



**Fraunhofer**

**IOF**

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE OPTIK UND FEINMECHANIK IOF

**JAHRESBERICHT  
ANNUAL REPORT**

**2009**



**GREEN PHOTONICS ...**

**... LÖSUNGEN MIT LICHT**

**JAHRESBERICHT  
ANNUAL REPORT  
2009**



Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und das Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität FSU-IAP entwickeln innovative optische Systeme und Verfahren für die Zukunftsfelder Energie, Umwelt, Information, Gesundheit und Sicherheit. Die Institute leisten damit direkte Beiträge zur Sicherung der Zukunftsfähigkeit der modernen Gesellschaft. Dabei gewinnt das Themenfeld »Green Photonics« als übergreifender inhaltlicher Schwerpunkt an beiden Instituten immer mehr an Bedeutung. Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Leiter des Fraunhofer IOF, beschreibt das außerordentliche Potenzial dieser »grünen« optischen Technologien.

**Herr Tünnermann, obwohl der Begriff erst kürzlich geprägt wurde, war die Resonanz auf das Fraunhofer-Forum zum Thema »Green Photonics« im Mai 2009 bereits überwältigend. Was genau verbirgt sich dahinter?**

**Prof. Tünnermann:** Unter »Green Photonics« fasst man die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von Licht zum Schutz der Umwelt zusammen. Dazu gehören optische und optoelektronische Technologien, die Energie einsparen, die Emission von Treibhausgasen reduzieren, Umweltverschmutzung vermeiden oder zu einer umweltverträglichen und nachhaltigen Produktion beitragen. Als Schlüsseltechnologie und Wegbereiter kann die Optik/Photonik entscheidend dazu beitragen, die Vielzahl von Herausforderungen zu lösen, vor denen die Menschheit heute steht. Nicht umsonst sprechen Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft vom 21. Jahrhundert als dem Jahrhundert des Lichts. Zur Lösung dieser dringenden Zukunftsfragen sind jedoch nachhaltige Prozesse und Produkte unabdingbar, wie auch die Politik mittlerweile unterstreicht. Hier bietet der Einsatz von ressourcen- und umweltschonenden, also »grünen« optischen Technologien enorme Potenziale.

The Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF and the Institute of Applied Physics at the Friedrich Schiller University FSU-IAP develop innovative optical systems and processes for the cutting-edge fields of energy, environment, information, health, and safety. The institutes thus make direct contributions to ensuring the sustainability of modern society. The field of "Green Photonics", as an overarching thematic focus, is consequently growing in significance at both institutes. Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Director of the Fraunhofer IOF, describes the exceptional potential of these "green" optical technologies.

**Mr. Tünnermann, although the term was only recently coined, the response to the Fraunhofer Forum on the subject of "Green Photonics" in May 2009 was phenomenal. What lies behind it exactly?**

**Prof. Tünnermann:** The term "Green Photonics" brings together the various application possibilities of light for protecting the environment. These include optical and optoelectronic technologies which save energy, reduce emissions from greenhouse gases, avoid polluting the environment, or contribute to environmentally compatible and sustainable production. As a key technology and enabler, optics/photonics can vitally contribute to solving the multitude of challenges humanity faces today. Not for nothing do representatives from science and business speak of the 21st century as the century of light. However, sustainable processes and products are essential to solving these pressing future issues, as the political world is now also stressing. In this regard, the use of resource and environmentally friendly, i.e. "green" optical technologies holds enormous potential, ranging from efficient lasers via optical metrology and sensor technology to power-saving lighting and

# GREEN PHOTONICS

INSTITUTSLEITER PROF. ANDREAS TÜNNERMANN IM INTERVIEW  
DIRECTOR PROF. ANDREAS TÜNNERMANN AT INTERVIEW

Das reicht von effizienten Lasern über die optische Messtechnik und Sensorik bis hin zu stromsparender Beleuchtung und effektiver CO<sub>2</sub>-neutraler Energiegewinnung. Nicht zuletzt sind diese Technologien auch mit erheblichen Wachstumsoptionen verbunden, weshalb die Initiative »Photonik 2020«, die in ihrem im Juni 2009 veröffentlichten Memorandum den Rahmen für die Strategieentwicklung der Optikindustrie in den nächsten zehn Jahren absteckt, »Green Photonics« als Thema mit Wachstumspotenzial an prominenter Stelle aufführt.

## In welchen Bereichen verspricht der Einsatz von »Green Photonics«-Verfahren wesentliche Vorteile?

**Prof. Tünnermann:** Besonders viel Energie einsparen ließe sich im Bereich Beleuchtung. Weltweit werden heute knapp 20 Prozent des gesamten Strombedarfs für Beleuchtungszwecke eingesetzt. Davon könnten durch effizientere Lichtquellen etwa 50 Prozent eingespart werden, was dem Strombedarf von ganz Westeuropa und damit einem CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 600 Millionen Tonnen entspricht. Bei der ressourcenschonenden Energieerzeugung gewinnen Photovoltaik und Solarthermie immer mehr an Bedeutung. Hier gilt es, durch neue Konzepte und alternative Technologien den Wirkungsgrad weiter zu steigern und gleichzeitig die Kosten zu senken. »Green Photonics« spielt auch bei der Entwicklung nachhaltiger und energieeffizienter Produktionsverfahren eine wichtige Rolle, zum Beispiel beim Laserschweißen oder der Herstellung von Fahrzeugkomponenten in der Automobilindustrie. Der Bereich Information und Kommunikation verbraucht heute zwei bis drei Prozent des Weltenergiebedarfs, und dieser Energieverbrauch steigt aufgrund der rasanten Zunahme des Datenverkehrs um bis zu 20 Prozent pro Jahr an. Auch hier ließen sich mit verbesserten optischen Netzwerken erhebliche Energieeinsparungen realisieren. In der Klimaforschung helfen optische Sensoren in satellitengestützten Erdbeobachtungssystemen, Schadstoffe

effective CO<sub>2</sub>-neutral energy generation. These technologies are not least also linked with considerable growth opportunities, which is why the "Photonics 2020" initiative, which laid out the framework for the strategic development of the optics industry over the next ten years in its memorandum published in June 2009, places "Green Photonics" as a subject with growth potential in a prominent position.

## In what areas can substantial benefits be expected from the use of "Green Photonics" processes?

**Prof. Tünnermann:** A great amount of energy might be saved in the area of lighting. Today, around 20 percent of the total demand for electricity around the world is used for lighting purposes. Around 50 percent of this could be saved by using more efficient light sources, corresponding to the total electricity requirements of Western Europe and a CO<sub>2</sub> equivalent of 600 million tons. In the field of resource-friendly power generation, photovoltaics and solar-thermal energy are increasing in importance. The aim here must be to continue increasing efficiency while simultaneously reducing costs with new concepts and alternative technologies. "Green Photonics" also play an important role in the development of sustainable and energy-efficient production processes, for example in laser welding or the manufacture of vehicle components in the automotive industry. The field of information and communication consumes two to three percent of world energy requirements today, and this power consumption is increasing by up to 20 percent a year in the light of rapidly rising data traffic. Here too, considerable energy savings could be achieved with improved optical networks. In climate research, optical sensors in satellite-aided earth observation systems help in detecting pollutants in the air or sea, early recognition of environmental disasters, and the development of countermeasures.



in der Luft oder im Meer nachzuweisen, Umweltkatastrophen frühzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Einen wesentlichen Beitrag zur Weltgesundheit könnte die Wasseraufbereitung mittels ultravioletten Lichts leisten oder auch die gezielte Beleuchtung von Pflanzen mit dem Ziel, Wachstum und Erträge zu steigern.

**Auf welche Forschungsschwerpunkte konzentrieren sich die Arbeiten an Ihren Instituten?**

**Prof. Tünnermann:** Ein Schwerpunkt im Bereich Energieeinsparung ist die Entwicklung kompakter LED-Lichtquellen in Zusammenarbeit mit der Firma OSRAM Opto Semiconductors – eine Arbeit, für die wir vor zwei Jahren mit dem Deutschen Zukunftspreis ausgezeichnet worden sind. Die gute alte Glühlampe hat eine verheerende Energiebilanz: Nur etwa drei bis fünf Prozent der elektrischen Energie werden in Licht umgewandelt, die restlichen 95 Prozent verpuffen als Wärme. Die Entwicklung hocheffizienter Halbleiterlichtquellen – LEDs und OLEDs – bietet hier ein enormes Einsparpotenzial. Am Fraunhofer IOF haben wir uns insbesondere mit der Lichtformung beschäftigt. Die speziellen, von uns entwickelten Optiken erlauben es, das von der LED abgestrahlte Licht genau dorthin zu transportieren, wo es für die Anwendung gebraucht wird – sei es für Projektionszwecke oder in der Allgemeinbeleuchtung.

Im Bereich der Energiegewinnung durch Photovoltaik versuchen wir, die Absorption von Licht in Dünnschichtsolarzellen durch geeignetes Photonenmanagement zu erhöhen. Anhand spezieller Nano- und Gitterstrukturen beeinflussen wir die Ausbreitung des Lichts in der photoaktiven Schicht derart, dass eine größere Wechselwirkungslänge entsteht und das Licht von der Solarzelle mit höherer Effizienz absorbiert wird. Auch der Laser bietet interessante Ansätze zur Energieeinsparung und Ressourcenschonung, zum Beispiel bei hochwertigen Fertigungsprozessen. Besonders vielversprechend

Water treatment with ultraviolet light could make an essential contribution to improving global health, as could the targeted illumination of plants, with the goal of increasing growth and yields.

**What areas of research are the focus of work at your institutes?**

**Prof. Tünnermann:** One focal area in the field of energy saving is the development of compact LED light sources in cooperation with OSRAM Opto Semiconductors – work for which we were awarded the German Future Prize two years ago. The good old electric light bulb has a disastrous energy balance: only around three to five percent of the electrical energy is converted into light, the remaining 95 percent evaporates as heat. The development of highly efficient semiconductor light sources – LEDs and OLEDs – offers enormous potential for savings here. At Fraunhofer IOF, we have particularly been concentrating on light shaping. The special optics developed here make it possible for the light emitted by the LED to be transported to precisely where it is required by the application – whether for projection purposes or in general lighting.

In the area of energy generation with photovoltaics, we are trying to increase the absorption of light in thin-film solar cells with suitable photon management. Using special nano and lattice structures, we influence the propagation of light in the photoactive layer such that a larger interaction length arises and the light is absorbed by the solar cell with greater efficiency.

