zum berührungslosen Erfassen räumlicher Koordinaten einer Oberfläche**

EP 2 156 139 B1

Wippermann, F.; Beckert, E.; Schreiber, P.

**Endoskop mit schräger Blickrichtung**

DE 10 2009 049 990 B3

Wippermann, F.; Schreiber, P.; Bräuer, A.

**Vorrichtung zur Homogenisierung von Strahlungen mit nicht regelmäßigen Mikrolinsenarrays**

EP 2 087 394 B1

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

Wendling, I. (IAP)

**Optisches Element mit einer Antibeslagschicht und Verfahren zu dessen Herstellung**

US 7,914,518 B2

Wächter, C.; Dannberg, P.; Uchida, Y.

(Panasonic Electric Works); Miyagana, N.

(Panasonic Electric Works)

**Optical Switch**

EP 1 787 163 B1

Zeitner, U. D.; Güther, R.

(Forschungsverbund Berlin)

**Laserresonatoren mit modenselektierenden Phasenstrukturen**

JP 4 785 327 B2

Füchsel, K.; Kley, E.-B., Käsebier, T.

(IAP); Kroll, M. (IAP); Pertsch, T. (IAP)

**Strukturierte Siliziumschicht für ein optoelektronisches Bauelement**

DE 20 2011 003 479 U1

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Stein-

metz, A. (IAP); Nodop, D. (IAP)

**Lasersystem mit nichtlinearer Kompression**

DE 20 2011 017 367 U1

Weber, T. (IAP); Kley, E.-B.

**Metallstreifenpolarisator**

DE 20 2011 102 876 U1

Weber, T. (IAP); Kley, E.-B.

**Metallstreifenpolarisator**

DE 20 2011 102 885 U1

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

Dörfer, R.; Leitel, R.

**Polarisierendes Element**

DE 20 2010 017 572 U1

**facet VISION**

DE 30 2011 040 938

**GreenPhotonics**

DE 30 2011 046 228

Wissenschaftliche Publikationen |  
Scientific Publications

Zeitschriften | Journals

Albero, J.; Bargiel, S.; Passilly, N.; Dannberg, P.; Stumpf, M.; Zeitner, U. D.; Rousselot, C.; Gastinger, K.; Gorecki, C.

**Micromachined array-type Mirau interferometer for parallel inspection of MEMS**  
Journal of Micromechanics and Microengineering 21 (2011) 6 065005, ISSN 0960-1317

Barr, B. W.; Edgar, M. P.; Nelson, J.; Plissi, M. V.; Huttner, S. H.; Sorazu, B.; Strain, K. A.; Burmeister, O.; Britzger, M.; Friedrich, D.; Schnabel, R.; Danzmann, K.; Hallam, J.; Freise, A.; Clausnitzer, T.; Brückner, F.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.

**Translational, rotational, and vibrational coupling into phase in diffractively coupled optical cavities**  
Optics Letters 36 (2011) 14 p. 2746–2748, ISSN 0146-9592

Baumgartl, M.; Jansen, F.; Stutzki, F.; Jauregui, C.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High average and peak power femto-second large-pitch photonic-crystal-fiber laser**  
Optics Letters 36 (2011) 2 p. 244–246, ISSN 0146-9592

Baumgartl, M.; Ortaç, B.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Ultrashort pulse formation and evolution in mode-locked fiber lasers**  
Applied Physics B: Lasers and Optics 104 (2011) 3 p. 523–536, ISSN 0946-2171

Bischoff, M.; Stenzel, O.; Friedrich, K.; Wilbrandt, S.; Gäbler, D.; Mewes, S.; Kaiser, N.  
**Plasma-assisted deposition of metal fluoride coatings and modeling the extinction coefficient of as-deposited single layers**  
Applied Optics 50 (2011) 9 p. C232–C238, ISSN 0003-6935

Blázquez-Sánchez, D.; Weichelt, B.; Austerschulte, A.; Voss, A.; Graf, T.; Killi, A.; Eckstein, H.-C.; Stumpf, M.; Matthes, A. L.; Zeitner, U. D.

**Improving the brightness of a multi-kilowatt single thin-disk laser by an aspherical phase front correction**  
Optics Letters 36 (2011) 6 p. 799–801, ISSN 0146-9592

Brahm, A.; Wichmann, F.; Gerth, C.; Tymoshchuk, M.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.

**Terahertz Computed Tomography Helps ID Chemical Substances**  
PHOTONICS Spectra 12/ 2011, 40–43 (2011)

Braig, C.; Käsebier, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.

**Stand-alone diamond binary phase transmission gratings for the EUV band**  
Optics Express 19 (2011) 15 p. 14008–14017, ISSN 1094-4087

Brand, U.; Beckert, E.; Beutler, A.; Dai, G.; Stelzer, C.; Hertwig, A.; Klapetek, P.; Koglin, J.; Thelen, R.; Tutsch, R.

**Comparison of optical and tactile layer thickness measurements of polymers and metals on silicon or SiO<sub>2</sub>**  
Measurement Science and Technology 22 (2011) 9 094021, ISSN 0957-0233

Britzger, M.; Friedrich, D.; Kroker, S.; Brückner, F.; Burmeister, O.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Danzmann, K.; Schnabel, R.

**Diffractively coupled Fabry-Perot resonator with power-recycling**  
Optics Express 19 (2011) 16 p. 14964–14975, ISSN 1094-4087

Britzger, M.; Friedrich, D.; Kroker, S.; Brückner, F.; Burmeister, O.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Danzmann, K.; Schnabel, R.

**Pound-Drever-Hall error signals for the length control of three-port grating coupled cavities**  
Applied Optics 50 (2011) 22 p. 4340–4346, ISSN 0003-6935

Bromage, J.; Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Dorrer, C.; Jocher, C.; Demmler, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Zuegel, J.D.

**Analysis and suppression of parasitic processes in noncollinear optical parametric amplifiers**  
Optics Express 19 (2011) 18 p. 16797–16808, ISSN 1094-4087

Brückner, F.; Kroker, S.; Friedrich, D.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.

**Widely tunable monolithic narrowband grating filter for near-infrared radiation**  
Optics Letters 36 (2011) 4 p. 436–438, ISSN 0146-9592

Brückner, A.; Leitel, R.; Oberdörster, A.; Dannberg, P.; Wippermann, F.; Bräuer, A.  
**Multi-aperture optics for wafer-level cameras**  
Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS 10 (2011) 4 043010, ISSN 1932-5150

Chipouline, A.; Petschulat, J.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.; Menzel, C.; Rockstuhl, C.; Lederer, F.

**Multipole approach in electrostatics of metamaterials**  
Applied Physics A: Materials Science & Processing 103 (2011) 3 p. 899–904, ISSN 0947-8396

Coriand, L.; Mitterhuber, M.; Duparré, A.; Tünnermann, A.

**Definition of roughness structures for superhydrophobic and hydrophilic optical coatings on glass**  
Applied Optics 50 (2011) 9 p. 257–263, ISSN 0003-6935

Danz, N.; Kick, A.; Sonntag, F.; Schmieder, S.; Höfer, B.; Klotzbach, U.; Mertig, B. C.

**Surface plasmon resonance platform technology for multi-parameter analyses on polymer chips**  
Engineering in Life Sciences 11 (2011) 6 p. 566–572, ISSN 1618-2863

Demmler, S.; Rothhardt, J.; Heidt, A.M.; Hartung, A.; Rohwer, E.G.; Bartelt, H.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Generation of high quality, 1.3 cycle pulses by active phase control of an octave spanning supercontinuum**

Optics Express 19 (2011) 21 p. 20151–20158, ISSN 1094-4087

Döring, S.; Richter, S.; Tünnermann, A.; Nolte, S.

**Evolution of hole depth and shape in ultrashort pulse deep drilling in silicon**

Applied Physics A: Materials Science & Processing 105 (2011) 1 p. 69–74, ISSN 0947-8396

Dreisow, F.; Wang, G.; Heinrich, M.; Keil, R.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Szameit, A.

**Observation of anharmonic Bloch oscillations**

Optics Letters 36 (2011) 20 p. 3963–3965, ISSN 0146-9592

Duparré, A.; Ristau, D.

**Optical Interference Coatings 2010 Measurement Problem**

Applied Optics 50 (2011) 9 p. C172–C177, ISSN 0003-6935

Eidam, T.; Hädrich, S.; Jansen, F.; Stutzki, F.; Rothhardt, J.; Carstens, H.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Preferential gain photonic-crystal fiber for mode stabilization at high average powers**

Optics Express 19 (2011) 9 p. 8656–8661, ISSN 1094-4087

Eidam, T.; Rothhardt, J.; Stutzki, F.; Jansen, F.; Hädrich, S.; Carstens, H.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power**

Optics Express 19 (2011) 1 p. 255–260, ISSN 1094-4087

Eidam, T.; Wirth, C.; Jauregui, C.; Stutzki, F.; Jansen, F.; Otto, H.-J.; Schmidt, O.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers**

Optics Express 19 (2011) 14 p. 13218–13224, ISSN 1094-4087

Eilenberger, F.; Minardi, S.; Szameit, A.; Röpke, U.; Kobelke, J.; Schuster, K.; Bartelt, H.; Nolte, S.; Torner, L.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.

**Evolution dynamics of discrete-continuous light bullets**

Physical Review A 84 (2011) 1 013836, ISSN 1094-1622

Faradzhev, N. S.; Yakshinskiy, B. V.; Starodub, E.; Madey, T. E.; Hill, S.B.; Grantham, S.; Lucatorto, T. B.; Yulin, S.; Vescovo, E.; Keister, J. W.

**Resonance effects in photoemission from TiO<sub>2</sub>-capped Mo/Si multilayer mirrors for extreme ultraviolet applications**

Journal of Applied Physics 109 (2011) 8 083112, ISSN 0021-8979

Finck, A. v.; Hauptvogel, M.; Duparré, A.

**Instrument for close-to-process light scatter measurements of thin film coatings and substrates**

Applied Optics 50 (2011) 9 C321-C328, ISSN 0003-6935

Flämmich, M.; Danz, N.; Michaelis, D.

**Accessing OLED emitter properties by radiation pattern analyses**

Optics Express 12 (2011) 1 p. 83–91, ISSN 1094-4087

Flämmich, M.; Frischeisen, J.; Setz, D. S.; Michaelis, D.; Krummacher, B.C.; Schmidt, T. D.; Brütting, W.; Danz, N.

**Oriented phosphorescent emitters boost OLED efficiency**

Organic Electronics 12 (2011) 10 p. 1663–1668, ISSN 1566-1199

Freese, W.; Kämpfe, T.; Rockstroh, W.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.

**Optimized electron beam writing strategy for fabricating computer-generated holograms based on an effective medium approach**

Optics Express 19 (2011) 9 p. 8684–8692, ISSN 1094-4087

Friedrich, D.; Barr, B.W.; Brückner, F.; Hild, S.; Nelson, J.; Macarthur, J.; Plissi, M.V.; Edgar, M. P.; Huttner, S.H.; Sorazu, B.; Kroker, S.; Britzger, M.; Kley, E.-B.; Danzmann, K.; Tünnermann, A.; Strain, K.A.; Schnabel, R.

**Waveguide grating mirror in a fully suspended 10 meter Fabry-Perot cavity**

Optics Express 19 (2011) 16 p. 14955–14963, ISSN 1094-4087

Gödeker, C.

**AR coating for sapphire has high scratch resistance**

Applied Optics 50 (2011) 9 C255, ISSN 0003-6935

Gödeker, C.; Schulz, U.; Kaiser, N.

**Improved scratch resistance for antireflective coatings on sapphire**

Applied Optics 50 (2011) 9 p. 253–256, ISSN 0003-6935

Hädrich, S.; Carstens, H.; Rothhardt, J.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Multi-gigawatt ultrashort pulses at high repetition rate and average power from two-stage nonlinear compression**

Optics Express 19 (2011) 8 p. 7546–7552, ISSN 1094-4087

Hädrich, S.; Demmler, S.; Rothhardt, J.; Jocher, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High-repetition-rate sub-5-fs pulses with 12 GW peak power from fiber-amplifier-pumped optical parametric chirped-pulse amplification**

Optics Letters 36 (2011) 3 p. 313–315, ISSN 0146-9592



Hädlich, S.; Krebs, M.; Rothhardt, J.; Carstens, H.; Demmler, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Generation of  $\mu\text{W}$  level plateau harmonics at high repetition rate**

Optics Express 19 (2011) 20 p. 19374–19383, ISSN 1094-4087

Heidler, N.; Schenk, C.; Harnisch, G.; Risse, S.; Schubert, G.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Contact-free exhaust system for vacuum compatible gas bearing guides**

Precision Engineering 36 (2012) 1 p. 37–43, ISSN 0141-6359

Heidt, A. M.; Rothhardt, J.; Hartung, A.; Bartelt, H.; Rohwer, E.G.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High quality sub-two cycle pulses from compression of supercontinuum generated in all-normal dispersion photonic crystal fiber**

Optics Express 19 (2011) 15 p. 13873–13879, ISSN 1094-4087

Heinrich, M.; Keil, R.; Dreisow, F.; Tünnermann, A.; Szameit, A.; Nolte, S.