Lasers also offer interesting approaches to saving energy and resources, for example in high-quality manufacturing processes. In this regard, ultra-short-pulse fiber lasers which can be used highly efficiently in micromaterial processing are particularly promising. In 2009, we achieved an average output of 830 watts with one such system, a record in

sind hier ultrakurz-gepulste Faserlaser, die sich sehr effizient in der Mikromaterialbearbeitung einsetzen lassen. 2009 haben wir mit einem solchen System eine Durchschnittsleistung von 830 Watt erreicht, ein Rekord auf dem Gebiet der Femtosekundenlaser. Bohrversuche in verschiedenen Materialien zeigen: Bei der Verwendung solcher ultrakurzer Pulse treten aufgrund der fundamental unterschiedlichen Wechselwirkung zwischen Licht und Materie deutlich weniger thermisch und mechanisch induzierte Schäden auf als beim Einsatz herkömmlicher Laser. Bauteile wie Motorsteuerkomponenten oder Einspritzdüsen lassen sich so erheblich präziser fertigen, was wiederum zu einem deutlich effizienteren Verbrennungsprozess führt.

Zum Themenfeld »Green Photonics« an unseren Instituten gehört auch die Entwicklung von ultrapräzisen Spiegelsystemen für Kamerateleskope, die in Satelliten zur Erdbeobachtung eingesetzt werden. So wurden die Spiegel für die Multispektralkameras des 2008 gestarteten Satellitensystems RapidEye am Fraunhofer IOF entwickelt, und das Nachfolge-Satellitensystem zum derzeitigen EUMETSAT Polar System (EPS) wird ebenfalls mit einer von uns entwickelten Spiegeloptik ausgerüstet sein. Unsere Arbeit erfolgt in enger Kooperation mit zahlreichen Partnern in Wissenschaft und Wirtschaft, denen ich an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit danken möchte.

Mein Dank gilt auch dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, den Thüringer Ministerien für Bildung, Wissenschaft und Kultur sowie Wirtschaft, Arbeit und Technologie, der Deutschen Forschungsgemeinschaft und weiteren Stiftungen und Verbänden für ihre stete Unterstützung. Meinen besonderen Respekt und meine Anerkennung verdienen meine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für ihre hervorragenden Leistungen und ihr Engagement, die es uns erlauben, nicht zuletzt durch unsere Tätigkeiten im Bereich »Green Photonics« die Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft aktiv mit zu gestalten.

the field of femtosecond lasers. Trial drillings in a range of materials show that, as a result of the fundamentally dissimilar interaction of light and matter, considerably less thermal and mechanically-induced damage occurs with the use of these ultra-short pulses than with conventional lasers. Parts such as motor control components or injection nozzles can thus be manufactured with considerably greater precision, in turn leading to a far more efficient combustion process.

The field of "Green Photonics" at our institutes also includes the development of ultra-precise mirror systems for camera telescopes used in satellites for earth observation.

Consequently, the mirrors for the multispectral cameras in the RapidEye satellite system launched in 2008 were developed at Fraunhofer IOF, and the successor satellite system to the current EUMETSAT Polar System (EPS) will also be equipped with mirror optics developed here.

We work in close cooperation with numerous partners in science and business, whom I would here like to thank for their excellent collaboration. My thanks also go to the Federal Ministry of Education and Research, the Thuringia Ministries of Education, Science, and Culture, and Business, Work, and Technology, the German Research Foundation, and further foundations and associations for their unfailing support. I pay special respect and recognition to my employees for their outstanding achievements and commitment, which not least allow us to actively contribute to the sustainability of our society through our work in the area of "Green Photonics".

Interview by Ilka Flegel

Das Gespräch führte Ilka Flegel

# INHALT

<b>Highlights 2009</b> .....	<b>8</b>
<b>Das Institut im Profil</b> .....	<b>14</b>
<b>Das Institut in Zahlen</b> .....	<b>18</b>
<b>Technische Ausstattung</b> .....	<b>20</b>
<b>Kompetenzfelder</b> .....	<b>22</b>
<b>Lösungen mit Licht – Ausgewählte Ergebnisse 2009</b> .....	<b>30</b>
<b>Energie und Umwelt</b> .....	<b>32</b>
LEDs in der Mess- und Prüftechnik .....	34
Rauheitsstrukturen für ressourcensparende Benetzungseigenschaften .....	38
Nanostrukturierte SIS-Solarzellen .....	42
Ultrapräzise Metallspiegel für ein neuartiges rotierendes Teleskop .....	46
Ultrakurzpuls-Laser mit 830 W Durchschnittsleistung .....	50
<b>Information und Sicherheit</b> .....	<b>54</b>
Ultrakompaktes Abbildungssystem erhöhter Lichtstärke .....	56
Ultraflache Array-Projektionsoptik .....	60
Polymerfolien mit Antireflexeigenschaften durch Plasmaätzen – POLAR.....	64
Kollektorspiegel für die EUV-Lithographie .....	68
<b>Gesundheit und Medizintechnik</b> .....	<b>72</b>
Parallele SPR als Nachweisttechnologie für die Biosensorik .....	74
Optischer 3D-Handscanner für patientenindividuelle Atemmasken .....	78
Löten vakuumdichter Fenster für medizintechnische Produkte.....	82
Breitbandige dielektrische Spiegel für medizinische Anwendungen .....	86
<b>Technologie</b> .....	<b>88</b>
Spektrometergitter für die Gaia-Weltraummission .....	90
Mehrfach-Ablenkarrays für die »Multi Shaped Beam Lithography« .....	94
Ultrapräzise asphärische Spiegel mit definierten Referenzstrukturen .....	98
Hochleistungskomponenten für Faserlaser .....	102
Virtuelle Beschichtungsläufe zur Design- und Prozessoptimierung .....	106
<b>Grundlagen</b> .....	<b>108</b>
Jitter-Reduktion in passiv gütegeschalteten Mikrochip-Lasern .....	110
Integrierte Bragg-Reflektoren für Hochleistungs-Faserlaser .....	112
Polarisations-unsensitive optische Metamaterialien.....	116
Computergenerierte Hologramme basierend auf Nanostrukturen.....	120
<b>Das Fraunhofer IOF in Netzwerken</b> .....	<b>124</b>
<b>Namen/Daten/Ereignisse</b> .....	<b>132</b>



# CONTENT

<b>Highlights 2009</b> .....	<b>8</b>
<b>The institute in profile</b> .....	<b>14</b>
<b>The institute in figures</b> .....	<b>18</b>
<b>Technical equipment</b> .....	<b>20</b>
<b>Fields of competence</b> .....	<b>22</b>
<b>Solutions with light – Selected results 2009</b> .....	<b>30</b>
<b>Energy and environment</b> .....	<b>32</b>
LEDs for measurement and testing technology.....	34
Roughness structures for resource-conserving wetting properties.....	38
Nanostructured SIS solar cells.....	42
Ultra-precise metal mirrors for a novel rotary telescope.....	46
Ultra-short pulse laser with 830 W average power.....	50
<b>Information and safety</b> .....	<b>54</b>
Ultra-compact imaging system with increased sensitivity.....	56
Ultra-slim array projection optics.....	60
Plastic web with antireflective properties by plasma etching – POLAR.....	64
Collector mirrors for EUV lithography.....	68
<b>Healthcare and medical engineering</b> .....	<b>72</b>
Parallel SPR-based biosensor technology.....	74
Optical hand-held 3D scanner for individual respiratory masks.....	78
Soldering of hermetically sealed windows for biomedical devices.....	82
Broadband dielectric front-surface mirrors for medical applications.....	86
<b>Technology</b> .....	<b>88</b>
Spectrometer grating for the Gaia space mission.....	90
Multi deflection arrays for “Multi Shaped Beam Lithography”.....	94
Ultra-precise mirror assemblies with well-defined reference structures.....	98
High-power components for fiber lasers.....	102
Computational manufacturing for design- and process optimization.....	106
<b>Fundamentals</b> .....	<b>108</b>
Timing-jitter reduction in passively Q-switched microchip lasers.....	110
Integrated Bragg reflectors for high-power fiber lasers.....	112
Polarization-insensitive optical metamaterials.....	116
Computer-generated holograms based on nanostructures.....	120
<b>The Fraunhofer IOF in networks</b> .....	<b>124</b>
<b>Names, dates, activities</b> .....	<b>132</b>



## FRAUNHOFER-FORUM »GREEN PHOTONICS«

### FRAUNHOFER FORUM "GREEN PHOTONICS"

2009 feierte die Fraunhofer-Gesellschaft ihr 60jähriges Bestehen und zog unter dem Motto »60 Jahre im Auftrag der Zukunft« eine erfolgreiche Bilanz ihrer Entwicklung. Aus diesem Anlass fanden zahlreiche Veranstaltungen statt, sowohl in München, dem Ort der Gründung und dem Sitz der Gesellschaft, als auch an den Standorten der 59 Fraunhofer-Institute.

Das IOF veranstaltete im Fraunhofer-Haus in München am 11. Mai 2009 das Forum »Green Photonics« – Optische Lösungen für die Zukunft. Zahlreiche Gäste aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit sind der Einladung gefolgt. Nach einführenden Präsentationen von Prof. Andreas Tünnermann, der das Thema als zentrales Strategiefeld für die Optik/Photonik in Deutschland sieht, Dr. Kurt Mann, TRUMPF Laser GmbH, und Dr. Stefan Illek, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, diskutierten die Experten im Forum die Zukunftsperspektiven von Optischen Technologien unter den Aspekten energieeffiziente Beleuchtung, Energiegewinnung unter Nutzung von Licht und ressourcenschonende Produktion durch Anwendung innovativer Laserverfahren.

Mit dem Thema »Green Photonics« stellt sich Fraunhofer den Herausforderungen unserer Zeit. Die Investition in Zukunftsthemen und der systematische Ausbau von Schlüsseltechnologien sind Basis der erfolgreichen Entwicklung von Fraunhofer.

Fraunhofer IOF und das Institut für Angewandte Physik der FSU haben sich zum Ziel gesetzt, gemeinsam mit Thüringer Unternehmen der Optik-Branche »Green Photonics« als ein strategisches Feld in Thüringen zu etablieren.