**Nonlinear discrete optics in femtosecond laser-written photonic lattices**

Applied Physics B: Lasers and Optics 104 (2011) 3 p. 469–480, ISSN 0946-2171

Heinrich, M.; Szameit, A.; Dreisow, F.; Keil, R.; Minardi, S.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.

**Observation of three-dimensional discrete-continuous X waves in photonic lattices**

Physical Review Letters 106 (2011) 2 029901, ISSN 0031-9007

Helgert, C.; Pshenay-Severin, E.; Falkner, M.; Menzel, C.; Rockstuhl, C.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Lederer, F.; Pertsch, T.

**Chiral metamaterial composed of three-dimensional plasmonic nanostructures**

Nano Letters 11 (2011) 10 4400-4, ISSN 1530-6984

Helgert, C.; Rockstuhl, C.; Etrich, C.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Lederer, F.; Pertsch, T.

**Effects of anisotropic disorder in an optical metamaterial**

Applied Physics A: Materials Science & Processing 103 (2011) 3 p. 591–595, ISSN 0947-8396

Helm, R.; Mauroner, O.

**Soft starters, research boutiques and product-oriented firms: different business models for spin-off companies**

International Journal of Entrepreneurship and Small Business 12 (2011) 4 p. 479–498, ISSN 1476-1297

Henseleit, A.; Schmieder, S.; Bley, T.; Sonntag, F.; Schilling, N.; Quenzel, P.; Danz, N.; Klotzbach, U.; Boschke, E.

**A compact and rapid aptasensor platform based on surface plasmon resonance**

Engineering in Life Sciences 11 (2011) 6 p. 573–579, ISSN 1618-2863

Jansen, F.; Stutzki, F.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Avoided crossings in photonic crystal fibers**

Optics Express 19 (2011) 14 p. 13578–13589, ISSN 1094-4087

Jauregui, C.; Eidam, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Impact of modal interference on the beam quality of high-power fiber amplifiers**

Optics Express 19 (2011) 4 p. 3258–3271, ISSN 1094-4087

Jocher, C.; Jauregui, C.; Voigtländer, C.; Stutzki, F.; Nolte, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Fiber based polarization filter for radially and azimuthally polarized light**

Optics Express 19 (2011) 20 p. 19582–19590, ISSN 1094-4087

Kaiser, N.

**Optische Schichten als Innovationstreiber. Neue optische Schichtsysteme bieten das Potential, Licht auch in extremen Zeit-, Intensitäts- und Wellenlängenbereichen zu kontrollieren**

mo – Magazin für Oberflächentechnik 65 (2011) 1–2 S. 15–17, ISSN 0026-0797

Kalkowski, G.; Zeuske, J. R.; Risse, S.; Müller, S.; Peschel, T.; Rohde, M.

**Electrostatic clamping with an EUVL mask chuck: Particle issues**

Microelectronic Engineering 88 (2011) 8 p. 1986–1991, ISSN 0167-9317

Keil, R.; Dreisow, F.; Heinrich, M.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Szameit, A.

**Classical characterization of biphoton correlation in waveguide lattices**

Physical Review A 83 (2011) 1 013808, ISSN 1094-1622

Keil, R.; Heinrich, M.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Christodoulides, D.N.; Szameit, A.

**All-optical routing and switching for three-dimensional photonic circuitry**

Scientific Reports 1 (2011) 94, ISSN 2045-2322

Klenke, A.; Seise, E.; Demmler, S.; Rothhardt, J.; Breitkopf, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Coherently-combined two channel femtosecond fiber CPA system producing 3 mJ pulse energy**

Optics Express 19 (2011) 24 p. 24280–24285, ISSN 1094-4087

Kroker, S.; Brückner, F.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.

**Enhanced angular tolerance of resonant waveguide grating reflectors**

Optics Letters 36 (2011) 4 p. 537–539, ISSN 0146-9592

Kroker, S.; Käsebier, T.; Brückner, F.; Fuchs, F.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.

**Reflective cavity couplers based on resonant waveguide gratings**

Optics Express 19 (2011) 17 p. 16466–16479, ISSN 1094-4087

Lederer, F.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

**Selected papers in nonlinear dynamics in dissipative and discrete optical systems**

Applied Physics B: Lasers and Optics 104 (2011) 3 p. 451–452, ISSN 0946-2171

Leibinger, P.; Tünnermann, A.

**Agenda Photonik 2020 – Unsere Branche im Aufbruch**

Optik & Photonik 6 (2011) 1 S. 25–27, ISSN 1863-1460

Limpert, J.; Hädrich, S.; Rothhardt, J.; Krebs, M.; Eidam, T.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.

**Ultrafast fiber lasers for strong-field physics experiments**

Laser & Photonics Reviews 5 (2011) 5 p. 634–646, ISSN 1863-8880

Lutzke, P.; Kühmstedt, P.; Notni, G.

**Measuring error compensation on three-dimensional scans of translucent objects**

Optical Engineering 50 (2011) 6 063601, ISSN 0091-3286

Mauroner, O.

**Social Media im Wissenschaftsmarketing**

Wissenschaftsmanagement – Zeitschrift für Innovation, Jg. 17, Nr. 5, S. 30–34

Meyer, J.; Brückner, A.; Leitel, R.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.

**Optical cluster eye fabricated on wafer-level**

Optics Express 19 (2011) 18 p. 17506–17519, ISSN 1094-4087

Michaelis, D.; Schreiber, P.; Bräuer, A.

**Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems**

Optics Letters 36 (2011) 6 p. 918–920, ISSN 0146-9592

Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.; Schönberger W.; Fahland, M.

**Thin film growth on nanostructured polymer webs for anti-reflection purposes**

Surface & Coatings Technology 205 (2011) Supplement 2 S498–S501, ISSN 0257-8972

Nodop, D.; Schimpf, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Highly dynamic and versatile pulsed fiber amplifier seeded by a superluminescence diode**

Applied Physics B: Lasers and Optics 102 (2011) 4 p. 737-741, ISSN 0946-2171

Oliva, M.; Harzendorf, T.; Michaelis, D.; Zeitner, U. D.; Tünnermann, A.

**Multilevel blazed gratings in resonance domain: an alternative to the classical fabrication approach**

Optics Express 19 (2011) 15 p. 14735–14745, ISSN 1094-4087

Paetzold, U.W.; Moulin, E.; Michaelis, D.; Böttler, W.; Wächter, C.; Hagemann, V.; Meier, M.; Carius, R.; Rau, U.

**Plasmonic reflection grating back contacts for microcrystalline silicon solar cells**

Applied Physics Letters 99 (2011) 18 181105, ISSN 0003-6951

Präfke, C.; Schulz, U.; Kaiser, N.

**Preparation and characterization of organic layers for UV protection of polycarbonate**

Thin Solid Films (2011) doi:10.1016/j.tsf.2011.06.065

Pshenay-Severin, E.; Chipouline, A.; Petschulat, J.; Hübner, U.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.

**Optical properties of metamaterials based on asymmetric double-wire structures**

Optics Express 19 (2011) 7 p. 6277–6291, ISSN 1094-4087

Richter, S.; Döring, S.; Tünnermann, A.; Nolte, S.

**Bonding of glass with femtosecond laser pulses at high repetition rates**

Applied Physics A: Materials Science & Processing 103 (2011) 2 p. 257–261, ISSN 0340-3793

Richter, S.; Heinrich, M.; Döring, S.; Tünnermann, A.; Nolte, S.

**Formation of femtosecond laser-induced nanogratings at high repetition rates**

Applied Physics A: Materials Science & Processing 104 (2011) 2 p. 503–507, ISSN 0947-8396

Riehemann, S.; Palme, M.; Kühmstedt, P.; Grossmann, C.; Notni, G.; Hintersehr, J.

**Microdisplay-Based Intraoral 3D Scanner for Dentistry**

IEEE Journal of Display Technology 7 (2011) 3 p. 151–155, ISSN 1551-319X

Riehemann, S.; Palme, M.; Peschel, T.; Kunert, K.; Notni, G.; Blum, M.

**An accommodating opto-mechanical model of the aging human eye**

Journal of Modern Optics 58 (2011) 19–20 p. 1788-1803, ISSN 1362-3044

Ringleb, S.; Rademaker, K.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

**Monolithically integrated optical frequency converter and amplitude modulator in LiNbO<sub>3</sub> fabricated by femtosecond laser pulses**

Applied Physics B: Lasers and Optics 102 (2011) 1 p. 59–63, ISSN 0340-3793

Rothhardt, J.; Eidam, T.; Hädrich, S.; Jansen, F.; Stutzki, F.; Gottschall, T.; Andersen, T. V.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**135 W average-power femtosecond pulses at 520 nm from a frequency-doubled fiber laser system**

Optics Letters 36 (2011) 3 p. 316–318, ISSN 0146-9592

Scheiding, S.; Yi, A. Y.; Gebhardt, A.; Li, L.; Risse, S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Freeform manufacturing of a microoptical lens array on a steep curved substrate by use of a voice coil fast tool servo**

Optics Express 19 (2011) 24 p. 23938–23951, ISSN 1094-4087

Schmidt, C.; Chipouline, A.; Käsebier, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.

**Temperature induced nonlinearity in coupled microresonators**

Applied Physics B: Lasers and Optics 104 (2011) 3 p. 503–511, ISSN 0946-2171

Schmidt, O.; Rekas, M.; Wirth, C.; Rothhardt, J.; Rhein, S.; Kliner, A.; Strecker, M.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**High power narrow-band fiber-based ASE source**

Optics Express 19 (2011) 5 p.4421–4427, ISSN 1094-4087

Schönberger, W.; Gerlach, G.; Fahland, M.; Munzert, P.; Schulz, U.; Thielsch, R.; Kleinhempel, R.

**Large-area fabrication of stochastic nanostructures on polymer webs by ion- and plasma treatment**

Surface & Coatings Technology 205 (2011) Supplement 2 S495–S497, ISSN 0257-8972

Schröder, S.; Duparré, A.; Coriand, L.; Tünnermann, A.; Penalvar, D. H.; Harvey, J. E.

**Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness**

Optics Express 19 (2011) 10 p. 9820–9835, ISSN 1094-4087

Schröder, S.; Herfurth, T.; Blaschke, H.; Duparré, A.

**Angle-resolved scattering: An effective method for characterizing thin film coatings**

Applied Optics 50 (2011) 9 p. 164–171, ISSN 0003-6935

Schulz, M.; Riedel, R.; Willner, A.; Mans, T.; Schnitzler, C.; Russbueldt, P.; Dolkemeyer, J.; Seise, E.; Gottschall, T.; Hädrich, S.; Duesterer, S.; Schlarb, H.; Feldhaus, J.; Limpert, J.; Faatz, B.; Tünnermann, A.; Rossbach, J.; Drescher, M.; Tavella, F

**Yb:YAG Innoslab amplifier: efficient high repetition rate subpicosecond pumping system for optical parametric chirped pulse amplification**

Optics Letters 36 (2011) 13 p. 2456–2458, ISSN 0146-9592

Schulz, U.; Präfke, C.; Gödeker, C.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.

**Plasma-etched organic layers for antireflection purposes**

Applied Optics 50 (2011) 9 p. C31–C35, ISSN 0003-6935

Schulz, U.; Präfke, C.; Munzert, P.; Gödeker, C.; Kaiser, N.

**Formation of antireflective nanostructures on melamine and N,N'-di (1-naphthyl)-N,N'-diphenyl benzidine (NPB)**

Optical Materials Express 1 (2011) 1 p. 101–107, ISSN 2159-3930

Schulze, M.; Lehr, D.; Helgert, M.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.

**Transmission enhanced optical lenses with self-organized antireflective subwavelength structures for the UV range**

Optics Letters 36 (2011) 19 p. 3924–3926, ISSN 0146-9592

Schürmann, M.; Jobst, P.-J.; Müller, T.; Scheler, M.; Kaiser, N.

**Beschichtung großer Substrate für die Präzisionsoptik**

Photonik (2011) 1 S. 18, ISSN 1432–9778

Seise, E.; Klenke, A.; Breitkopf, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**88 W 0.5 mJ femtosecond laser pulses from two coherently combined fiber amplifiers**

Optics Letters 36 (2011) 19 p. 3858–3860, ISSN 0146-9592

Seise, E.; Klenke, A.; Breitkopf, S.; Plötner, M.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Coherently combined fiber laser system delivering 120 μJ femtosecond pulses**

Optics Letters 36 (2011) 4 p. 439-441, ISSN 0146-9592

Setz, D.S.; Schmidt, T.D.; Flämmich, M.; Nowy, S.; Frischeisen, J.; Krummacker, B. C.; Dobbertin, T.; Heuser, K.; Michaelis, D.; Danz, N.; Brütting, W.; Winnacker, A.