In 2009, the Fraunhofer-Gesellschaft celebrated its 60th birthday and looked back on a successful history with the motto "60 years of dedication to the future". Many events took place in honor of this event, both in Munich, where the Society was founded and is based, and at the locations of the 59 Fraunhofer Institutes.

On May 11, 2009 in the Fraunhofer-Haus in Munich, the IOF hosted the forum "Green Photonics" - optical solutions for the future. Numerous guests from business, science, politics and public life were in attendance. Following introductory presentations from Prof. Andreas Tünnermann, who sees the subject as a pivotal strategic field for optics/photonics in Germany, Dr. Kurt Mann, TRUMPF Laser GmbH and Dr. Stefan Illek, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, the experts discussed the future prospects of optical technologies in the contexts of energy-efficient lighting, energy extraction with the use of light and resource-friendly production with the use of innovative laser processes.

With the subject of "Green Photonics", Fraunhofer is rising to the challenges of our times. Targeted investment in cutting-edge fields and the systematic development of key technologies are the basis of Fraunhofer's successful development.

Together with Thuringian companies in the optics industry, IOF and the Institute of applied Physics of the Friedrich Schiller University have set themselves the goal of establishing "Green Photonics" as a strategic field in Thuringia.



## HIGHLIGHTS 2009

### LASER.WORLD OF PHOTONICS 2009

### LASER. WORLD OF PHOTONICS 2009

Auf der weltweit größten Photonik-Messe 2009 war das Fraunhofer IOF mit neuen Entwicklungen wieder prominent vertreten. Highlights waren u. a. eine ultraflache Projektionsoptik von nur 3 mm Dicke (S. 60), ein Kollektorspiegel für EUV-Laserplasmaquellen für die nächste Generation der Lithographie bei 13,5 nm und die Präsentation eines Streulichtmessverfahrens zur Bestimmung der Oberflächengüte dieser Spiegel (S. 68). Beispiel der herausragenden Expertise des IOF in der Fertigung hochpräziser Metallspiegelsysteme war das Infrarot-Spektrometer MERTIS für die BepiColombo Mission der ESA, die 2014 zum Merkur gestartet werden soll. Ein kompaktes Kurzpulsfaserlasersystem hoher Leistung und Strahlqualität erlaubt die Erschließung neuer Anwendungsbereiche in der industriellen Produktion, der Energietechnik und der Grundlagenforschung. Dank modernster Aufbau- und Verbindungstechniken war es möglich, die im Labor erzielten bahnbrechenden Performance-Weltrekorde in ein industrietaugliches System zu überführen. Die Entwicklung war Basis für die **Ausgründung der Active Fiber Systems GmbH**.

Im Forum der Messe veranstaltete das IOF zwei vielbesuchte **Workshops** für Anwender zu den Themen »Neue Entwicklungen in der Festkörperlasertechnologie« und »Nachhaltige Beleuchtungskonzepte«.

Am 15. Juni wurde das Memorandum »**Photonik 2020**«, zu dessen Initiatoren Prof. Tünnermann gehörte, der Öffentlichkeit präsentiert. Im Memorandum wird die Bedeutung der Photonik als Schlüsseltechnologie und Motor für Innovationen sowie zur Arbeitsplatzsicherung am High-Tech-Standort Deutschland herausgearbeitet.

At the world's largest photonic trade fair in 2009, the Fraunhofer IOF was once again prominently represented with new developments. Highlights included an ultra-slim array projection optics only 3 mm thick (p. 60), a collector mirror for EUV laser plasma sources for next-generation lithography at 13.5 nm and the presentation of a scattered light measuring process to determine the surface quality of these mirrors (p. 68). An example of the IOF's outstanding expertise in manufacturing ultra-precise metal mirror systems was the MERTIS thermal infra-red imaging spectrometer for the ESA's BepiColombo mission due to launch for Mercury in 2014. A compact short pulse fiber laser system of high performance and beam quality opens up new areas of application in industrial production, energy technology and basic research. Thanks to the latest assembly and joining techniques, it was possible to transfer the pioneering performance world records achieved in the laboratory to a system suitable for industrial use. The development was the basis for the formation of the **spin-off company Active Fiber Systems GmbH**.

In the trade fair forum, IOF held two well-attended **workshops** for users on the subjects of "New Developments in Solid-State Laser Technology" and "Sustainable Lighting Concepts".

On June 15, the memorandum "**Photonics 2020**", whose instigators include Prof. Tünnermann, was presented. The memorandum expounds on the importance of photonics as a key technology and motor of innovation, and also the significance of photonics in securing jobs in Germany as a home of high-tech production.



## COOPTICS – COOPERATE IN OPTICS FÖRDERUNG DURCH DEN FREISTAAT

## COOPTICS – COOPERATE IN OPTICS SUBSIDY FROM THE FREE STATE OF THURINGIA

Der Cluster CoOPTICS beteiligte sich 2008 am Spitzencluster-Wettbewerb des BMBF und erreichte hier den Endausscheid. Strategisches Ziel des Clusters ist die Überführung technologischer Spitzenleistungen in Innovationen für die Wachstumsmärkte: Umwelt, Energie, Sicherheit, Mobilität, Lebenswissenschaften und Medizin. Über die unter Führung der Sprecher des Clusters, Prof. Andreas Tünnermann und Dr. Michael Kaschke, Vorstand der Carl Zeiss AG, ausgearbeitete Strategie informierte sich Vize-Kanzler Frank-Walter Steinmeier im August 2009 im IOF.

Die EU-Kommissarin für regionale Entwicklung, Frau Prof. Danuta Hübner, stellte bei ihrem Besuch im IOF im Zusammenhang mit der Vorstellung der Strategie CoOPTICS fest, dass die Optikregion Jena hervorragend im internationalen Wettbewerb positioniert und beispielgebend für die Profilbildung von Regionen in der Europäischen Union ist.

Mit diesem Votum konnten über Programme der EU, des Bundes und des Freistaats Verbundprojekte zwischen Thüringer Forschungseinrichtungen und Unternehmen mit einer Förderungsumme von mehr als 35 Mio € bis zum Jahr 2013 eingeworben werden. Das Fraunhofer IOF ist an sieben Projekten mit einer Zuwendung von über 4 Mio € beteiligt. Die ersten Förderbescheide wurden im Beisein des Thüringer Wirtschaftsministers auf einer Festveranstaltung am 31. März 2009 übergeben.

In 2008, the CoOPTICS cluster participated in BMBF's top cluster competition, reaching the final round. The strategic goal of the cluster is the transfer of top technological achievements in innovation for the growth markets environment, energy, safety, mobility, life sciences and medicine. Federal Vice-Chancellor Frank-Walter Steinmeier acquainted himself with the strategy formulated under the management of the cluster spokesmen, Prof. Andreas Tünnermann and Dr. Michael Kaschke, executive board at Carl Zeiss AG, at the IOF in August 2009.

During her visit to IOF in connection with the presentation of the CoOPTICS strategy document, the EU Commissioner for Regional Development, Prof. Danuta Hübner, declared the optics region Jena to be outstandingly positioned in international competition and a model for improving the profiles of European Union regions.

With this vote of confidence, cooperative projects between research institutions in Thuringia and companies were awarded funding over 35 million euros to 2013 through programs from the EU, the government and the Free State. The Fraunhofer IOF is involved in seven projects with funding of over four million euros. The first confirmations of funding were presented at a ceremonial event on March 31, 2009 in the presence of Thuringia's economics minister.



## ERWEITERUNG DES FRAUNHOFER IOF

## EXPANSION OF THE FRAUNHOFER IOF

Mit dem Spatenstich am 25. Juni 2009 starten die Baumaßnahmen für die Erweiterung des Instituts. Damit werden 2.080 m<sup>2</sup> Büro- und Laborfläche einschließlich Reinraumerweiterung geschaffen. Die Fertigstellung ist für Frühjahr 2011 geplant. Die Bausumme von 15,6 Mio € kommt aus Mitteln des Bundes, des Freistaats Thüringen und der Europäischen Union.

Hochrangige Gäste der Veranstaltung waren der Thüringer Ministerpräsident Dieter Althaus, der Parlamentarische Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung Thomas Rachel, der Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft Prof. Dr. Hans-Jörg Bullinger und der Rektor der Friedrich-Schiller-Universität Jena Prof. Dr. Klaus Dicke.

Das Institut ist in den letzten Jahren personell gewachsen und die Infrastruktur wurde entsprechend der gewachsenen Anforderungen der Forschung ständig erweitert, sodass das Institut räumlich absolut an seine Grenzen kam. »Die Durchführung neuer Forschungsthemen setzt spezielle Laborinfrastruktur voraus und der Ausbau hilft uns, unsere Spitzenstellung als herausragendes Zentrum der Optik und Photonik zu stärken«, so Institutsleiter Andreas Tünnermann.

Ministerpräsident Dieter Althaus betonte: »Der Erfolg des Fraunhofer IOF in Jena zeigt die Bedeutung der Optischen Technologien für den Standort Thüringen und gleichzeitig, dass der Freistaat hervorragende Bedingungen für Innovationen in der Optikindustrie bietet.«

With the groundbreaking ceremony on June 25, 2009, construction work for the expansion of the institute commenced, which will create 2,080 m<sup>2</sup> of office and laboratory space, including enlargement of the clean room. Completed is scheduled for early 2011. The building costs of 15.6 million euros are made up of funds from the government, the Free State of Thuringia and the European Union.

High-ranking guests at the event included Thuringia's Minister President Dieter Althaus, the parliamentary secretary of state in the German federal ministry of education and research Thomas Rachel, the President of the Fraunhofer-Gesellschaft Prof. Dr. Hans-Jörg Bullinger and President of the Friedrich Schiller University Jena Prof. Dr. Klaus Dicke.

Staff numbers have increased at the institute in recent years and the infrastructure has been subject to constant expansion in line with the growing demands on research, with the result that the institute has fully come up against its physical limits. "The investigation of new research themes requires a specific laboratory infrastructure, and the expansion will help us to strengthen our top position as an outstanding center for optics and photonics," says institute director Andreas Tünnermann.

Minister President Dieter Althaus emphasized: "The success of the Fraunhofer IOF in Jena demonstrates the importance of optical technologies for Thuringia as well as the fact that the Free State offers outstanding conditions for innovation in the optics industry."