**Comprehensive efficiency analysis of organic light emitting devices**

Journal of Photonics for Energy 1 (2011) 1 011006, ISSN 1947-7988

Setzpfandt, F.; Neshev, D.N.; Sukhorukov, A.A.; Schiek, R.; Ricken, R.; Min, Y.; Kivshar, Y.S.; Sohler, W.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.

**Nonlinear dynamics with higher-order modes in lithium niobate waveguide arrays**

Applied Physics B: Lasers and Optics 104 (2011) 3 p. 487–493, ISSN 0946-2171

Sieler, M.; Schreiber, P.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.

**Ultraslim fixed pattern projectors with inherent homogenization of illumination**

Applied Optics, 51 (2012)1, p.64–74, ISSN 1559–128X

Steinmetz, A.; Eidam, T.; Nodop, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Nonlinear compression of Q-Switched laser pulses to the realm of ultrashort durations**

Optics Express 19 (2011) 4 p. 3758-3764, ISSN 1094-4087

Stenzel, O.; Gäbler, D.; Wilbrandt, S.; Kaiser, N.; Steffen, H.; Ohl, A.

**Plasma ion assisted deposition of aluminium oxide and aluminium oxifluoride layers for applications in the ultraviolet spectral range**

Optical Materials 33 (2011) 11 p. 1681–1687, ISSN 0925-3467

Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Schürmann, M.; Kaiser, N.; Tünnermann, A. et al.

**Mixed Oxide Coatings for Optics**

Applied Optics 50 (2011) 9 p. C69–C74, ISSN 0003-6935

Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Yulin, S.; Kaiser, N.; Held, M.; Tünnermann, A.; Biskupek, J.; Kaiser, U.

**Plasma ion assisted deposition of hafnium dioxide using argon and xenon as process gases**

Optical Materials Express 1 (2011) 2 p. 278–292, ISSN 2159-3930

Stutzki, F.; Jansen, F.; Eidam, T.; Steinmetz, A.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation**

Optics Letters 36 (2011) 5 p. 689–691, ISSN 0146-9592

Stutzki, F.; Jansen, F.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Non-hexagonal Large-Pitch Fibers for enhanced mode discrimination**

Optics Express 19 (2011) 13 p. 12081–12086, ISSN 1094-4087

Stutzki, F.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Real-time characterisation of modal content in monolithic few-mode fibre lasers**

Electronics Letters 47 (2011) 4 p. 274–275, ISSN 0013-5194

Thomas, J.; Heinrich, M.; Zeil, P.; Hilbert, V.; Rademaker, K.; Riedel, R.; Ringleb, S.; Dubs, C.; Ruske, J.-P.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

**Laser direct writing: Enabling monolithic and hybrid integrated solutions on the lithium niobate platform**

Physica status solidi. A 208 (2011) 2 p. 276–283, ISSN 0031-8965

Thomas, J.; Jovanovic, N.; Becker, R. G.; Marshall, G. D.; Withford, M. J.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Steel, M. J.

**Cladding mode coupling in highly localized fiber Bragg gratings: modal properties and transmission spectra**

Optics Express 19 (2011) 1 p. 325–341, ISSN 1094-4087

Trost, M.; Schröder, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Tünnermann, A.

**Influence of the Substrate Finish and Thin Film Roughness on the Optical Performance of Mo/Si Multilayers**

Applied Optics 50 (2011) 9 p. 148–153, ISSN 0003-6935

Voigtländer, C.; Becker, R. G.; Thomas, J.; Richter, D.; Singh, A.; Tünnermann, A.; Nolte, S.

**Ultrashort pulse inscription of tailored fiber Bragg gratings with a phase mask and a deformed wavefront**

Optical Materials Express 1 (2011) 4 p. 633–642, ISSN 2159-3930

Voigtlander, C.; Richter, D.; Thomas, J.; Tünnermann, A.; Nolte, S.

**Inscription of high contrast volume Bragg gratings in fused silica with femtosecond laser pulses**

Applied Physics A: Materials Science & Processing 102 (2011) 1 p. 35–38, ISSN 0947-8396

Weber, T.; Käsebier, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.

**Broadband iridium wire grid polarizer for UV applications**

Optics Letters 36 (2011) 4 p. 445–447, ISSN 0146-9592

Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Bischoff, M.; Kaiser, N.

**Combined in situ and ex situ optical data analysis of magnesium fluoride coatings deposited by plasma ion assisted deposition**

Applied Optics 50 (2011) 9 p. C5–C10, ISSN 0003-6935

Williams, R. J.; Voigtländer, C.; Marshall, G. D.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Steel, M. J.; Withford, M. J.

**Point-by-point inscription of apodized fiber Bragg gratings**

Optics Letters 36 (2011) 15 p. 2988–90, ISSN 0146-9592

Wirth, C.; Schmidt, O.; Kliner, A.; Schreiber, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**High-power tandem pumped fiber amplifier with an output power of 2.9 kW**

Optics Letters 36 (2011) 16 p. 3061–3063, ISSN 0146-9592

Wirth, C.; Schmidt, O.; Tsybin, I.; Schreiber, T.; Eberhardt, R.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Ludewigt, K.; Gowin, M.; Have, E.t.; Jung, M.

**High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW**

Optics Letters 36 (2011) 16 p. 3118–3120, ISSN 0146-9592

Yoo, G.; Radtke, D.; Baek, G.; Zeitner, U. D.; Kanicki, J.

**Electrical Instability of a-Si:H TFTs Fabricated by Maskless Laser-Write Lithography on a Spherical Surface**

IEEE Transactions on Electron Devices 58 (2011) 1 p. 160–164, ISSN 0018-9383

[Eingeladene Vorträge | Invited Lectures](#)

Bräuer, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Leitel, R.

**Bio-inspired multichannel imaging**

8<sup>th</sup> International Symposium on Modern Optics and Its Applications (ISMOA), 4.–7.7.2011, Bandung, Indonesia

Duparré, A.

**PSD als Auswertewerkzeug in der Oberflächenmesstechnik**

Optikseminar der Hochschule für Angewandte Wissenschaften – HAW Deggendorf, 7.6.2011, Teisnach, Deutschland

Eberhardt, R.; Beckert, E.;  
Böhme, S.; Tünnermann, A.

**Laser based joining technologies for optical systems**

JENOPTIK Laser GmbH – Customer  
Day „20 years Jenoptik“,  
1.7.2011, Jena, Germany

Eberhardt, R.; Beckert, E.; Gebhardt, A.;  
Mohaupt, M.; Burkhardt, T.; Tünnermann, A.

**Adjustment turning of inorganic-metallic mounted optical components**

World of Photonics 2011, EOSMOC  
2011 – 2<sup>nd</sup> EOS Conference on  
Manufacturing of Optical Components,  
22.–26.5.2011, Munich, Germany

Kaiser, N.

**Beschichtung großer Präzisionsflächen**

Otti Seminar Schichten auf Glas – Schichtherstellung, Funktionalisierung, Optimierung,  
11.–12.5.2011, Regensburg, Deutschland

Kaiser, N.

**Design optischer Schichtsysteme**

Otti Seminar Schichten auf Glas – Schichtherstellung, Funktionalisierung, Optimierung,  
11.–12.5.2011, Regensburg, Deutschland

Kaiser, N.

**Der hauchdünne Vorsprung: Optiken für die EUV-Lithographie**

Technologiezentrum Chemnitz,  
Erstes Industriegespräch Chemnitz/Jena,  
24.5.2011, Chemnitz, Deutschland

Kaiser, N.

**Die Bedeutung dünner Schichten für die Optischen Technologien**

Otti Seminar Optische Technologien – vom Design zum Produkt, 2.–3.3.2011,  
Regensburg, Deutschland

Kaiser, N.

**Nanotechnologie**

SBO-Tag Salzmannschule Schnepfenthal,  
8.3.2011, Waltershausen, Deutschland

Kaiser, N.

**Plasma und Optische Technologien (PluTO)**

DPG Jahrestagung, FV Plasmaphysik und Kurzzeitphysik, Symposium Plasma und optische Technologien (SYPT),  
29.3.2011, Kiel, Deutschland

Kaiser, N.

**Was ist Präzisionsoptik?**

Otti Seminar Schichtherstellungstechniken für die Präzisionsoptik, 9.–10.11.2011,  
Regensburg, Deutschland

Munzert, P.; Präfke, C.; Schulz, U.; Kaiser, N.

**Vacuum Deposition of Optical Coatings on PMMA and Polycarbonate**

8th International Symposium on Polymer Surface Modification, 20.–22.6.11, Danbury, USA

Nolte, S.; Döring, S.; Ancona, A.;

Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High Repetition Rate Ultrashort Pulse**

**Micromachining with Fiber Lasers**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP),  
13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey  
Proceedings Advanced Solid-State Photonics (ASSP), OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) FThC1

Notni, G.

**Some challenges in shape measurements of optical freeform surfaces**

SPIE Optical Metrology/Optical Measurement Systems for Industrial Inspection,  
23.–26.5.2011, Munich, Germany

Notni, G.

**Vermessung präzisionsbearbeiteter Oberflächen – Von der Makrogeometrie bis zur Oberflächenrauheit**

Hannoversches Optisches Kolloquium,  
30.3.2011, Hannover, Deutschland

Schreiber, P.

**Concepts for LED-Illumination systems and prototyping**

Smart Lighting Conference 2011,  
2.–3.3.2011, Düsseldorf, Germany

Schulz, U.

**Beschichtung von Kunststoffen für optische Anwendungen**

SKZ-Seminar Optische Kunststoff-Formteile in Design und Technik,  
30.6.2011, Würzburg, Deutschland

Schulz, U.; Munzert, P.; Präfke, C.; Kaiser, N.

**Coatings on transparent plastics for automotive applications**

Proceedings SPE Eurotec 2011,  
14.–15.11.2011, Barcelona, Spain

Schulz, U.; Präfke, C.; Munzert, P.; Kaiser, N.

**Organic small molecule-based optical coatings**

SPIE Optical System Design 2011,  
Advances in Optical Thin Films IV,  
5.–8.9.2011, Marseille, France  
SPE Proceedings Vol. 8168 (2011)  
81680Q, ISBN 9780819487940

Sieler, M.; Schreiber, P.;

Dannberg, P.; Bräuer, A.

**Design and Realization of an Ultra-Slim Array Projector**

17<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC '11),  
30.10.–2.11.2011, Sendai, Japan  
Proceedings 17<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC '11) F-5, ISBN 978-4-86348-182-4

Stenzel, O.; Schulz, U.; Kaiser, N.

**Nanostructure effects and the performance of optical interference coatings**

SPIE Optics + Photonics 2011, Nanostructured Thin Films IV, 21.–25.8.2011,  
San Diego, California, USA  
SPE Proceedings Vol. 8104 (2011)  
810409, ISBN 9780819487148

Zimer, H.; Kozak, M.; Liem, A.; Flohrer, F.; Doerfel, F.; Riedel, P.; Linke, S.; Horley, R.; Ghiringhelli, F.; Demoullins, S.; Zervas, M.; Kirchhof, J.; Unger, S.; Jetschke, S.; Peschel, T.; Schreiber, T.

**Fibers and fiber-optic components for high power fiber lasers**

SPIE Photonics West, 22.–26.1.2011,  
San Francisco, California, USA  
SPE Proceedings Vol. 7914 (2011)  
791414, ISBN 9780819484512

Baumgartl, M.; Jansen, F.; Stutzki, F.;  
Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**22 Watt Average Power Multi-MW fiber oscillator**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP),  
13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey  
OSA Technical Digest (Optical Society of  
America 2011) (2011) ATuC4

Baumgartl, M.; Jansen, F.; Stutzki, F.; Jauregui,  
C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High Power 100fs Fiber Oscillator**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA  
Technical Digest (Optical Society of America  
2011) (2011) CJ5\_1

Beckert, E.; Wippermann, F.; Walther, S.;  
Burkhardt, T.; Messerschmidt, B.; Bartnitzek, T.;  
Vahrenkamp, T.; Eberhardt, R.; Gäbler, D.;  
Tünnermann, A.

**Autoclaveable miniaturized video endoscopes with simplified flip-chip assembly**

SPIE Photonics West, BIOS Conference,  
22.–26.1.2011, San Francisco, CA, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7893 (2011) 78930B,  
ISBN 9780819484307

Benkenstein, T.; Flämmich, M.; Harzendorf, T.;  
Käsebieber, T.; Michaelis, D.; Oliva, M.; Wächter,  
C.; Zeitner, U.D.

**Effects of metallic nanoparticle arrays in Si solar cell structures**

SPIE Optics + Photonics 2011, Thin Film Solar  
Technology III, 21.–25.8.2011, San Diego, CA,  
USA  
SPIE Proceedings Vol. 8110 (2011) 81100D,  
ISBN 9780819487209

Bingel, A.; Fuchs, K.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.

**Tailored TCOs**

SPIE Optical Systems Design 2011, Advances  
in Optical Thin Films IV, 5.–8.9.2011, Marseille,  
France  
SPIE Proceedings Vol. 8168 (2011) 81680R,  
ISBN 9780819487940

Brahm, A.; Bauer, M.; Hoyer, T.; Quast, H.; Löffler,  
T.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.

**All-electronic 3D computed THz tomography**

36<sup>th</sup> International Conference on Infrared,  
Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz  
2011), 2.–7.10.2011, Houston, Texas, USA

Brahm, A.; Weigel, A.; Riehemann, S.;  
Notni, G.; Tünnermann, A.

**Highly precise parameter extraction of thin multi-layers in THz transmission and reflection geometry**

36<sup>th</sup> International Conference on Infrared,  
Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz  
2011), 2.–7.10.2011, Houston, Texas, USA

Brahm, A.; Weigel, A.; Riehemann, S.;  
Notni, G.; Tünnermann, A.

**Interferometrie mit ultrakurzen Terahertz-Pulsen**

112. Tagung der DGaO, 14.–18.6.2011,  
Ilmenau, Deutschland  
DGaO-Proceedings 2011 (2011) B34, ISSN  
1614-8436

Bräuer, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.;  
Dannberg, P.; Leitl, R.

**High Resolution Multichannel Imaging Systems**

17<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC '11),  
30.10.–2.11.2011, Sendai, Japan  
Proceedings 17<sup>th</sup> Microoptics Conference  
(MOC '11) F-2, ISBN 978-4-86348-182-4

Bräuer, A.; Sieler, M.; Schreiber, P.; Dannberg,  
P.; Höfer, B.

**Novel LED-based slim microoptical array projector for luminaires and display applications**

4<sup>th</sup> EOS Topical Meeting on Optical Microsystems (OμS'11), 26.–28.9.2011, Capri, Italy

Bräuer-Burchardt, C.; Breitbarth, A.; Kühmstedt,  
P.; Schmidt, I.; Heinze, M.; Notni, G.

**Fringe Projection Based High Speed 3D Sensor for Real-Time Measurements**

SPIE Optical Metrology/Optical Measurement  
Systems for Industrial Inspection,  
23.–26.5.2011, Munich, Germany  
SPIE Proceedings Vol. 8082 (2011) 808212,  
ISBN 9780819486783

Bräuer-Burchardt, C.; Breitbarth, A.; Munkelt,  
C.; Heinze, M.; Kühmstedt, P.; Notni, G.

**Calibration evaluation and calibration stability monitoring of fringe projection based 3D scanners**

PIA 11, Photogrammetric Image Analysis,  
5.–7.10.2011, Munich, Germany

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

**Error compensation by sensor re-calibration in fringe projection based optical 3D stereo scanners**

16<sup>th</sup> International Conference on Image Analysis  
and Processing (ICIAP), 14.–16.9.2011,  
Ravenna, Italy

Bräuer-Burchardt, C.; Munkelt, C.; Heinze, M.;  
Kühmstedt, P.; Notni, G.

**Using geometric constraints to solve the point correspondence problem in fringe projection based 3D measuring systems**

16<sup>th</sup> International Conference on Image Analysis  
and Processing (ICIAP), 14.–16.9.2011,  
Ravenna, Italy

Breitbarth, A.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.;  
Schmidt, I.; Notni, G.

**Ultra-mobile 3D-Messtechnik – Handgeführter 3D-Scanner „kolibri CORDLESS“**

11<sup>th</sup> International Police Workshop on  
Photogrammetry, Laser Scanning and  
Terrestrial Technologies, 27.–29.7.2011, Neuss,  
Deutschland



Breitbarth, A.; Kühmstedt, P.; Schmidt, I.;  
Bräuer-Burchardt, C.; Notni, G.

**Streifenlichtbasierter 3D-Hochgeschwindigkeitsensor unter Nutzung der Epipolargeometrie**

10. Oldenburger 3D-Tage, 2.–3.2.2011,  
Oldenburg, Deutschland  
Photogrammetrie, Laserscanning, optische  
3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger  
3D-Tage 2011 S. 248–257,  
ISBN 978-3-87907-506-5

Breitbarth, A.; Schmidt, I.; Kühmstedt, P.;  
Notni, G.

**3-D-Messung mit extrem kurzer Zykluszeit in Fertigungsprozessen**

Proceedings Fraunhofer Vision-Technologietag  
2011: Innovative Technologien für die industrielle  
Qualitätssicherung mit Bildverarbeitung,  
29.–30.6.2011, Kaiserslautern, Deutschland  
23.–24.11.2011, Magdeburg, Deutschland

Breitbarth, A.; Schmidt, I.; Kühmstedt, P.;  
Notni, G.

**Geschwindigkeitsoptimierung eines hochauflösenden, maschinenintegrierbaren 3D-Sensors auf Basis Streifenprojektion**

112. Tagung der DGaO, 14.–18.6.2011,  
Ilmenau, Deutschland  
DGaO-Proceedings 2011 (2011) A35,  
ISSN 1614-8436

Bruchmann, C.; Appelfelder, M.; Türke, S.;  
Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Optical characterization of a screen printed actuator deformable mirror**

Proceedings 8<sup>th</sup> International Workshop on  
Adaptive Optics for Industry and Medicine  
(AOIM), 5.–9.6.2011, Murcia, Spain  
p. 74–75

Brückner, A.; Leitel, R.; Dannberg, P.; Wippermann, F.; Bräuer, A.

**A multi-aperture approach to wafer-level camera lenses**

SPIE Photonics West, 22.–26.1.2011, San  
Francisco, CA, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7930 (2011) 79300B,  
ISBN 9780819484673

Brückner, A.; Wippermann, F.; Leitel, R.;  
Dannberg, P.; Buß, W.; Höfer, B.; Bräuer, A.;  
Duparré, J.

**Flachbauendes Mikroskop: Ein mikrooptisches Abbildungssystem für digitale Nahaufnahmen**

Proceedings 4. VDE/VDI Mikrosystemtechnik-  
Kongress 2011, 10.–12.10.2011, Darmstadt,  
Deutschland, S. 134–137,  
ISBN 978-3-8007-3367-5

Burkhardt, T.; Bruchmann, C.; Kamm, A.; Hornaff, M.; Beckert, E.; Gebhardt, S.; Müller, J.; Hoffmann, M.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Smarte adaptive-optische Mikrosysteme – Aufbautechnologie und thermomechanische Charakterisierung**

Proceedings 4. VDE/VDI Mikrosystemtechnik-  
Kongress 2011, 10.–12.10.2011, Darmstadt,  
Deutschland, S. 587–590,  
ISBN 978-3-8007-3367-5

Burkhardt, T.; Hornaff, M.; Kamm, A.;  
Rütz, M.; Possner, T.; Beckert, E.; Eberhardt, R.;  
Tünnermann, A.

**Assembly of a photonic wavelength-division multiplexing device using laser-based soldering**

SPIE Proceedings Vol. 8069 (2011) 80690V,  
ISBN 9780819486585

Burkhardt, T.; Mohaupt, M.; Hornaff, M.;  
Zaage, B.; Beckert, E.; Döring, H.-J.; Slodowski, M.; Reimer, K.; Witt, M.; Eberhardt, R.;  
Tünnermann, A.

**Packaging technology of multi deflection arrays for multi-shaped beam lithography**

Proceedings IMAPS 2011, 44<sup>th</sup> International  
Symposium on Microelectronics,  
9.–13.10.2011, Long Beach, CA, USA,  
p. 600–607, ISBN 0-930815-94-7

Buß, W.; Richter, H.; Bartnitzek, T.; Brode, W.;  
Heymel, A.; Walther, T.

**Embossed Ceramic Reflectors with Nano Dispersive Coatings for Compact Optoelectronic Systems**

Proceedings 18<sup>th</sup> European Microelectronics  
and Packaging Conference (EMPC) 2011,  
12.–15.9.2011, Brighton, England,  
ISBN 978-0956808608

Chipouline, A.; Petschulat, J.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.; Menzel, C.;  
Rockstuhl, C.; Lederer, F.; Fedotov, V.A.

**Multipole model for metamaterials with gain: from nano-laser to quantum metamaterials**

SPIE Proceedings Vol. 8070 (2011)  
80700O, ISBN 9780819486608

Coriand, L.; Duparré, A.; Tünnermann, A.

**Advanced PSD-analysis of optical surfaces by mid- and high-spatial frequency metrology**

SPIE Optical Systems Design 2011, Optical  
Fabrication, Testing, and Metrology IV,  
5.–8.9.2011, Marseille, France

Danz, N.; Kick, A.; Sonntag, F.; Schmieder, S.;  
Mertig, M.; Klotzbach, U.

**SPR Technologie zur Multi-Parameter-Analyse auf polymeren Chips**

Proceedings 4. VDE/VDI Mikrosystemtechnik-  
Kongress 2011, 10.–12.10.2011, Darmstadt,  
Deutschland, S. 741–744,  
ISBN 978-3-8007-3367-5

Döring, S.; Richter, S.; Nolte, S.;  
Tünnermann, A.

**In-situ observation of the hole formation during deep drilling with ultrashort laser pulses**

SPIE Proceedings Vol. 7925 (2011) 792517,  
ISBN 9780819484628

Döring, S.; Richter, S.; Tünnermann, A.; Nolte, S.

**In-situ observation of ultrashort pulse deep drilling in silicon at 1030 nm and 515 nm**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA  
Technical Digest (Optical Society of America  
2011) (2011) CM\_P17

Dreisow, F.; Heinrich, M.; Keil, R.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Longhi, S.; Szameit, A.

**Photonic Zitterbewegung: Relativistic physics in waveguide arrays**

Proceedings CLEO 2011 – Laser Applications  
to Photonic Applications, OSA Technical Digest  
(Optical Society of America 2011) (2011)  
QWF4

Dreisow, F.; Heinrich, M.; Keil, R.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Longhi, S.; Szameit, A.

**Relativistic physics in waveguide arrays: The Zitterbewegung**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) EH2\_1

Dreisow, F.; Wang, G.; Heinrich, M.; Keil, R.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Szameit, A.

**Bloch oscillations in zigzag waveguide arrays**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) EH\_P14

Duparré, A.

**Laser based light scattering techniques for efficient optical quality control**

3rd OASIS/13<sup>th</sup> Meeting on Optical Engineering and Science in Israel, 9.–10.3.2011, Tel-Aviv, Israel

Duparré, A.; Trost, M.

**Rauheitsbewertung auf fertigungsrelevanten Oberflächen mittels Streulichtverfahren**

Proceedings Fraunhofer Vision-Technologietag 2011: Innovative Technologien für die industrielle Qualitätssicherung mit Bildverarbeitung, 29.–30.6.2011, Kaiserslautern, Deutschland  
23.–24.11.2011, Magdeburg, Deutschland

Eberhardt, R.; Gebhardt, A.

**Technologien für die Instrumentierung in der Astronomie – neue Entwicklungen**

Max-Planck-Institut für Sonnenforschung, 24.2.2011, Katlenburg-Lindau, Deutschland

Eckstein, H.-C.; Zeitner, U.D.; Ahmed, K.; Schmid, W.; Strauss, U.

**Control of slow axis mode behavior with waveguide phase structures in semiconductor broad-area lasers**

SPIE Proceedings Vol. 7953 (2011) 79531J, ISBN 9780819484901

Eidam, T.; Hädrich, S.; Rothhardt, J.; Stutzki, F.; Jansen, F.; Gottschall, T.; Andersen, T.V.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High average power femtosecond pulses at 520 nm via second harmonic generation of a fiber chirped pulse amplification system**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) FThB2

Eidam, T.; Rothhardt, J.; Stutzki, F.; Jansen, F.; Hädrich, S.; Carstens, H.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Fiber CPA System delivering 2.2 mJ, sub 500 fs pulses with 3.8 GW Peak Power**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey

Eilenberger, F.; Minardi, S.; Pshenay-Severin, E.; Kartashov, Y.; Szameit, A.; Roepke, U.; Kobelke, J.; Schuster, K.; Torner, L.; Nolte, S.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.

**Observation of nonlinear Light Bullets in waveguide arrays**

Proceedings CLEO 2011: QELS – Spatiotemporal Dynamics and Discrete Systems, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) QMD5

Enghardt, W.; Bussmann, M.; Cowan, T.; Fiedler, F.; Kaluza, M.; Pawelke, J.; Schramm, U.; Sauerbrey, R.; Tünnermann, A.; Baumann, M.

**A technology platform for translational research on laser driven particle accelerators for radiotherapy**

SPIE Proceedings Vol. 8079 (2011) 80791F, ISBN 9780819486691

Feigl, T.; Pauer, H.; Perske, M.; Yulin, S.; Trost, M.; Schröder, S.; Duparré, A.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.

**Optical performance of 5.5 sr LPP multilayer collectors**

2011 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, 17.–19.10.2011, Miami, Florida, USA

Fiedler, T.; Schulz, U.; Kaiser, N.