## ÖFFENTLICHKEITSARBEIT/ NACHWUCHSGEWINNUNG

## PUBLIC RELATIONS/RECRUITING YOUNG TALENTS

### **Lange Nacht der Wissenschaften**

Die 3. Lange Nacht der Wissenschaften am 11. November mobilisierte mehr als 10000 Neugierige, ein Beweis für das starke Interesse an Wissenschaft in der »Stadt der Wissenschaften 2008«. Das IOF verbuchte mit mehr als 2000 Besuchern einen neuen Rekord. Die Plätze im Konferenzsaal reichten zu den vier angebotenen Vorträgen »Was ist Licht«, »LED - Neues Licht aus Chips«, »Neue Aussichten für den Mann im Mond« und »Green Photonics - Zukunft mit Licht« zum Teil nicht aus. Von Jung und Alt stark gefordert waren die Kollegen bei der Präsentation neuer Forschungsergebnisse. Besonderes Interesse fanden miniaturisierte optische Sensoren und Projektoren sowie das 3D-Vermessen von Fußspuren. Ein Highlight war der Fraunhofer-Truck mit vielen interaktiven Exponaten.

### **Schüler und Studenten am IOF**

Erstmals besuchten Schülerinnen und Schüler einer Jenaer Grundschule das IOF. Die Zweit- und Drittklässler waren begeistert dabei, zu erforschen, was es mit Licht und Optik auf sich hat, und in eigenen Experimenten Gesetzmäßigkeiten der Optik zu erkunden.

Auch 2009 besuchten wieder Studenten das IOF und informierten sich über aktuelle Forschungen auf dem Gebiet der Optik. Ein Novum war der Besuch von Studenten der Fachrichtung Industriedesign im Rahmen ihres Projektes »So habe ich das noch nie gesehen«, die unseren Wissenschaftlern aus ganz anderer Sicht mit ihren Fragen zusetzten.

### **Long Night of Science**

The third Long Night of Science on November 11, mobilized over 10,000 curious visitors, proof of the strong interest in science in the "City of Sciences 2008". With more than 2,000 visitors, the IOF registered a new record. At times, there was not enough seating in the conference hall for the four lectures, "What is Light", "LED – New Light from Chips", "New Prospects for the Man in the Moon" and "Green Photonics – A Future with Light". Colleagues were put to the test by young and old alike during the presentation of new research results. The miniaturized optical sensors and projectors and the 3D measurement of footprints attracted particular interest. A highlight was the Fraunhofer truck with many interactive exhibits.

### **School and University Students at the IOF**

For the first time, school students from a Jena elementary school visited the IOF. The second and third graders enjoyed exploring the possibilities of light and optics and finding out about the laws of optics with their own experiments. In 2009, students again visited the IOF and found out about current research in the optics field.

A novelty was the visit by students studying industrial design in the context of their project "I've never seen it like that before," who grilled our scientists with their questions from a very different perspective.



## KONFERENZEN/WORKSHOPS

### CONFERENCES/WORKSHOPS

#### **31st DAGM Symposium Pattern Recognition**

Die 31. Tagung der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung DAGM fand vom 9. bis 11. September 2009 in Jena statt. Tagungsleiter waren Prof. Dr. Joachim Denzler, Inhaber des Lehrstuhls für Digitale Bildverarbeitung an der FSU Jena und Dr. Gunther Notni, Abteilungsleiter im Fraunhofer IOF. 126 Wissenschaftler stellten ihre Arbeiten zu Themen wie Maschinelles Lernen und Mustererkennung, Bildrekonstruktion oder Objekterkennung und -verfolgung vor.

Begleitend zur Tagung fand eine Industrieausstellung statt, auf der die Daimler AG zum Thema Bildverarbeitung im Straßenverkehr neue Fahrerassistenzsysteme vorgestellt hat. Das IOF präsentierte den mobilen 3D-Handscanner, mit dem in kurzen Aufnahmezeiten von 250 ms ein exaktes 3D-Bild eines Objektes erstellt werden kann (siehe S. 78).

#### **Workshop Optische Systeme und Sensoren für den Zukunftsmarkt Gesundheit**

Der vom Applikationszentrum Mikrooptische Systeme amos gemeinsam mit dem OptoNet e.V. organisierte Workshop fand am 2. April im Abbe-Zentrum auf dem Beutenberg Campus statt. 110 Wissenschaftler und Anwender aus der Industrie diskutierten gemeinsam mit Medizinern neue Anwendungsmöglichkeiten mikrooptischer und sensorischer Lösungen in der Medizintechnik. Die Teilnehmer bestätigten, dass der Workshop eine ausgezeichnete Plattform für fruchtbare Diskussionen zwischen Technologen und Medizinern bot.

#### **31st DAGM Symposium Pattern Recognition**

The 31st symposium by the German Association for Pattern Recognition (DAGM) took place from September 9 to 11, 2009 in Jena. The conference leaders were Prof. Dr. Joachim Denzler, holder of the chair for Digital Image Processing at the FSU Jena and Dr. Gunther Notni, head of department at Fraunhofer IOF. 126 scientists presented their work on subjects like machine learning and pattern recognition, image reconstruction and object recognition/tracking.

An industry exhibition accompanied the symposium, at which Daimler AG presented new driver assistance systems in the context of image processing in street traffic. The IOF presented the mobile 3D hand scanner, using which a precise 3D image of an object can be created with short recording times of 250 ms (see p. 78).

#### **Workshop Optical Systems and Sensors for the Future Health Market**

The workshop organized by the amos Application Center Microoptical Systems together with OptoNet e.V. was held on April 2 in the Abbe Center on the Beutenberg Campus. Together with physicians, 110 scientists and users from industry discussed new application possibilities for micro-optic and sensory solutions in medical technology. The participants confirmed that the workshop offered an excellent platform for fruitful discussions between technologists and doctors.

# LÖSUNGEN MIT LICHT

## SOLUTIONS WITH LIGHT

Das Fraunhofer IOF betreibt mit seinen Partnern 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, Umwelt, Information, Gesundheit und Sicherheit. Eine besondere Rolle spielt dabei für das IOF die nachhaltige energieeffiziente Nutzung von Licht – »Green Photonics«.

Zum Erreichen dieser Zielstellungen bildet das IOF die gesamte Prozesskette vom Systemdesign bis zur Fertigung von Prototypen optischer und opto-elektronischer Systeme ab.

Das Kompetenzportfolio umfasst:

- Design und Simulation,
- Mikro- und Nanostrukturtechnik,
- Oberflächen und Schichten,
- Lichtquellen und Laser,
- Montage und Systemintegration,
- Komponenten und Systeme.

Von strategischer Bedeutung ist die enge Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität (IAP) insbesondere in der Erarbeitung des wissenschaftlichen Vorlaufs sowie in der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Together with its partners, the Fraunhofer IOF conducts application oriented research in the field of optical systems engineering on behalf of its clients from industry and of the government.

The objective is to develop innovative optical systems to control light, from its generation to its application in the cutting-edge fields of energy, environment, information, health and safety. In this context, the sustainable energy-efficient use of light – "green photonics" – plays a special role for the IOF. To achieve these goals, the IOF charts the entire process chain, from the system design to the manufacture of prototype optical and opto-electronic systems.

The competence portfolio encompasses:

- design and simulation,
- micro- and nano-structure technology,
- surfaces and coatings,
- light sources and lasers,
- packaging and system integration,
- components and systems.

The close cooperation with the Institute of Applied Physics (IAP) at the Friedrich Schiller University is of particular strategic importance in both covering the scientific lead work and training young scientists.



# DAS INSTITUT IM PROFIL THE INSTITUTE IN PROFILE

Aufbauend auf den bestehenden Kernkompetenzen wurden 2009 gemeinsam mit dem IAP strategisch neue Felder entwickelt. Ein Schwerpunkt betrifft die Qualifizierung neuer Materialien für die Hochleistungsoptik.

Diese Arbeiten werden zum Teil im Rahmen des BMBF-Programms Unternehmen Region, durch Programme des Freistaats Thüringen sowie der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert:

- Diamant-Optik – Förderung im Programm Zentrum für Innovationskompetenz »ultra optics«
- Silizium-Optik – Förderung im Programm WK-Potenzial
- Photonische Nanomaterialien »PhoNa« – Förderung im Programm Spitzenforschung & Innovation
- Photonische Metamaterialien »MeMa« – Förderung im Rahmen der Exzellenzinitiative des Freistaats Thüringen
- Formung von Licht durch Nanostrukturen – Förderung durch die Fraunhofer-Gesellschaft.

Weitere strategische Vorlaufthemen liegen auf dem Gebiet der Hochleistungsfaserlaser.

Das IOF hat 2009 die strategische Partnerschaft mit Einrichtungen anderer Forschungsorganisationen ausgebaut. In Kooperation mit dem 2009 in Jena gegründeten Helmholtz-Institut, zu dessen Direktoren Prof. Tünnermann gehört, werden Hochleistungslaser entwickelt. Mit dem Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg werden Metalloptiken für Anwendungen in Astronomie und Grundlagenforschung untersucht. Gemeinsam mit dem französischen Carnot-Institut CARIA in Rouen werden kostengünstige Femtosekunden-Faserlaser hoher Strahlqualität für Anwendungen in der Industrie und der Medizintechnik entwickelt.

On the basis of the existing core competencies, new fields were strategically developed in 2009 together with the IAP. One area of focus concerns the qualification of new materials for high-performance optics.

This work is partly supported by the BMBF program "Entrepreneurial Regions", programs by the Free State of Thuringia and the Fraunhofer-Gesellschaft:

- Diamond optics - support from the program Center for Innovation Competence "ultra optics"
- Silicon optics - support from the program GC Potential
- Photonic nanomaterials "PhoNa" - support from the program Top Research & Innovation
- Photonic metamaterials "MeMa" - support from the excellence initiative of the Free State of Thuringia
- Light shaping with nanostructures - support from the Fraunhofer-Gesellschaft.

Further strategic lead themes lie in the area of high-performance fiber lasers.

In 2009, the IOF extended its strategic partnership with institutions at other research organizations. High-performance lasers are being developed in cooperation with the Helmholtz Institute, founded in Jena in 2009, and whose directors include Prof. Tünnermann. Together with the Max Planck Institute of Astronomy in Heidelberg, metal optics for use in astronomy and basic research are being investigated. Cost-effective femtosecond fiber lasers with high beam quality are being developed for use in industry and medical engineering with the French Carnot Institute CARIA in Rouen.