**Herstellung und Eigenschaften von Melamin-Nanostrukturen**

V2011, Industrieausstellung & Workshop-Woche, 19. NDVak, Beschichtung, Modifizierung und Charakterisierung von Polymeroberflächen, 17.–20.10.2011, Dresden, Deutschland

Finck, A.v.; Hauptvogel, M.; Duparré, A.

**Table-Top Streulichtmesssystem ALBATROSS-TT**

112. Tagung der DGaO, 14.–18.6.2011, Ilmenau, Deutschland

Finck, A.v.; Herffurth, T.; Hauptvogel, M.; Duparré, A.

**Symmetry and anisotropy ARS analysis of optical components**

SPIE Optical Systems Design 2011, Optical Fabrication, Testing, and Metrology IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France

Flämmich, M.; Michaelis, D.; Danz, N.

**In situ measurement of spectrum, emission zone, and dipole emitter orientation in OLEDs**

SPIE Proceedings Vol. 7954 (2011) 795410, ISBN 9780819484918

Flämmich, M.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Danz, N.

**Precise determination of OLED emitter properties**

SPIE Optics + Photonics 2011, Organic Light Emitting Materials and Devices XV, 21.–25.8.2011, San Diego, CA, USA

Franke, C.; Schürmann, M.; Wilbrandt, S.; Jobst, P. J.; Kaiser, N.

**Deposition of dielectric coatings on large optical components by reactive magnetron sputtering**

10<sup>th</sup> International Conference on Reactive Sputter Deposition, 8.–9.12.2011, Linköping, Schweden

Freese, W.; Kämpfe, T.; Kley, E.-B.;  
Tünnermann, A.

**Design and fabrication of a highly off-axis binary multi-phase-level computer-generated hologram based on an effective medium approach**

SPIE Proceedings Vol. 7927 (2011) 792710,  
ISBN 9780819484642

Frey, K.; Palme, M.; Peschel, T.; Riehemann, S.;  
Notni, G.

**An opto-mechanical model and stray light investigation of laser treated human eye**

SPIE Optical Systems Design 2011, Optical Design and Engineering IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France  
SPIE Proceedings Vol. 8167 (2011) 816705,  
ISBN 9780819487933

Frey, K.; Palme, M.; Riehemann, S.; Notni, G.

**Optische Äquivalent-Modelle für das menschliche Auge hinsichtlich Laserbehandlungen**

112. Tagung der DGaO, 14.–18.6.2011, Ilmenau, Deutschland  
DGaO-Proceedings 2011 (2011) B16,  
ISSN 1614-8436

Füchsel, K.; Bingel, A.; Kaiser, N.;  
Tünnermann, A.

**Transparent conductive oxides for Nano-SIS solar cells**

SPIE Eco Photonics 2011, 28.–30.3.2011, Strasbourg, France  
SPIE Proceedings Vol. 8065 (2011) 80650B,  
ISBN 9780819486516

Gather, M.C.; Danz, N.; Meerholz, K.;  
Leosson, K.

**Optical Amplification of Propagating Surface Plasmon Polaritons**

Proceedings CLEO 2011: QELS – Fundamental Science, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) QFES

Gebhardt, A.; Scheiding, S.; Kinast, J.;  
Risse, S.; Trost, M.; Duparré, A.; Rohloff, R.-R.;  
Schönherr, V.

**Nickel Plated Metal Mirrors for Advanced Applications**

26. Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering (ASPE), 13.–18.11.2011, Denver, Co, USA

Großmann, C.; Perske, F.; Riehemann, S.;  
Herold, R.; Richter, B.; Vogel, U.; Notni, G.;  
Tünnermann, A.

**Bidirectional OLED microdisplay utilized as inverse confocal sensor**

SID-ME Chapter Spring Meeting 2011, 10.–11.3.2011, Seeheim-Jugenheim, Germany

Großmann, C.; Perske, F.; Riehemann, S.;  
Herold, R.; Richter, B.; Vogel, U.; Notni, G.;  
Tünnermann, A.

**Inverse confocal sensor based on bidirectional OLED display**

SID 2011, Display Week, 49<sup>th</sup> International Symposium, Seminar, and Exhibition, 15.–20.5.2011, Los Angeles, CA, USA  
Digest of Technical Papers from the SID International Symposium 2011 p. 66–69,  
ISSN 0097-966X

Großmann, C.; Perske, F.; Zwick, S.; Baumgarten, J.; Richter, B.; Riehemann, S.; Vogel, U.;  
Notni, G.; Tünnermann, A.

**Surface metrology system based on bidirectional microdisplays**

SPIE Optical Systems Design 2011, 5.–8.9.2011, Marseille, France  
SPIE Proceedings Vol. 8167 (2011) 81670Q,  
ISBN 9780819487933

Großmann, C.; Perske, F.; Zwick, S.;  
Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.

**Einsatz von bidirektionalen Mikrodisplays in der Messtechnik**

112. Tagung der DGaO, 14.–18.6.2011, Ilmenau, Deutschland  
DGaO-Proceedings 2011 (2011) A15,  
ISSN 1614-8436

Großmann, C.; Zwick, S.; Perske, F.;  
Baumgarten, J.; Richter, B.; Wartenberg, P.;  
Herold, R.; Brenner, S.; Vogel, U.; Riehemann, S.;  
Notni, G.; Tünnermann, A.

**Einsatz von Bidirektionalen Mikrodisplays in der Messtechnik als invers-konfokaler Sensor**

Proceedings, S. 425–428,  
ISBN 978-3-8007-3367-5

Hädrich, S.; Carstens, H.; Rothhardt, J.;  
Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High Peak and Average Power Ultrashort Pulses from Double Stage Nonlinear Compression of a Fiber Chirped Pulse Amplification System**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) AMD5

Hädrich, S.; Carstens, H.; Rothhardt, J.;  
Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High Average Power Ultrashort Pulses with 5 GW Peak Power**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CF8\_2

Hädrich, S.; Rothhardt, J.; Eidam, T.; Gottschall, T.;  
Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High-average power second harmonic generation of femtosecond fiber lasers**

SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 79140S,  
ISBN 9780819484512

Harvey, J.E.; Schröder, S.; Choi, N.; Duparré, A.

**Determining parametric TIS behavior from optical fabrication metrology data**

SPIE Optics + Photonics 2011, Optical Manufacturing and Testing IX, 21.–25.8.2011, San Diego, CA, USA

SPIE Proceedings Vol. 8126 (2011) 81260X,  
ISBN 9780819487360

Heidler, N.; Mohaupt, M.; Risse, S.; Döring, H.-J.  
**Investigations on clearance seal units for moving elements in an ultra-high vacuum region**

Proceedings IWK 2011, 56<sup>th</sup> International Scientific Colloquium, 12.–16.9.2011, Ilmenau, Germany, urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011iwk-074:4

Heidler, N.; Holub, T.; Risse, S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Load bearing capacity and stiffness of porous journal gas bearing elements in a vacuum environment**

26<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering (ASPE), 13.–18.11.2011, Denver, Co, USA

Heinrich, M.; Keil, R.; Dreisow, F.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Szameit, A.

**Discrete Solitons in Photonic Lattices with Topological Defects**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CD5\_4

Herffurth, T.; Hauptvogel, M.; Duparré, A.; Tünnermann, A.

**Kompakter streulichtbasierter Rauheitssensor**

112. Tagung der DGaO, 14.–18.6.2011, Ilmenau, Deutschland

Herffurth, T.; Hauptvogel, M.; Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.

**Light scattering based roughness sensor**

SPIE Optical Systems Design 2011, Optical Fabrication, Testing, and Metrology IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France

Hideur, A.; Lecaplain, C.; Ortaç, B.; Machinet, G.; Bouillet, J.; Cormier, E.; Baumgartl, M.; Schreiber, T.

**Femtosecond Microjoule-Class Ytterbium Fiber Lasers**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey

Hill, S.B.; Faradzhev, N.S.; Richter, L.J.;

Grantham, S.; Tarrío, C.; Lucatorto, T.B.; Yulin, S.; Schürmann, M.; Nesterenko, V.; Feigl, T.

**Optics contamination studies in support of high-throughput EUV lithography tools**

SPIE Proceedings Vol. 7969 (2011) 79690M, ISBN 9780819485281

Jansen, F.; Stutzki, F.; Eidam, T.; Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Carstens, H.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Yb-doped Large Pitch Fiber with 105  $\mu\text{m}$  Mode Field Diameter**

Proceedings Optical Fiber Communication Conference (OFC), OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) OTuC5

Jansen, F.; Stutzki, F.; Eidam, T.; Steinmetz, A.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Robust single-mode ytterbium-doped large pitch fiber emitting 294 W**

SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 791417, ISBN 9780819484512

Jansen, F.; Stutzki, F.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Anticrossings induced by index depressions and their impact on mode area scaling of active large pitch fibers**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CJ\_P19

Janunts, N.; Steinert, M.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.; Nerkarayan, K.

**Optical transmissivity of single metallic V-grooves**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) EJ1\_5

Jauregui, C.; Eidam, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Inversion Grating Assisted Beam Quality Degradation in High Power Fiber Laser Systems**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) ATuD1

Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**On the Raman threshold of passive large mode area fibers**

SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 791408, ISBN 9780819484512

Jauregui, C.; Nodop, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Improved parametric generation of light in optical fibers**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CD\_P13

Jauregui, C.; Eidam, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Impact of modal interference on high-power fiber laser systems**

SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 79142I, ISBN 9780819484512

Jobst, P. J.; Schürmann, M.; Kaiser, N.; Beier, B.; Luck, F. U.; Thaut, M.

**Beschichtungstechnologie und Anwendungen von strukturierbaren breitbandig reflektionsgemindertem Chrom**

V2011, Industrieausstellung & Workshop-Woche, Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik, 17.–20.10.2011, Dresden, Deutschland

Jobst, P. J.; Schürmann, M.; Kaiser, N.; Luck, F. U.; Beier, B.; Thaut, M.

**Reflexionsgeminderte Chromschichten für Anwendungen in der Mikrooptik**

V2011, Industrieausstellung & Workshop-Woche, Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik, 17.–20.10.2011, Dresden, Deutschland

Jobst, P. J.; Schürmann, M.; Kaiser, N.; Beier, B.; Luck, F. U.; Thaut, M.

**Coating technology for the deposition of structurable chromium films with reduced reflection**

SPIE Optical Systems Design 2011, Advances in Optical Thin Films IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France

Jourlin, Y.; Veillas, C.; Tonchev, S.; Sauvage-Vincent, J.; Zeitner, U.D.; Parriaux, O.

**Grating phase-mask lithography for subwavelength radial polarizer fabrication**

World of Photonics 2011, EOSMOC 2011 – 2<sup>nd</sup> EOS Conference on Manufacturing of Optical Components, 22.–26.5.2011, Munich, Germany

Kalkowski, G.; Risse, S.; Rothhardt, C.; Rohde, M.; Eberhardt, R.

**Optical contacting of low-expansion materials**

SPIE Optics + Photonics 2011, Optical Manufacturing and Testing IX, 21.–25.8.2011, San Diego, CA, USA

SPIE Proceedings Vol. 8126 (2011) 81261F, ISBN 9780819487360

Kaster, J.; Pupeza, I.; Eidam, T.; Jocher, C.; Fill, E.; Limpert, J.; Holzwarth, R.; Bernhardt, B.; Udem, T.; Hänsch, T.W.; Tünnermann, A.; Krausz, F.

**High power enhancement cavities for generation of XUV and X-Ray radiation of high brilliance**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CG\_P8

Kaster, J. M.; Pupeza, I.; Eidam, T.; Jocher, C.; Fill, E.; Limpert, J.; Holzwarth, R.; Bernhardt, B.; Udem, T.; Hänsch, T. W.; Tünnermann, A.; Krausz, F.

**Towards MW average powers in ultrafast high-repetition-rate enhancement cavities**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) HFB4

Keil, R.; Dreisow, F.; Heinrich, M.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Szameit, A.

**Classical characterization of correlated biphotons in waveguide lattices**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) EA8\_5

Klenke, A.; Seise, E.; Bretkopf, S.; Tünnermann, A.; Limpert, J.

**Fiber laser CPA system delivering 120 µj femtosecond pulses using coherent combining**

Proceedings CLEO 2011 – Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CFE4

Klenke, A.; Seise, E.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Basic considerations on coherent combining of ultrafast CPA amplifiers**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CJ\_P18

Koller, D.; Walchshäusl, L.; Eggers, G.; Neudel, F.; Kursawe, U.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Ramm, R.; Bräuer-Burchardt, C.; Notni, G.; Kafka, R.; Neubert, R.; Seibert, H.; Castro-Neves, M.; Nouak, A.

**3D capturing of fingerprints – On the way to a contact less certified sensor**

Proceedings BIOSIG 2011, Biometrics and Security, 8.–9.9.2011, Darmstadt, Germany, p. 33-44, ISBN 978-3-88579-285-7

Krebs, M.; Hädrich, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Fiber laser based high harmonic generation at high repetition rate and average power**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) HWA2

Kühmstedt, P.; Bräuer-Burchardt, C.; Möller, F.; Otto, E.; Schmidt, I.; Notni, G.