# ORGANISATION ORGANIZATION

# KURATORIUM ADVISORY COMMITTEE

 <p><b>Director</b> Prof. Dr. Andreas Tünnermann</p>		 <p><b>Deputy Director</b> Prof. Dr. Norbert Kaiser</p>		<p><b>Assistance</b> Adlin Bruns Susan Oxfart</p>	
 <p><b>Optical Coatings</b> Prof. Dr. Norbert Kaiser</p>		 <p><b>Optical Systems</b> Dr. Gunther Notni</p>		 <p><b>Microoptical Systems</b> Dr. Andreas Bräuer</p>	
 <p><b>Precision Engineering</b> Dr. Ramona Eberhardt</p>		 <p><b>Optical Design</b> Dr. Peter Schreiber</p>		 <p><b>Microassembly</b> Dr. Erik Beckert</p>	
 <p><b>Characterization of Surfaces and Coatings</b> Dr. Angela Duparré</p>		 <p><b>Technology</b> Dr. Peter Dannberg</p>		 <p><b>Precision Systems</b> Dr. Stefan Risse</p>	
 <p><b>Optical Coatings on Plastics</b> Dr. Ulrike Schulz</p>		 <p><b>3D Measurement</b> Dr. Peter Kühmstedt</p>		 <p><b>Simulation and Mechanical Design</b> Dr. Thomas Peschel</p>	
 <p><b>EUV and X-ray Optics</b> Dr. Torsten Feigl</p>		 <p><b>Optical System Development</b> Dr. Stefan Riehemann</p>		 <p><b>CMN-Optics</b> Dr. Uwe Detlef Zeitner</p>	
 <p><b>Intergration</b> Dipl.-Ing. (FH) Bernd Höfer</p>		 <p><b>ultra<sup>®</sup>-optics</b> Center of Innovation Competence Prof. Dr. Thomas Pertsch</p>		 <p><b>amos</b> Applikationszentrum Mikrooptische Systeme Dr. Oliver Mauroner</p>	
 <p><b>nano-replica</b> NanoReplica Nachwuchs-forschergruppe Dr. Erik Beckert</p>		 <p><b>Insect Inspired Imaging</b> Nachwuchs-forschergruppe Andreas Brückner, Dr. Robert Leitel</p>		 <p><b>Laser Shaping</b> Prof. Dr. Stefan Nolte</p>	
 <p><b>Micro-Structuring</b> Dr. Ernst-Bernhard Kley</p>		 <p><b>Fiber Lasers</b> Prof. Dr. Jens Limpert</p>		 <p><b>Nano-Optics</b> Prof. Dr. Thomas Pertsch</p>	
<p>Institute of Applied Physics IAP FSU Jena</p>					

**Dr. Franz-Ferdinand von Falkenhausen**  
Vorsitzender/Chair

**Dr.-Ing. Rolf-Jürgen Ahlers**  
ASG Luftfahrttechnik und Sensorik GmbH, Weinheim

**Dr. Klaus Bartholmé**  
Friedrich-Schiller-Universität, Jena

**Dr. Hans Eggers**  
Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn

**Dr. Roland Langfeld**  
Schott AG, Mainz

**Prof. Dr. Falk Lederer**  
Friedrich-Schiller-Universität, Physikalisch-Astronomische Fakultät, Jena

**Dipl.-Ing. Peter Leibinger**  
TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen

**Dr. Michael Mertin**  
JENOPTIK AG, Jena

**MinR Dr. Joachim Niklaus**  
Ministerialrat im Thüringer Kultusministerium, Erfurt

**Prof. Dr. Roland Sauerbrey**  
Forschungszentrum Rossendorf, Dresden

**Dr. Anton Schick**  
Siemens AG, München

**Dr. Frank Stietz**  
Carl Zeiss Jena GmbH, Jena

**Dr. Bärbel Voigtsberger**  
Hermsdorfer Institut für Technische Keramik e.V., Hermsdorf

**Dr. Berit Wessler**  
OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg

**Dr. Werner Wilke**  
VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

**Dr. Dirk Zittlau**  
Continental Automotive GmbH, Babenhausen

### Betriebshaushalt

Die positive Entwicklung des IOF hat sich auch 2009 fortgesetzt. Der Betriebshaushalt ist gegenüber dem Vorjahr um 7,7 % gewachsen, wobei die Aufwendungen für Personal etwas stärker angestiegen sind als die Sachausgaben. Basis der erfolgreichen Entwicklung ist der hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der leichte Rückgang im Industrieertrag konnte durch eine Steigerung der eingeworbenen öffentlichen Mittel mehr als ausgeglichen werden.

### Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2009 wurden insgesamt 2,57 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

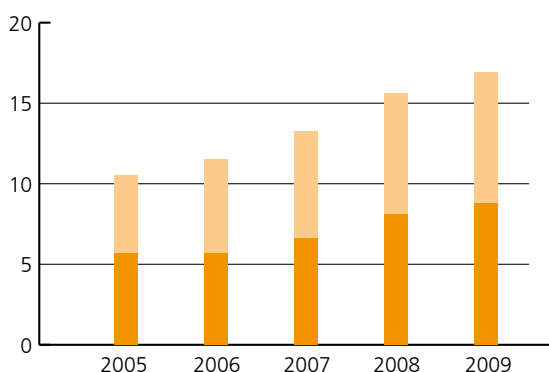
### Operating budget

The IOF continued to develop positively in 2009. Compared with the previous year the operating budget increased by 7.7 %, with expenditure for staff rising a little more than material costs. The basis of this successful development is the high share of revenue from contract research. The slight dip in industry revenue was more than balanced out by the increase in public funding received.

### Investments

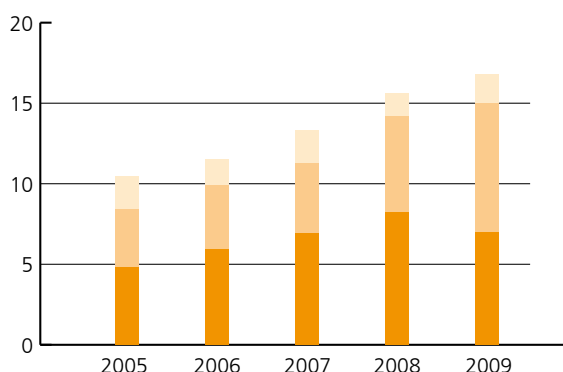
The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 2.57 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2009.

Betriebshaushalt/Budget (Mio €)



- Personalaufwand/Personnel expenditure
- Sachaufwand/Material expenditure

Ertrag/Revenue (Mio €)



- Industrie/Industry
- öffentliche Aufträge/Contracts government
- Grundfinanzierung/Federal funding

# DAS INSTITUT IN ZAHLEN THE INSTITUTE IN FIGURES

## Personal

Mit dem Anwachsen des Betriebshaushaltes konnten auch 2009 neue Arbeitsplätze geschaffen werden. So ist in den letzten fünf Jahren die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter und Doktoranden um 44 % angestiegen, die Zahl der technischen Mitarbeiter wurde um 38 % erhöht. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der FSU und der Fachhochschule Jena.

## Das IAP 2009 in Zahlen

Die Mitarbeiter des IAP konnten für 2009 Drittmittel in Höhe von 6,9 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle), das ist eine Steigerung gegenüber 2008 um 17,5 %. Auch am IAP gehört die kontinuierliche Investition in Infrastruktur zur Entwicklungsstrategie, 2009 wurden 2,23 Millionen Euro für Investitionen aufgewendet. Am IAP arbeiten 4 Professoren, 15 wissenschaftliche und 14 technische Mitarbeiter sowie 45 Doktoranden und 59 Studenten und Schülerpraktikanten.

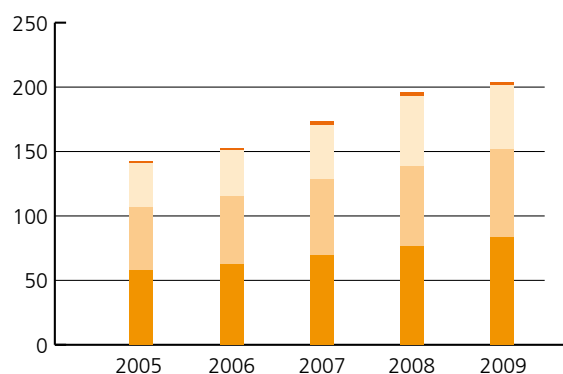
## Staff

The increase in operating budget enabled the creation of further new jobs in 2009. In the last five years, the number of research assistants and doctoral candidates has risen by 44 %, the number of technical assistants has grown by 38 %. 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 in figures 2009

Employees at IAP acquired external funds worth 6.9 million euros in 2009 (see table), representing an increase of 17.5 % compared with 2008. Continuous investment in infrastructure is also part of the development strategy at IAP, 2.23 million euros were spent on investments in 2009. A total staff of 4 professors, 15 research assistants, 14 technical assistants, 45 doctoral candidates and 59 students and student internships work at IAP.

## Mitarbeiter/Staff



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

## Drittmiteleinnahmen IAP/ Contract research revenue IAP

Fördergeber/Contracts with	Zuwendung/Funds/T€
BMBF	3.549
DFG	725
EU	934
Thüringen/Thuringia	62
Stiftungen/Foundation	32
Industrie/Industry	1.573



Die hervorragende technische Ausstattung in ihrer einzigartigen Bandbreite ist eine wesentliche Grundlage der erfolgreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Von ultrapräzisen Diamantwerkzeugen über eine hochmoderne Elektronenstrahl-Lithografieanlage bis hin zur umfassenden Messtechnik verfügt das Fraunhofer IOF über exzellent ausgerüstete Labore auf einer Fläche von 2.550 m<sup>2</sup>. Darin eingeschlossen sind 860 m<sup>2</sup> Reinraum der Klassen 10.000 bis 10, eine mechanische Werkstatt und ein umfangreiches Versuchsfeld für Test- und Demonstrationszwecke.

Das BMBF-geförderte **Applikationszentrum Mikrooptische Systeme amos** verbindet die hervorragende Infrastruktur des Fraunhofer IOF mit den Kompetenzen des CiS Forschungsinstituts für Mikrosensorik und Photovoltaik in Erfurt. Durch die enge Verknüpfung von Optik und Sensorik werden innovative mikrooptische und mikro-opto-elektronische Lösungen (MOEMS) generiert.

Technologisches Herzstück des 2006 eingerichteten **Center for Advanced Micro- and Nano-Optics (CMN-Optics)** ist die Elektronenstrahl-Lithografieanlage vom Typ VISTEC SB350 OS. Damit ist die Erzeugung kleinster Strukturen mit hoher Schreibgeschwindigkeit und einer Auflösung bis 50 nm möglich – und dies auf Substraten mit bis zu 300 mm Ausdehnung.

Die BMBF-geförderte Nachwuchsgruppe **nanoreplica** verfolgt das Ziel, eine durchgängige Technologiekette zur Herstellung optischer Komponenten durch Replikation zu etablieren – und zwar vom Makro- bis zum Nano-Bereich. Gemeinsam mit Partnern werden mikro- und nanostrukturierte Formeinsätze erforscht, um innovative Anwendungen und Produktideen für die optische und Kunststoff verarbeitende Industrie zu generieren.

The unique range of outstanding technical equipment is an essential basis for successful research and development work. From ultra-precise diamond tools via an ultramodern electron beam lithography system to comprehensive metrology, the Fraunhofer IOF is home to excellently equipped laboratories with an area of 2,550 m<sup>2</sup>. This includes an 860 m<sup>2</sup> class 10,000 to 10 clean room, a mechanical workshop and an extensive experimental area for testing and demonstrations.

The **amos Application Center for Micro-Optical Systems**, supported by the Ministry of Education and Research (BMBF), combines the outstanding infrastructure of Fraunhofer IOF with the skills of the CiS Research Institute for Micro Sensors and Photovoltaics in Erfurt. The close linking of optics and sensor technology is creating innovative micro-optical and micro-optoelectronic solutions (MOEMS).

The technological heart of the **Center for Advanced Micro- and Nano-Optics (CMN-Optics)**, set up in 2006, is the electron beam lithography system of type VISTEC SB350 OS. With it, it is possible to create small structures with a high write rate and a resolution of up to 50 nm – and this on substrates with up to 300 mm expansion.

The **nanoreplica** junior research group, supported by the BMBF, aims to establish an integrated technology chain to manufacture optical components by replication – from the macro to the nano range. Together with partners, micro and nano-structured mold inserts are being investigated to generative innovative applications and product ideas for the optical and plastics-processing industries.

# TECHNISCHE AUSSTATTUNG

## TECHNICAL EQUIPMENT

### **Beschichtungstechnik für EUV bis NIR**

- Sputteranlagen, Hochvakuumbedampfungsanlagen
- Mikrogalvanik

### **Mikro- und Nanostrukturtechnik**

- Photolithographieanlage, Laserlithographieanlage
- Elektronenstrahl-Lithographieanlage

### **Mikrooptik-Technologie**

- Anlage zum reaktiven Ionenätzen
- Plasma-Trockenätzanlage
- Polymer- und Glasprägeanlage
- Mask-Aligner

### **Ultrapräzisionsbearbeitung**

- Ultrapräzisions-Drehmaschinen
- CNC-Mehrfachfräsmaschine
- 5-Achs-Mikrobearbeitungszentren

### **Integration, Mikromontage**

- Laserstrahllötanlage
- Mikromontagesysteme
- Positionier- und Justiersysteme

### **Messtechnik**

- Streulichtmesssystem (157 nm–10,6 µm)
- Spektralphotometer (120 nm–50 µm)
- Röntgendiffraktometer / -reflektometer
- Rasterkraft- / Elektronen- / Laserscanningmikroskop
- Freiformmesssystem UA3P
- Messsysteme zur 3D-Formfassung
- Messverfahren zur Charakterisierung optischer Komponenten und Systeme
- Messtechnik zum Test von Lebensdauer und Haftfestigkeit optischer Schichten
- Klimaprüfung

### **Coating technologies for a spectral range from EUV to NIR**

- Sputtering technologies, high vacuum evaporation
- Micro-electroplating

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

- Photolithography, laser beam lithography
- Electron beam lithography

### **Micro-optics technology**

- Reactive ion etching
- Plasma dry etching
- Polymer and glass embossing
- Mask-Aligner

### **Ultra precision machining**

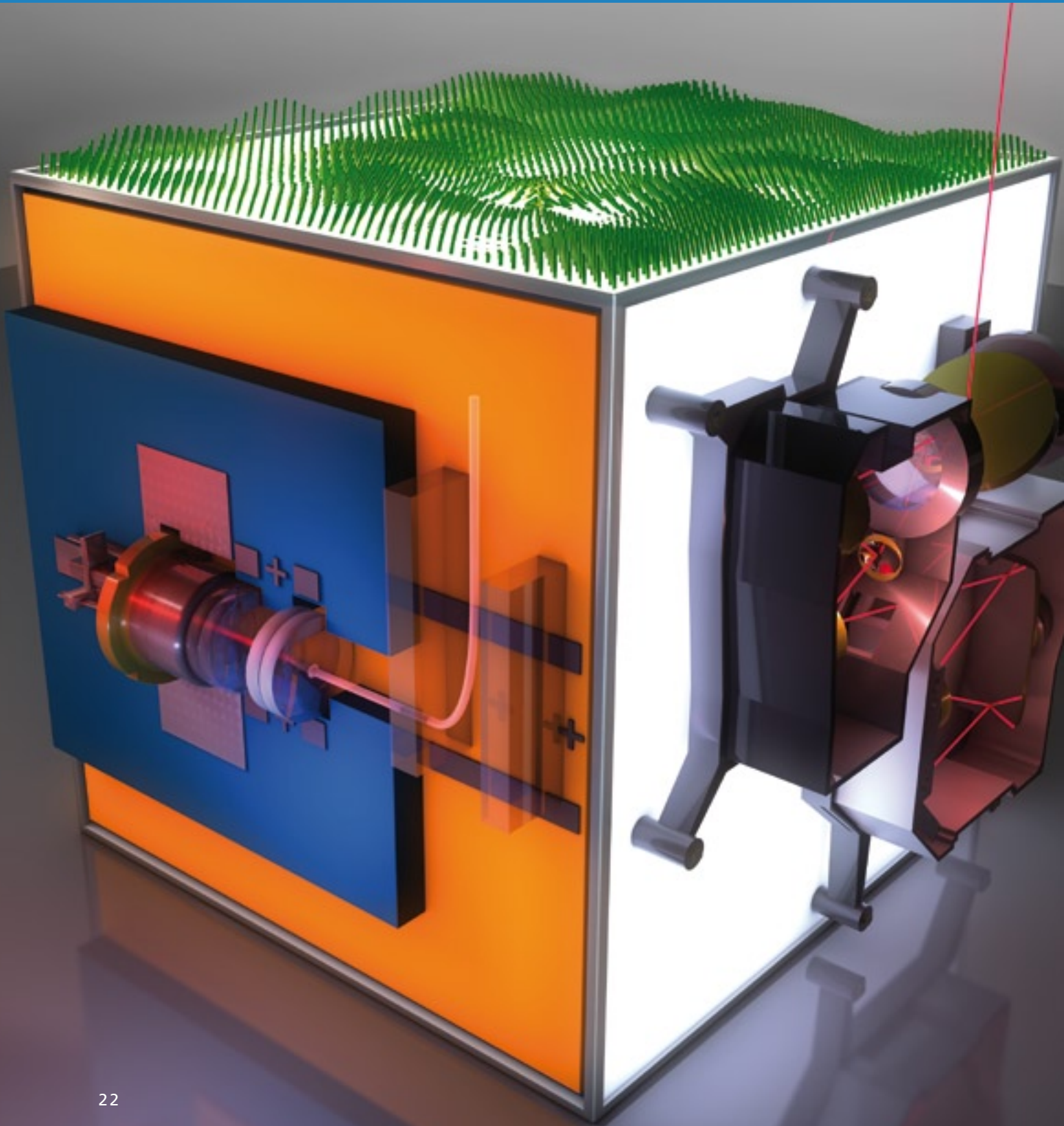
- Ultra-precision turning late
- CNC multi milling machine
- 5-axis micro machining center

### **Integration, micro-assembly**

- Laser beam soldering
- Micro-assembly system
- Positioning and alignment systems

### **Measurement technologies**

- Scattered light measurement systems (157 nm–10,6 µm)
- Spectral photometers (120 nm–50 µm)
- X-ray diffractometer / reflectometer
- Atomic force / Electron / Laser scanning microscope
- Freeform measurement system UA3P
- Systems for 3D shape measurement
- Techniques for optics characterization
- Testing of long-term stability and adhesion of optical coatings
- Climate testing



# KOMPETENZFELDER FIELDS OF COMPETENCE

Die optische Systemtechnik ermöglicht den Schritt von der diskreten optischen, elektronischen und mechanischen Komponente zu optischen, opto-elektronischen und opto-mechanischen Modulen und Systemen komplexer Funktionalität. Das Leistungsangebot des Fraunhofer IOF umfasst Systemlösungen beginnend mit neuen Konzepten mit hohem Zukunftspotential über die Entwicklung von Technologien, Fertigungs- und Messverfahren bis hin zum Bau von Prototypen und Pilotserien für Wellenlängen vom Millimeter- bis zum Nanometerbereich.

Design und Simulation

Mikro – und Nanostrukturtechnik

Oberflächen und Schichten

Lichtquellen und Laser

Montage und Systemintegration

Komponenten und Systeme

Optical system technology facilitates the step from discrete optical, electronic and mechanical components to complex optical, opto-electronic or opto-mechanical modules and systems. The institute offers system solutions extending from concepts with strong future potential to the development of technologies and manufacturing and measurement methods through to the construction of prototypes and test series for wavelength in the millimeter to nanometer range.

Design and simulation

Micro- and nanostructure technology

Surfaces and coatings

Light sources and lasers

Packaging and system integration

Components and systems





Wie findet Licht den richtigen Weg?  
How does light find the right path?

## DESIGN UND SIMULATION

### DESIGN AND SIMULATION

Zentrale Kompetenz und Basis aller Entwicklungen am Fraunhofer IOF sind das Optik- und Mechanikdesign. Design- und Modellierungswerkzeuge erlauben den Entwurf und die Simulation opto-mechanischer Systeme von Mikro bis Makro.

The main area of expertise and basis of all development at Fraunhofer IOF is optical and mechanical design. Design and simulation tools allow us to project and simulate opto-mechanical systems from micro to macro.