**Hand-held 3D sensor for documentation of fossil and archaeological excavations**

SPIE Optical Metrology/Optical Measurement Systems for Industrial Inspection, 23.–26.5.2011, Munich, Germany  
SPIE Proceedings, Vol. 8084 (2011) 80840U, ISBN 9780819486806

Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Schmidt, I.; Bräuer-Burchardt, C.; Breitbarth, A.; Notni, G.

**Entwicklung eines handgeführten 3D-Farbscanners**

10. Oldenburger 3D-Tage, 2.–3.2.2011, Oldenburg, Deutschland  
Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011 S. 199-204, ISBN 978-3-87907-506-5

Lange, N.; Wippermann, F.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Nutzung UV aushärtender Polymere zum Aufbau elektrostatischer Aktuatorik**

Proceedings 4. VDE/VDI Mikrosystemtechnik-Kongress 2011, 10.–12.10.2011, Darmstadt, Deutschland, S. 689-692, ISBN 978-3-8007-3367-5

Lange, N.; Wippermann, F.; Leitl, R.; Bruchmann, C.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Erste Ergebnisse elektrostatischer Aktuatorik auf Basis UV-aushärtender Polymere**

Proceedings 3. GMM Workshop Mikro-Nano-Integration, 3.–4.3.2011, Stuttgart, Deutschland, 453334007, ISBN 978-3-8007-3334-7

Lange, N.; Wippermann, F.; Leitl, R.; Bruchmann, C.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**First results on electrostatic polymer actuators based on UV-replication**

SPIE Photonics West, 22.–26.1.2011, San Francisco, CA, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7926 (2011) 792609, ISBN 9780819484635

Lecaplain, C.; Ortaç, B.; Machinet, G.; Bouillet, J.; Baumgartl, M.; Schreiber, T.; Cormier, E.; Hideur, A.

**Properties of a microjoule-class fiber oscillator mode-locked with a SESAM**

World of Photonics 2011, The European Conference on Lasers and Electro-Optics – European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe – EQEC), 22.–26.5.2011, Munich, Germany

Leitel, R.; Dannberg, P.; Brückner, A.; Bräuer, A.

**Recent developments in wafer-level fabrication of micro-optical multi-aperture imaging systems**

SPIE Optical Systems Design 2011, Optical Design and Engineering IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France

SPIE Proceedings Vol. 8167 (2011) 81670P, ISBN 9780819487933

Li, C.; Schreiber, P.; Walkling, A.; Schierz, C.; Schwede, M.; Gühne, V.

**Freeform reflector design for LED street lighting**

SPIE Optics + Photonics 2011, 11<sup>th</sup> International Conference on Solid State Lighting, 21.–25.8.2011, San Diego, CA, USA

SPIE Proceedings Vol. 8123 (2011) 81230O, ISBN 9780819487339

Ludewigt, K.; Gowin, M.; Ten Have, E.; Jung, M.; Wirth, C.; Schmidt, O.; Tsybin, I.; Schreiber, T.; Eberhardt, R.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High brightness spectral beam combining to 8.2 kW**

SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 791401, ISBN 9780819484512

Maenz, S.; Irmeler, I.; Ramm, R.; Kamradt, T.; Kühmstedt, P.; Jandt, K.D.; Bossert, J.

**Quantification of bone parameters in experimental murine arthritis by micro-computed tomography – a preliminary study**

3D Microstructure Meeting, 2.–4.11.2011, Saarbrücken, Germany

Mauroner, O.; Helm, R.

**Keep close ties or cut the painter? The role of cooperation strategies between spin-offs and their parents**

9<sup>th</sup> Interdisciplinary European Conference on Entrepreneurship Research (IECER), 16.–18.2.2011, Munich, Germany

Mauroner, O.; Helm, R.

**Personality structure of information multipliers in online and offline contexts: increase due to online communication?**

Scientific Workshop on E-Commerce in China, Chinesisch-Deutsches Hochschulkolleg, 13.–15.3.2011, Shanghai, China

Mauroner, O.; Helm, R.; Dowling, M.

**Entrepreneurial spin-offs from R&D institutes – Empirical study on success factors**

First Conference on Entrepreneurship and new venture creation, International Consortium for Entrepreneurship Research (ICER), 8.–10.12.2011, Bangalore, India

Meyer, J.; Brückner, A.; Leitel, R.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.

**Ultra-compact imaging system based on multi-aperture architecture**

SPIE Proceedings Vol. 7930 (2011) 79300C, ISBN 9780819484673

Michaelis, D.; Oliva, M.; Benkenstein, T.; Harzendorf, T.; Matthes, A.; Zeitner, U.

**Nano-optical gratings for integrated laser interferometer arrays**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CK5\_3

Michaelis, D.; Schreiber, P.; Li, C.; Bräuer, A.

**Construction of freeforms in illumination systems via generalized Cartesian oval representation**

SPIE Optics + Photonics 2011, Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration VIII, 21.–25.8.2011, San Diego, CA, USA

SPIE Proceedings Vol. 8124 (2011) 812403, ISBN 9780819487346

Minardi, S.; Eilenberger, F.; Kartashov, Y.; Szameit, A.; Röpke, U.; Kobelke, J.; Schuster, K.; Bartelt, H.; Torner, L.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.; Pertsch, T.

**Dynamics of light bullets in two-dimensional arrays of waveguides**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CD5\_5

Munkelt, C.; Kühmstedt, P.; Denzler, J.; Notni, G.

**Ansichtenplanung zur 3-D Rekonstruktion unter Berücksichtigung von Vollständigkeit und Messunsicherheit**

112. Tagung der DGaO, 14.–18.6.2011, Ilmenau, Deutschland

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

**Interface-engineered multilayer mirrors with enhanced reflectivity**

SPIE Optical Systems Design 2011, Advances in Optical Thin Films IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France

Nodop, D.; Jauregui, C.; Jansen, F.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Inhibition of stimulated Raman scattering using long period gratings in double clad fiber amplifiers**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) AMB8

Nodop, D.; Schimpf, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**SBS suppression in high power fiber pulse amplifiers employing a superluminescence diode as seed source**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CJ7\_6

Nolte, S.; Thomas, J.; Voigtländer, C.; Becker, R.G.; Richter, D.; Tünnermann, A.

**Femtosecond laser induced fiber Bragg gratings in active and multi mode fibers**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CJ10\_1

Notni, G.

**3D-measurement within short cycle time**

10. SpectroNet Collaboration Forum, 20.4.2011, Jena, Germany



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

**Correcting distortion and braiding of micro-images from multi-aperture imaging systems**

SPIE Proceedings Vol. 7875 (2011) 78750B, ISBN 9780819484123

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

**Image Fusion for Multi-Aperture Cameras**

ICCP 2011, 8.–10.4.2011, Pittsburgh, USA

Pabst, O.; Perelaer, J.; Beckert, E.; Schubert, U.S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**All Inkjet-Printed Electroactive Polymer Actuators for Active Microoptical and Polytronic Systems**

Proceedings Large-area Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C) 2011, 28.–30.6.2011, Frankfurt a.M., Germany, S. 139–142, ISBN 978-3-00-034957-7

Pabst, O.; Perelaer, J.; Beckert, E.; Schubert, U.S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Erzeugung von elektroaktiven Polymeraktoren mittels Inkjet Drop-on-Demand zur Anwendung in mikrofluidischen Systemen**

Proceedings 4. VDE/VDI Mikrosystemtechnik-Kongress 2011, 10.–12.10.2011, Darmstadt, Deutschland, S. 281–284, ISBN 978-3-8007-3367-5

Pabst, O.; Perelaer, J.; Beckert, E.; Schubert, U.S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Inkjet Printing of Electroactive Polymer Actuators on Polymer Substrates**

SPIE Smart Structures/NDE, 6.–10.3.2011, San Diego, CA, USA  
SPE Proceedings Vol. 7976 (2011) 79762H, ISBN 9780819485380

Pabst, O.; Perelaer, J.; Hornaff, M.; Beckert, E.; Becker, H.; Schubert, U.S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Inkjet-Druck und Niedertemperatur-Sintern von Ag-Nanopartikelintinten auf Polymer substraten**

Proceedings 3. GMM Workshop Mikro-Nano-Integration, 3.–4.3.2011, Stuttgart, Deutschland, 453334016, ISBN 978-3-8007-3334-7

Pabst, O.; Schiffer, M.; Obermeier, E.; Tekin, T.; Lang, K.D.; Ngo, H.-D.

**Measurement of Young's modulus and residual stress of thin SiC layers for MEMS high temperature applications**

SPIE Proceedings Vol. 8066 (2011) 806608, ISBN 9780819486554

Pauer, H.; Perske, M.; Yulin, S.; Trost, M.; Duparré, A.; Feigl, T.; Kaiser, N.

**EUV-Kollektorspiegel für Hochleistungs-laserplasmaquellen**

V2011, Industrieausstellung & Workshop-Woche, Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik, 17.–20.10.2011, Dresden, Deutschland

Perske, M.; Pauer, H.; Yulin, S.; Trost, M.; Schröder, S.; Duparré, A.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.

**Multilayer coating for EUV collector mirrors**

2011 International Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources, 7.–9.11.2011, Dublin, Ireland

Peschel, T.

**Finite-Element-Untersuchungen zur Modellierung von Tastschnittmessungen**

263. PTB-Seminar, Fertigungsmittel für Mikrosysteme-Ermittlung von Materialeinflüssen auf die Messunsicherheit in der optischen und taktilen dimensionellen Messtechnik, Workshop Normprojekt DIN 32567, 17.11.2011, Braunschweig, Deutschland

Präfke, C.; Schulz, U.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.

**Vacuum-deposited UV-protective coatings for bisphenol-A-polycarbonate**

5<sup>th</sup> European Weathering Symposium (EWS), 21.–23.9.2011, Lisbon, Portugal  
Proceeding 5<sup>th</sup> EWS – Natural and Artificial Aging of Polymers, CEEES Publication No. 15, 2011, S. 471–479, ISBN 978-3-9813136-2-8

Pshenay-Severin, E.; Chipouline, A.; Petschulat, J.; Hübner, U.; Eilenberger, F.; Setzpfandt, F.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.

**Magnetic properties of asymmetric double-wire structures**

Proceedings CLEO 2011 – Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) QTuD7

Pupeza, I.; Eidam, T.; Kaster, J.; Bernhardt, B.; Rauschenberger, J.; Ozawa, A.; Fill, E. F.; Udem, T.; Kling, M.F.; Limpert, J.; Alahmed, Z.A.; Azzeer, A.M.; Tünnermann, A.; Hänsch, T.W.; Krausz, F.

**Power scaling of femtosecond enhancement cavities and high-power applications**

SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 791411, ISBN 9780819484512

Pupeza, I.; Kaster, J.; Eidam, T.; Bernhardt, B.; Weitenberg, J.; Holzwarth, R.; Hänsch, T.W.; Udem, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Fill, E.; Krausz, F.

**Progress in Enhancement Cavities for XUV Generation**

Proceedings CLEO 2011: QELS – Fundamental Science, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) QMJ6

Pupeza, I.; Weitenberg, J.; Russbuedt, P.; Eidam, T.; Limpert, J.; Fill, E.; Udem, T.; Hoffmann, H.-D.; Poprawe, R.; Tünnermann, A.; Krausz, F.

**Tailored Transverse Modes in High-Finesse Femtosecond Enhancement Cavities**

Proceedings CLEO 2011: QELS – Fundamental Science, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) QMJ7

Rhein, S.; Schmidt, O.; Zimer, H.; Schreiber, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**High-average power optical demodulation of a fiber amplified phase modulated single-frequency signal**

SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 791430, ISBN 9780819484512

Richter, D.; Voigtländer, C.; Becker, R.G.; Thomas, J.; Tünnermann, A.; Nolte, S.

**Efficient volume Bragg gratings in various transparent materials induced by femtosecond laser pulses**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CM3\_4

Richter, S.; Döring, S.; Peschel, T.; Eberhardt, R.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

**Breaking stress of glass welded with femtosecond laser pulses at high repetition rates**

SPIE Proceedings Vol. 7925 (2011) 79250P, ISBN 9780819484628

Richter, S.; Heinrich, M.; Döring, S.; Tünnermann, A.; Nolte, S.

**Formation process of Femtosecond Laser-induced Nanogratings at High Repetition Rates**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CM1\_5

Riehemann, S.; Palme, M.; Steinkopf, R.; Munzert, P.; Notni, G.; Krieg, J.

**Monolithic optical freeform element for an IR line camera**

SPIE Optical Systems Design 2011, Optical Design and Engineering IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France,

SPIE Proceedings Vol. 8167 (2011) 81670H, ISBN 9780819487933

Riehemann, S.; Palme, M.; Steinkopf, R.; Munzert, P.; Notni, G.; Krieg, J.; Sassenberg, V.

**Monolithisches optisches Freiformelement für eine IR-Detektorzeile**

112. Tagung der DGaO, 14.–18.6.2011, Ilmenau, Deutschland  
DGaO-Proceedings 2011 (2011) P39, ISSN 1614-8436

Risse, S.; Damm, C.; Hornaff, M.; Kamm, A.; Schmidt, I.; Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Döring, H.-J.; Elster, T.; Kirschstein, U.C.

**Precision assembly of a miniaturized wire deflector for electron-beam lithography**

37<sup>th</sup> International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE), 19.–23.9.2011, Berlin, Germany

Risse, S.; Gebhardt, A.; Kolbmüller, A.; Steinkopf, R.; Schürmann, M.; Jobst, J.; Kaiser, N.; Eberhardt, R.

**Ultra-precise optical mirrors with thick amorphous silicon layer**

Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology (EUSPEN), 23.–27.5.2011, Lake Como, Italy, p. 337–340, ISBN 978-0-9553082-9-1

Risse, S.; Scheiding, S.; Gebhardt, A.; Damm, C.; Holota, W.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Development and fabrication of a hyper-spectral, mirror based IR-telescope with ultra-precise manufacturing and mounting techniques for a snap-together system assembly**

SPIE Remote Sensing 2011, 19.–22.9.2011, Prague, Czech Republic  
SPIE Proceedings Vol. 8176 (2011) 81761N, ISBN 9780819488039

Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Demmler, S.; Jocher, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Sub-5 fs pulses with 12 GW peak power from high repetition rate OPCPA**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) JWA3

Rothhardt, J.; Heidt, A.; Hartung, A.; Bartelt, H.; Rohwer, E.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Sub-two cycle pulse generation with all normal dispersion photonic crystal fiber and linear chirp compensation**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CF3\_5

Scheiding, S.

**Snap-In fabrication of a hyper-spectral, all metal mirror based IR-Telescope**

Abbe School of Photonics – Seminar Summer Term, 10.6.2011, Jena, Germany

Scheiding, S.; Risse, S.; Gebhardt, A.; Damm, C.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Freeform mirror fabrication by means of fast tool servo diamond turning**

26<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering (ASPE), 13.–18.11.2011, Denver, Co, USA

Scheiding, S.; Yi, A.Y.; Gebhardt, A.; Li, L.; Risse, S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Free-form manufacturing of a microoptical lens array on a curved substrate**

Proceedings ASPE 2011 Spring Topical Meeting, 6.–8.3.2011, Charlotte, North Carolina, USA, p. 19–23, ISBN 978-1-887706-57-5

Scheiding, S.; Yi, A.Y.; Gebhardt, A.; Loose, R.; Li, L.; Risse, S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**Diamond milling or turning for the fabrication of micro lens arrays: comparing different diamond machining technologies**

SPIE Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics IV, 22.–27.1.2011, San Francisco, CA, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7927 (2011) 79270N, ISBN 9780819484642

Schmidt, C.; Chipouline, A.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.

**Thermal nonlinearity in coupled disk microresonators**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CK9\_1

Schmidt, C.; Liebsch, M.; Chipouline, A.; Janunts, N.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.

**Mapping of Whispering-Gallery-Modes in coupled disk microresonators**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CK8\_2

Schmidt, O.; Wirth, C.; Rhein, S.; Rekas, M.; Klüner, A.; Schreiber, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**697 W 12 pm linewidth of fiber generated and amplified spontaneous emission (ASE) at 1 µm**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CJ7\_1

Schmidt, O.; Wirth, C.; Rhein, S.; Rekas, M.; Klüner, A.; Schreiber, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.

**High power narrow-band ASE as source for beam combining applications**

Proceedings Advanced Solid-State Photonics (ASSP), OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) AMF3

Schreiber, P.

**Micro-optics for slim LED light sources**

World of Photonics 2011, Application Panels – Laser and Photonics in Actual Practice, 22.–26.5.2011, Munich, Germany

Schröder, S.; Herffurth, T.; Duparré, A.

**Impact of surface roughness on scatter losses and the scattering distribution of surfaces and thin film coatings**

SPIE Optical Systems Design 2011, Optical Fabrication, Testing, and Metrology IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France  
 SPIE Proceedings Vol. 8169 (2011) 81690R, ISBN 9780819487957

Schröder, S.; Herffurth, T.; Duparré, A.; Notni, G.

**Mobile compact optical roughness sensor**

Joint International IMEKO TC1+TC7+TC13 Symposium 2011, 31.8.–2.9.2011, Jena, Germany

Schröder, S.; Trost, M.; Feigl, T.; Duparré, A.; Harvey, J.E.

**Efficient specification and characterization of surface roughness for extreme ultra-violet optics**

SPIE Advanced Lithography 2011, 27.2.–4.3.2011, San Jose, CA, USA; SPIE Proceedings Vol. 7969 (2011) 79692C, ISBN 9780819485281

Schulz, U.

**Entspiegelung transparenter Kunststoffe für optische Anwendungen**

VDI Wissensforum Kunststoffe in Optischen Systemen, 8.–9.11.2011, Baden-Baden, Deutschland

Schulz, U.

**Technologien für die Entspiegelung von Kunststoffoptiken**

OTTI Fachforum, 9.–10.11.2011, Regensburg, Deutschland

Schulz, U.; Mändl, H.; Nottebohm, R.; Gödeker, C.; Kaiser, N.

**Antireflective coatings for optical lenses based on plasma-etched melamine**

Society of Vacuum Coaters (SVC) 2011, 16.–21.4.2011, Chicago, USA  
 Technical Conference Proceedings 1991-2011 O-4, ISSN 0737-5921

Schulz, U.; Präfke, C.; Kaiser, N.

**Aufgedampfte organische Schichten für optische Anwendungen**

V2011, Industrieausstellung & Workshop-Woche, Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik, 17.–20.10.2011, Dresden, Deutschland

Schürmann, M.; Jobst, P. J.; Kaiser, N.; Müller, S.; Kolbmüller, A.; Gebhardt, A.; Risse, S.; Eberhardt, R.

**Bearbeitbare Siliziumschichten zur Herstellung ultra-präziser optischer Komponenten**

V2011, Industrieausstellung & Workshop-Woche, Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik, 17.–20.10.2011, Dresden, Deutschland

Schürmann, M.; Jobst, P.J.; Kaiser, N.; Müller, S.; Kolbmüller, A.; Gebhardt, A.; Risse, S.; Eberhardt, R.

**Machinable thick silicon coatings for the manufacture of ultra-precise optical components**

SPIE Optical Systems Design 2011, Advances in Optical Thin Films IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France

Schürmann, M.; Yulin, S.; Nesterenko, V.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Tkachenko, B.; Schürmann, M.C.

**Study on the lifetime of Mo/Si multilayer optics with pulsed EUV-source at the ETS**

SPIE Optics + Optoelectronics 2011, 18.–21.4.2011, Prague, Czech Republic  
 SPIE Proceedings Vol. 8077 (2011) 80770X, ISBN 9780819486677

Seise, E.; Klenke, A.; Breitkopf, S.; Plötner, M.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**120 µJ Pulses from Coherently Coupled Femtosecond Fiber Laser Systems**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) AMC1

Seise, E.; Klenke, A.; Breitkopf, S.; Plötner, M.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Coherent combining of ultrashort fiber-amplified laser pulses**

SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 79141D, ISBN 9780819484512

Seise, E.; Klenke, A.; Breitkopf, S.; Plötner, M.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High Energy Coherently Combined Femtosecond Fiber CPA System**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CJ9\_3

Sieler, M.; Schreiber, P.; Dannberg, P.; Höfer, B.; Bräuer, A.

**1300 lumen LED-based super-slim multi-aperture projection display with switchable static image content**

SID-ME Chapter Spring Meeting 2011, 10.–11.3.2011, Seeheim-Jugenheim, Germany

Sieler, M.; Schreiber, P.; Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Ultra-kompakter digitaler Array-Projektor**  
Proceedings 4. VDE/VDI Mikrosystemtechnik-Kongress 2011, 10.–12.10.2011, Darmstadt, Deutschland, S. 126–129, ISBN 978-3-8007-3367-5

Steinkopf, R.; Dick, L.; Kopf, T.; Gebhardt, A.; Risse, S.; Eberhardt, R.

**Data handling and representation of freeform surfaces**

SPIE Optical Systems Design 2011, Optical Fabrication, Testing, and Metrology IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France; SPIE Proceedings Vol. 8169 (2011) 81690X, ISBN 9780819487957

Steinmetz, A.; Nodop, D.; Eidam, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High Pulse Energy Sub-10 ps Pulses from Compressed Passively Q-Switched Laser**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) ATuD5

Steinmetz, A.; Nodop, D.; Martin, A.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Sub-10 picosecond pulses from a fiber-amplified and optically compressed passively Q-switched microchip laser**

SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 791412, ISBN 9780819484512

Stenzel, O.

**Struktur-Eigenschaftsbeziehungen bei PIAD-Schichten**

DPG 2011, 26.–29.3.2011, Regensburg, Deutschland

Stenzel, O.

**Struktur-Eigenschaftsbeziehungen hochwertiger Oxidschichten**

OTTI Fachforum, 9.–10.11.2011, Regensburg, Deutschland

Stenzel, O.; Schürmann, M.; Wilbrandt, S.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.; Mende, M.; Ehlers, H.; Ristau, D.; Bruns, S.; Vergöhl, M.; Riggers, W.; Bischoff, M.; Held, M.

**Optical and mechanical properties of oxide UV coatings, prepared by PVD techniques**

SPIE Optical Systems Design 2011, Advances in Optical Thin Films IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France; SPIE Proceedings Vol. 8168 (2011) 81681W, ISBN 9780819487940

Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Kaiser, N.

**Absolutmessungen von gerichteter Transmission und Reflexion an Festkörperproben in der GPOB unter Nutzung von VN-Einsätzen und Anwendung auf die optische Charakterisierung dünner Festkörperschichten**

Proceedings COSP 2011 Colloquium Optische Spektrometrie, 21.–22.3.2011, Berlin, Deutschland

Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Kaiser, N.

**Optische Charakterisierung dünner Festkörperschichten auf der Basis von Transmissions- und Reflexionsspektren**

COSP 2011 Colloquium Optische Spektrometrie, 21.–22.3.2011, Berlin, Deutschland

Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Kaiser, N.; Schmitz, C.; Turowski, M.; Ristau, D.; Awakowicz, P.; Brinkmann, R.P.; Musch, T.; Rolfes, I.; Steffen, H.; Foest, R.; Ohl, A.; Köhler, T.; Dolgonos, G.; Frauenheim, T.

**Plasma and optical thin film technologies**

SPIE Optical Systems Design 2011, Advances in Optical Thin Films IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France; SPIE Proceedings Vol. 8168 (2011) 81680L, ISBN 9780819487940

Stutzki, F.; Jansen, F.; Eidam, T.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Robust single-mode high average power very large mode area fiber amplifiers**

Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) AMB11

Stutzki, F.; Jansen, F.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A.

**Dynamic waveguide properties of active fibers under high power operation**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CJ3\_4

Szeghalmi, A.; Arnold, M.; Berger, A.; Schammelt, N.; Fücksel, K.; Knez, M.; Kley, E.-B.; Zahn, D.R.T.; Tünnermann, A.

**Atomic Layer Deposition of Iridium Thin Films and their Application in Gold Electrodeposition**

SPIE Proceedings Vol. 8168 (2011) 81680K, ISBN 9780819487940

Thomas, J.; Hilbert, V.; Geiss, R.; Tünnermann, A.; Nolte, S.

**Femtosecond pulse written quasi phase matching element in x-cut lithium niobate**

Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CD3\_2

Trost, M.; Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.

**Light scattering from surfaces and multilayers: Measurement and modeling using vector perturbation theories**

29<sup>th</sup> PIERS 2011 (Progress In Electromagnetic Research Symposium), 20.–23.3.2011, Marrakesh, Morocco

Trost, M.; Schröder, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Tünnermann, A.

**Roughness characterization of large EUV mirror optics by laser light scattering**

SPIE Optical Systems Design 2011, Optical Fabrication, Testing, and Metrology IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France; SPIE Proceedings Vol. 8169 (2011) 81690P, ISBN 9780819487957

Tünnermann, A.