#### Optik- und Mechanikdesign

- Raytracing, wellenoptisches Design und rigorose Analyse
- Toleranzanalyse
- Beleuchtungsoptiken, Abbildungsoptiken
- Ausbreitung ultrakurzer Pulse
- Dünnschichtdesign, Vielschichtsysteme
- Integrierte Optik und Faseroptik
- Strahlformungselemente, Freiformflächen
- Optische Sensoren
- Thermalanalyse
- CAD gestützter Systementwurf
- Optimierte Halterung optischer Komponenten
- Entwurf von Justieralgorithmen

#### Optical and mechanical design

- Ray tracing, wave-optical design and rigorous analysis
- Tolerance analysis
- Illumination optics, imaging optics
- Propagation of ultra-short pulses
- Thin films and multilayers
- Integrated optics and fiber optics
- Beam forming elements, freeform surfaces
- Optical sensors
- Thermal analysis
- CAD based system design
- Optimized mounting of optical components
- Development of adjustment algorithms

#### Simulation und Analyse

- Komplexe optische Systemanalyse
- Streu- und Störlichtuntersuchungen
- Analyse hochfrequenter Gitter
- Simulation nanostrukturierter Oberflächen
- Finite-Element-Analyse mechanischer und thermischer Einflüsse sowie thermo-optischer Effekte
- Simulation von Fügeprozessen
- Simulation von laserbasierten Trenn- und Strukturierungsverfahren

#### Simulation and analysis

- Complex optical system analysis
- Investigation of scattered and stray light
- Analysis of high frequency gratings
- Simulation of nano-structured surfaces
- Finite element analysis of mechanical and thermal influences and thermo-optical effects
- Simulation of joining techniques
- Simulation of laser based cutting and structuring processes

Wie geben Strukturen dem Licht  
neue Eigenschaften?  
How do structures give light  
new properties?

## MIKRO- UND NANOSTRUKTURTECHNIK

## MICRO- AND NANO-STRUCTURE TECHNOLOGY

Die Erzeugung und Replikation optischer Mikro- und Nanostrukturen ist Grundlage für moderne komplexe optische Systeme. Das IOF verfügt über die technologische Basis zur Fertigung und Charakterisierung von High-End mikro- und nanooptischen Elementen höchster Auflösung auf bis zu 12"-Substraten.

### Originalerzeugung, Strukturübertragung, Replikation

- Photolack Reflow
- Photo- und Laserlithographie, Elektronenstrahlolithographie
- Ultrapräzisionsdiamantdrehen und -fräsen
- Erzeugung im Wafermaßstab
- AR-plas® - Plasma-Ionenätzen, reaktives Ionenätzen
- UV-Abformung in Polymere
- Proportionalübertragung durch reaktives Ionenätzen
- Heißprägen und Glaspressen
- Fertigung von Abformwerkzeugen und Prägeformen

### Mikro- und nanostrukturierte Elemente

- Refraktive und diffraktive Mikrooptiken
- Antireflexstrukturen auf Polymeren, Glas und Silizium
- Homogene und gechirpte Mikrolinsenarrays, Tandem-Arrays
- Dielektrische und metallische Gitter
- Computergenerierte Hologramme
- Metamaterialien

### Mikro- und Nanostrukturanalyse

- Rasterkraftmikroskopie, Elektronenmikroskopie
- Streulichtbasierte Nanostrukturvermessung
- Modellbasierte Datenanalyseverfahren

Innovative optical systems are based on the creation and replication of optical micro- and nano-structures. Fraunhofer IOF possesses the technological basis for the manufacturing of high-end micro- and nano-optical elements with highest resolution on up to 12" substrates.

### Master generation, structure transfer and replication

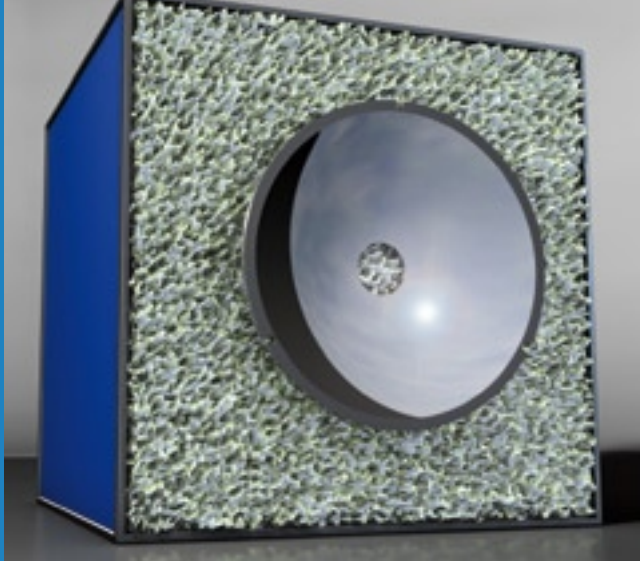
- Photo resist reflow
- Photo- and laser lithography, electron beam lithography
- Ultra-precision diamond turning and milling
- Wafer scale manufacturing
- Plasma ion etching AR-plas®, reactive ion etching
- UV molding in polymers
- Proportional transfer by reactive ion etching
- Hot embossing and glass molding
- Manufacturing of replication tools and molds

### Micro- and nano-structured elements

- Refractive and diffractive micro-optics
- Antireflective structures on polymers, glass and silicon
- Homogeneous and chirped microlens arrays, tandem arrays
- Dielectric and metallic gratings
- Computer generated holograms
- Meta-materials

### Micro- and nano-structure analysis

- Atomic force microscopy, Electron microscopy
- Scattered light based measurement of nano-structures
- Model based data analysis



**Wie kommt das Licht verlustfrei durch die Optik?**

How does light path through optics without loss?

## OBERFLÄCHEN UND SCHICHTEN

## SURFACES AND COATINGS

Mit optischen Schichten werden Oberflächen für vielseitige Anforderungen maßgeschneidert. Optische und funktionale Eigenschaften sind gezielt einstellbar.

Tailored surfaces for various applications are generated by optical coatings. Optical and functional properties may be adjusted.

### Schichtsysteme für den Röntgen- bis NIR-Bereich

- Beschichtungstechnologien für die EUV-Lithographie
- Kollektorspiegel für EUV-Hochleistungsquellen
- Hochreflektierende Schichtsysteme für 1 nm bis 100 nm
- Ultrastabile, verlustarme Oxid- und Fluoridschichten
- Ultrabreitband-Entspiegelungen
- Filter, Strahlteiler, Polarisatoren
- Rugate-Filter, plasmonenverstärkte Absorptionsfilter
- Metallspiegel (Au, Ag, Al, Pt, Rh, Pd)
- Laserfeste Schichtsysteme
- Lotschichten (AuSn)
- Transparente elektrisch leitfähige Schichten

### Multi-layers for the X-ray to NIR spectral range

- Coating technologies for EUV lithography
- Collector mirrors for high-power EUV sources
- Highly reflective multi-layers for 1 nm to 100 nm
- Ultra-stable, low-loss oxide and fluoride multi-layers
- Ultra-broad band antireflective coatings
- Filters, beam splitters, polarizer
- Rugate filters, plasmon enhanced absorption filters
- Metal mirrors (Au, Ag, Al, Pt, Rh, Pd)
- Laser resistant coatings
- Solder coatings (AuSn)
- Transparent electrically conductive coatings

### Funktionalisierung von Kunststoffoberflächen

- Kratzfeste Entspiegelungsschichten AR-hard®
- Optimierte ionengestützte Aufdampfprozesse für Polymere
- Entspiegelung durch Nanostrukturen AR-plas®
- Hydrophilierung und Hydrophobierung

### Functionalizing of plastic surfaces

- Scratch resistant anti-reflective coatings AR-hard®
- Optimized ion assisted vapour deposition of polymers
- Anti-reflection by nano-structures AR-plas®
- Hydrophilation and hydrophobization

### Oberflächen- und Schichtcharakterisierung

- Spektroskopie im UV- bis IR-Bereich
- Nano- und Mikrostrukturanalyse, Formanalyse
- Streulicht- und Rauheitsanalyse von EUV bis NIR
- Transmissions- und Reflexionsmessungen von EUV bis NIR
- Diagnose optischer Verluste, Störlichtmessung
- Prozessintegrierte Qualitätsprüfung

### Characterization of surfaces and coatings

- Spectroscopy in the UV to IR spectral range
- Nano- and micro-structure analysis, form analysis
- Analysis of stray light and roughness (EUV to NIR)
- Measurement of transmittance and reflectance (EUV to NIR)
- Diagnosis of optical losses, false light measurement
- Process integrated quality control

Wie wird das zur Anwendung passende  
Licht erzeugt?  
How is the light generated for the  
relevant application?

## LICHTQUELLEN UND LASER

## LIGHT SOURCES AND LASERS

Halbleiter-Lichtquellen wie LEDs und OLEDs bieten ein enormes Potenzial zur Energieeinsparung in der Beleuchtung. LEDs, OLEDs und Laser sind die Basis für neuartige miniaturisierte optische Systeme zur Prozesskontrolle und -steuerung sowie für die Informationsaufnahme und -wiedergabe. In der modernen Produktion gewinnt Licht als Werkzeug zunehmend an Bedeutung. Am Fraunhofer IOF und dem IAP werden Faserlaser entwickelt, die ihr Einsatzpotenzial in der Mikro- und Makrobearbeitung sowie in der Medizintechnik haben.