**Energy efficient solid state laser concepts**

World of Photonics 2011, EOSMOC 2011 – 2<sup>nd</sup> EOS Conference on Manufacturing of Optical Components, 22.–26.5.2011, Munich, Germany

- Tünnermann, A.  
**Green Photonics – Optiklösungen aus Thüringen**  
 LASER World of Photonics 2011, Eröffnung Innovationscluster “Green Photonics”, 22.–26.5.2011, München, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Green Photonics: Optische Lösungen für Energieeffizienz und Ressourcenschonung in Produktion, Beleuchtungs- und Solartechnik**  
 Fachseminar Highlights in der Optik und Photonik, 15.3.2011, Zürich, Schweiz
- Tünnermann, A.  
**Green Photonics: sustainable solutions for the future**  
 Symposium “Optical Valley”, 9.11.2011, Seoul, Korea
- Tünnermann, A.  
**Green Photonics: the bright future of lighting**  
 Zukunftskonferenz Green Photonics & CoOP-TICS Jahrestagung 2011, 18.–19.10.2011, Jena, Germany
- Tünnermann, A.  
**High power fiber lasers: status and prospects**  
 Jenoptik Customer Day, 1.7.2011, Jena, Germany
- Tünnermann, A.  
**High Power solid state lasers: status and prospects**  
 LASER World of Photonics 2011, Application Panel “Solid state lighting”, 22.–26.5.2011, Munich, Germany
- Tünnermann, A.  
**High power solid state lasers: status and prospects**  
 European Automotive Laser Applications 2011, 9.2.2011, Bad Nauheim, Germany
- Tünnermann, A.  
**Neue optische Materialeigenschaften auf Basis von Mikro- und Nanostrukturen**  
 Thüringer Werkstofftag, 30.3.2011, Jena, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Optics and MedTech cluster Jena: sustainable solutions for the future**  
 7<sup>th</sup> Japanese-German Industry Forum 2011, 15.11.2011, Tokio, Japan
- Tünnermann, A.  
**Prospects and challenges in high power fiber laser technology**  
 OSA Advanced Photonics Congress, 13.–14.6.2011, Toronto, Canada
- Tünnermann, A.  
**Prospects and challenges in high power fiber lasers**  
 1<sup>st</sup> International conference in frontiers of laser processing ICFL, 13.7.2011, Changchun, China
- Tünnermann, A.  
**Prospects and challenges in high power fiber lasers**  
 International Workshop on Fiber Lasers, Sensors and Materials, 27.–29.7.2011, Reichenschwand, Germany
- Tünnermann, A.  
**Small lenses go big – trends in mobile imaging**  
 LASER World of Photonics 2011, Analystenkonferenz Spectaris, 22.–26.5.2011, Munich, Germany
- Tünnermann, A.  
**Solutions with light – made in Thuringia**  
 SPIE Photonics West, Thuringia’s reception, 22.–26.1.2011, San Francisco, CA, USA
- Tünnermann, A.  
**Status und Perspektiven in Laserentwicklung und Applikation**  
 Physikalisches Kolloquium IPMS, 11.1.2011, Dresden, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Trends in mobile imaging – small lenses go big**  
 1<sup>st</sup> EOS Topical Meeting on Micro- and Nano-Optoelectronic Systems, 7.–9.12.2011, Bremen, Germany
- Tünnermann, A.  
**Trends in mobile imaging – small lenses go big**  
 37<sup>th</sup> International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE), 19.–23.9.2011, Berlin, Germany
- Tünnermann, A.; Limpert, J.  
**Prospects and challenges in high power fiber laser technology**  
 Proceedings Specialty Optical Fibers (SOF), OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) SOMA1
- Vogler, U.; Bich, A.; Voelkel, R.; Stürzebecher, L.; Zeitner, U.D.; Hornung, M.  
**Mask aligner process enhancement by spatial filtering**  
 SPIE Optical Systems Design 2011, Illumination Optics II, 5.–8.9.2011, Marseille, France; SPIE Proceedings Vol. 8170 (2011) 81700E, ISBN 9780819487964
- Voigtländer, C.; Zeil, P.; Thomas, J.; Ams, M.; Williams, R.J.; Withford, M.J.; Tünnermann, A.; Nolte, S.  
**Fs laser induced apodised Bragg waveguides in fused silica**  
 SPIE Proceedings Vol. 7925 (2011) 79250Y, ISBN 9780819484628
- Wächter, C.; Michaelis, D.; Flämmich, M.; Danz, N.; Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Micro-optical beam-shaping concept for tailored light-emission patterns from OLEDs**  
 SPIE Optics + Photonics 2011, Organic Light Emitting Materials and Devices XV, 21.–25.8.2011, San Diego, CA, USA

Walter, I.; Zeh, T.; Helbert, J.; Hiesinger, H.; Gebhardt, A.; Hirsch, H.; Knollenberg, J.; Kessler, E.; Rataj, M.; Habermeier, J.; Peter, G.  
**Deep space instrument design for thermal infrared imaging with MERTIS**  
SPIE Optics + Photonics 2011, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XIX, 21.–25.8.2011, San Diego, CA, USA  
SPIE Proceedings Vol. 8154 (2011) 81540Y, ISBN 9780819487643

Weber, T.; Käsebier, T.; Szeghalmi, A.; Knez, M.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.  
**High aspect ratio iridium wire grid polarizer for UV applications**  
World of Photonics 2011, EOSMOC 2011 – 2<sup>nd</sup> EOS Conference on Manufacturing of Optical Components, 22.–26.5.2011, Munich, Germany

Wilke, M.; Wippermann, F.; Zoschke, K.; Toepper, M.; Ehrmann, O.; Reichl, H.; Lang, K.-D.  
**Prospects and limits in wafer-level-packaging of image sensors**  
Proceedings 61<sup>st</sup> Electronic Components and Technology Conference (ECTC) (2011) p. 1901–1907, ISBN 978-1-61284-497-8

Williams, R.J.; Voigtländer, C.; Steel, M.J.; Marshall, G.D.; Tünnermann, A.; Nolte, S.; Withford, M.J.  
**Apodized point-by-point fiber Bragg gratings**  
Proceedings CLEO/Europe – EQEC 2011, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CM4\_1

Willis, C.; Bradford, J.D.; Sims, R.A.; Shah, L.; Richardson, M.; Thomas, J.; Becker, R.G.; Voigtländer, C.; Tünnermann, A.; Nolte, S.  
**All-fiber single-mode PM thulium fiber lasers using femtosecond laser written fiber Bragg gratings**  
SPIE Proceedings Vol. 7914 (2011) 79140I, ISBN 9780819484512

Willis, C.C.; Bradford, J.; Sims, R.; Shah, L.; Richardson, M.; Thomas, J.; Becker, R.; Voigtländer, C.; Tünnermann, A.; Nolte, S.  
**Monolithic polarization maintaining thulium fiber laser using high and low reflectivity FBGs**  
Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 13.–16.2.2011, Istanbul, Turkey, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) AMB10

Willis, C.C.; Bradford, J.D.; Sims, R.A.; Shah, L.; Richardson, M.; Thomas, J.; Becker, R.G.; Voigtländer, C.; Tünnermann, A.; Nolte, S.  
**Monolithic narrow linewidth polarization-maintaining thulium fiber laser using femtosecond laser written fiber Bragg gratings**  
SPIE Proceedings Vol. 8039 (2011) 80390H, ISBN 9780819486134

Wippermann, F.C.; Reimann, A.; Leibel, G.  
**Endurance analysis of optical master stamps for UV-replication**  
SPIE Proceedings Vol. 7926 (2011) 792603, ISBN 9780819484635

Wirth, C.; Schmidt, O.; Schreiber, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**High power tandem pumped photonic crystal fiber amplifier**  
Proceedings CLEO 2011 – Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (Optical Society of America 2011) (2011) CThU7

Yulin, S.; Nesterenko, V.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**Development of EUV/X-Ray multilayer optics in IOF**  
262. PTB-Seminar on EUV Metrology, 27.–28.10.2011, Berlin, Germany

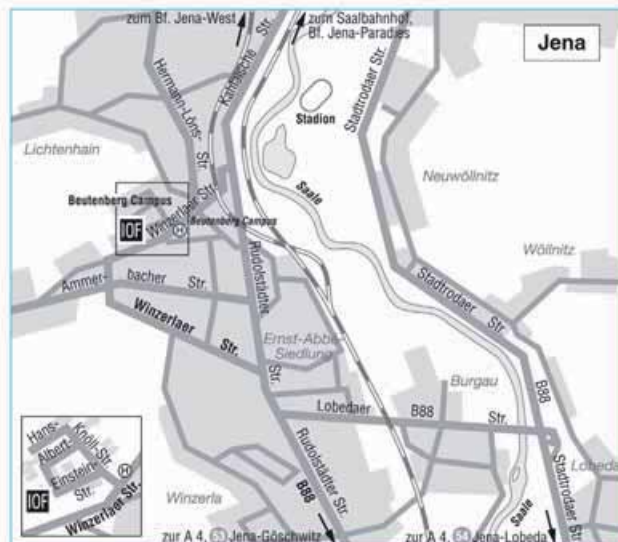
Yulin, S.; Nesterenko, V.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**Reflective mirrors for next generation lithography**  
2011 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, 17.–19.10.2011, Miami, Florida, USA

Yulin, S.; Schürmann, M.; Nesterenko, V.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Schürmann, M.C.; Tkachenko, B.; Hill, S.B.; Faradzhev, N.S.; Richter, L.J.; Lucatorto, T.B.  
**Lifetime of EUV optics under pulsed source**  
SPIE Advanced Lithography 2011, 27.2.–4.3.2011, San Jose, CA, USA

Zwick, S.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Phase-shifting fringe projection system using freeform optics**  
SPIE Optical Systems Design 2011, Optical Design and Engineering IV, 5.–8.9.2011, Marseille, France  
SPIE Proceedings Vol. 8169 (2011) 81690W, ISBN 9780819487957



# DER WEG ZU UNS HOW TO REACH US



## Bahn/Busverbindung

(ca. 20 Minuten inkl. Gehweg)

Ab Bahnhof Jena-Paradies (Nord-Südverbindung)  
ca. 5 Minuten Fußweg in die Innenstadt. An der Haltestelle  
»Teichgraben« die Linien 11, 12 oder 13 nehmen.

An der Haltestelle »Beutenberg Campus«  
aussteigen und der Ausschilderung folgen.

Ab Bahnhof Jena-West (Ost-Westverbindung)  
ca. 1 Minute zur Haltestelle »Westbahnhofstr.«,  
dann die gleichen Busverbindungen nutzen.

## Auto

Autobahn A4 bis Abfahrt Jena-Göschwitz. Auf der  
Bundesstraße B88 stadteinwärts, links in Richtung Winzerla,  
entlang der Winzerlaer Straße immer der Ausschilderung  
»Fachhochschule – Beutenberg Campus« folgen.

Auf der linken Seite liegt dann sichtbar das Fraunhofer  
IOF. Benutzen Sie die Einfahrt Beutenberg Campus,  
von dort aus folgen Sie der Ausschilderung.

## 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

(app. 20 minutes with footpath)

If you take the route from north to south you  
will arrive at the station Jena-Paradies.

Please go to the bus stop on "Teichgraben" (5 minutes  
into the city) and take the Number 11, 12 or 13.  
Step off the bus at "Beutenberg Campus" and  
follow the direction sign to Fraunhofer IOF.

If you take the route from west to east, leave the train  
at the station Jena-West. After the bridge on the right  
hand you will see the bus stop "Westbahnhofstr.". Use the same lines to Beutenberg Campus.

## By car

Leave the A4 motorway at the exit Jena-Göschwitz,  
follow the federal highway B88 into town, turn off left  
toward Winzerla, along Winzerlaer road always the direction  
sign "Fachhochschule – Beutenberg Campus". On the  
left side you will see the Fraunhofer IOF. Use the gateway  
Beutenberg Campus and follow the direction sign.

## 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. Oliver Mauroner  
Dr. Stefan Riehemann  
Dipl.-Ing. Sylvia Bathke

### Redaktion | Editorial deadline

01.03.2012

### Gestaltung | Graphic design

Schneider Media GmbH  
Dittelstedter Grenze 3  
99099 Erfurt  
www.schneidermedia.de

### Druck | Print

Druckhaus Gera GmbH  
Jacob-A.-Morand-Straße 16  
07552 Gera  
www.druckhaus-gera.de

### Bildnachweis | Photo Acknowledgements

- Seite | page 22  
© Fraunhofer IOF/Thomas Ernsting.  
© Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie  
Tübingen/Jürgen Berger.  
© Fraunhofer IOF/Jan-Peter Kasper.  
© Fraunhofer IOF/Jan-Peter Kasper.
- Seite | page 26  
Rechts: © Fraunhofer IOF/Andreas Liem.
- Seite | page 28  
Links: © TLZ/Peter Michaelis, rechts: © Fraunhofer.
- Seite | page 32  
Rechts: Copyright © 2010 RapidEye AG. All rights reserved.
- Seite | page 64  
Rechts: © Fraunhofer IOF/Thomas Ernsting.
- Seite | page 86  
Links: © Fraunhofer IOF/Thomas Ernsting.
- Seite | page 98  
Rechts: © Fraunhofer IOF/Thomas Ernsting.
- Seite | page 114  
© UrbanDreams/Mathias Moxter.
- Seite | page 119  
Links: © Fraunhofer IOF/Thomas Ernsting,  
rechts: © Fraunhofer FEP.
- Seite | page 120  
Links: © Fraunhofer ILT, rechts: © Fraunhofer IST.
- Seite | page 121  
Links: © Fraunhofer IPM, rechts: © Fraunhofer IWS.