### Hochleistungsfaserlaser hoher Strahlqualität

- Design und Aufbau von Faserlasern, Skalierung >> 1 kW
- Temperaturmanagement und thermo-optische Auslegung
- Ultrakurzpuls laser, Pulsdauer < 100 fs
- Aufbau- und Verbindungstechnologien für Lasermodule
- Optische Subsysteme zur Faserkopplung für Strahlleistungen im kW-Bereich

### Halbleiter-Lichtquellen

- Resonatorgeometrien für Halbleiterlaser und -verstärker
- Primär- und Sekundäroptiken zur Strahlformung von LEDs, OLEDs und Lasern
- Konzentratoren zur Lichtkollimation
- Multilagige Mikro-Optiken für Strahlhomogenisierung und Abbildung
- Freiformoptiken zur bildgebenden Strahlformung
- Faserkopplungen für Diodenlaserbarren
- RGB-Module

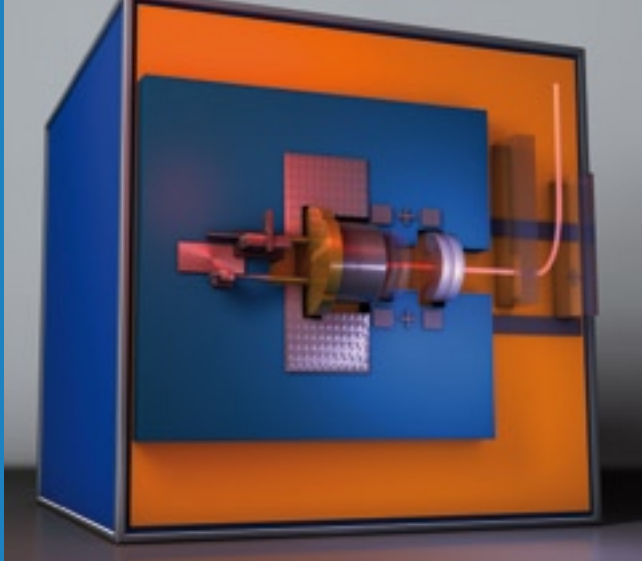
Semiconductor light sources such as high performance LEDs and OLEDs show enormous potential for energy saving in illumination. LEDs, OLEDs and lasers find application in novel miniaturized optical systems for process monitoring and control as well as for information recording and reproduction. In modern production processes the significance of light as a tool is growing. At Fraunhofer IOF, short pulse fiber laser systems are developed with application potential especially in micro material treatment and in medical technology.

### High-power fiber lasers of high beam quality

- Design and manufacturing of fiber lasers, output power >> 1 kW
- Temperature management and thermo-optical design
- Ultra-short pulse lasers, pulse duration < 100 fs
- Packaging for fiber lasers
- Optical fiber coupling modules for beam powers in the kW range

### Semiconductor light sources

- Resonator geometries for solid state lasers and amplifiers
- Primary and secondary optics for LED, OLED and laser beam shaping
- Concentrators for the collimation of the emitted light
- Multi-layer micro-optics for beam homogenization and imaging
- Beam shaping by free form surfaces
- Fiber coupling for laser diode bars
- RGB modules



**Wie wird aus Komponenten das perfekte System?**

How do components go to make the perfect system?

## MONTAGE UND SYSTEMINTEGRATION

## PACKAGING AND SYSTEM INTEGRATION

Die Entwicklung von Technologien zur hybriden Integration unterschiedlicher Komponenten mit hoher Präzision ist grundlegende Voraussetzung für den Aufbau komplexer opto-mechanischer und opto-elektronischer Mikro- und Makrosysteme.

### Montagetechnologien

- Handhabung miniaturisierter Komponenten
- Positionieren und Justieren

### Fügetechnologien

- Präzisionskleben optischer Komponenten
- Flussmittelfreies Laserlöten zum Aufbau optischer Sensoren
- Solder Jet Bumping - ein spezielles Laserlötverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen
- Laserspleißen/-tapern optischer Hochleistungskomponenten
- Plasmabonden, silikatisches Bonden
- Spannungsarme mechanische Aufnahmen
- Präzisionsfassungen, Snap-In-Montage
- Justierdrehen optischer Komponenten im  $\mu\text{m}$ -Bereich

### Integration optischer Systeme

- Entwurf multifunktionaler Systemplattformen aus Metall, Glas, Glaskeramik, Keramik
- Aufbau und Qualifizierung von Lasermodulen
- Mechatronischer Systementwurf miniaturisierter Systeme
- 3D-Integrationstechniken im Wafermaßstab
- Integration optischer Systeme für Weltraumanwendungen
- Aufbau- und Verbindungstechnik für Anwendungen in Kryo- oder Vakuumumgebung

The development of technologies for the hybrid integration of different optical and non-optical components with high precision is crucial for efficient manufacturing of complex opto-mechanical and opto-electronic micro- and macro-systems.

### Assembly technologies

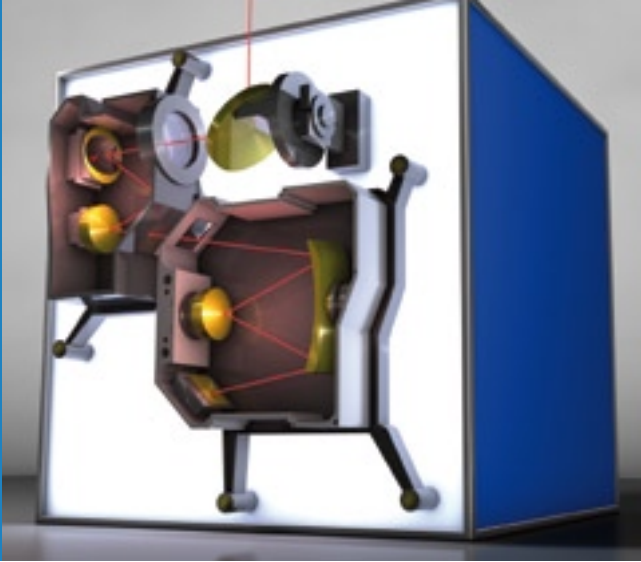
- Handling of miniaturized components
- Positioning and adjustment

### Joining technologies

- Precision bonding of optical components
- Flux-free laser beam soldering for the assembly of optical sensors
- Solder Jet Bumping – a special laser soldering technique for joining of micro-systems
- Laser splicing/ -taping of optical high-power components
- Plasma bonding, silica based bonding
- Low-stress mechanical mounts
- Precision mounts, snap-in-assembly
- Lens centering of optical components in the  $\mu\text{m}$  range

### Integration of optical systems

- Design of multifunctional system platforms of metal, glass, glass ceramics and ceramics
- Assembly and qualification of laser modules
- Mechatronic system design of miniaturized optical systems
- 3D integration techniques for wafer scale packaging
- Integration of optical systems for space applications
- Packaging and joining technologies for applications in cryogenic and vacuum surroundings



Wie entstehen durch Licht neue  
Anwendungen?  
How are new applications created  
with light?

## KOMPONENTEN UND SYSTEME

### COMPONENTS AND SYSTEMS

Die Beherrschung der gesamten Prozesskette vom Design optischer Komponenten bis zum System komplexer Funktionalität liefert Lösungen mit Licht. Entscheidend für die Systemperformance sind innovative und zugleich zuverlässige Komponenten, wie refraktive und diffraktive Mikrooptiken, computergenerierte Hologramme oder Freiformoptiken.

Controlling the whole process chain from the design of optical components up to the system of complex functionality enables solutions with light. Innovative and reliable components such as refractive and diffractive micro-optics, computer generated holograms or freeform optics are crucial for the system performance.

#### Mikrooptische und opto-elektronische Systeme

- Bildgebende Systeme für Automotive und Ophthalmologie
- Ultradünne abbildende Systeme
- Miniaturisierte LED-, OLED- und Laser-Projektionssysteme
- Imageslicer
- Lasermodule
- Spektrale Filterarrays
- Optische Sensoren

#### Micro-optical and opto-electronic systems

- Imaging systems for automotive and ophthalmology
- Ultra-thin imaging systems
- Miniaturized LED, OLED and laser based projection systems
- Image slicer
- Laser modules
- Spectral filter arrays
- Optical sensors

#### Optische Messsysteme

- Messsysteme zur 3D-Formerfassung
- 3D-Intraoral-Scanner für die Zahntechnik
- Handgeführte 3D-Scanner auf Basis Streifenprojektion
- THz-Systeme für Qualitätskontrolle und Sicherheit
- Streulichtmesssysteme für Wellenlängen von NIR bis EUV
- Messsysteme zur Rauheitsanalyse

#### Optical measurement systems

- System for 3D shape measurement
- 3D intraoral scanner for dentistry
- Hand held 3D scanner based on fringe projection
- THz systems for quality control and security
- Stray light measurement systems for NIR to EUV wavelength
- Measurement systems for roughness analysis

#### Opto-mechanische Präzisionssysteme

- Wafer- und Maskenchucks für EUV-Lithographie und Messtechnik
- EUV- und Röntgenoptiken
- Spiegelbasierte Metrologiesysteme
- Aerostatische und aerodynamische Rotationsscanner
- Spiegelsysteme für Astronomie, Luft- und Raumfahrt
- Objektive für miniaturisierte Kameras und Teleskope

#### Opto-mechanical precision systems

- Wafer and mask chucks for EUV lithography and measurement
- EUV and X-ray optics
- Mirror based metrology systems
- Aerostatic and aerodynamic rotation scanners
- Mirror systems for astronomy and aerospace
- Lenses for miniaturized cameras and telescopes

**LÖSUNGEN MIT LICHT ...**

**... MEISTERN HERAUSFORDERUNGEN  
UND BIETEN CHANCEN.**

**SOLUTIONS WITH LIGHT ...**

**... OVERCOME CHALLENGES  
AND OFFER OPPORTUNITIES.**

# AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2009

## SELECTED RESULTS 2009

Das Fraunhofer IOF entwickelt zur Bewältigung drängender Zukunftsfragen in den Bereichen Energie und Umwelt, Information und Sicherheit sowie Gesundheit und Medizin Lösungen mit Licht. Basis der Arbeit ist die kontinuierliche Entwicklung und Optimierung von Technologien mit dem Ziel der Kontrolle von Licht – 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 IOF Grundlagenforschung und angewandte Forschung bis hin zur Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen im Auftrag der Kunden.

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

- Energie und Umwelt,
- Information und Sicherheit,
- Gesundheit und Medizintechnik

und aus den Bereichen

- Technologieentwicklung und
- Grundlagenforschung.

The Fraunhofer IOF is developing solutions with light in the fields of energy and environment, information and safety, and health and medicine to address pressing future challenges. The work is founded on the continuous development and optimization of technologies designed to control light – from its generation to transport and manipulation right through to its use.

In close association with the Institute of Applied Physics at the Friedrich Schiller University Jena, IOF addresses aspects of basic and applied research all the way to the development of products and services on behalf of its customers.

The following pages present selected results of research obtained in the past year on internal projects or together with partners and customers. The examples show solutions for the cutting-edge fields of

- energy and environment,
- information and safety,
- healthcare and medical engineering

and in the areas of

- technological development and
- basic research.





## **ENERGIE UND UMWELT**

Durch Lösungen mit Licht ...  
... Energieeffizienz sichern und  
Nachhaltigkeit gewährleisten.

## **ENERGY AND ENVIRONMENT**

Solutions with light ...  
... ensure energy efficiency and  
guarantee sustainability.



Angesichts der Knappheit an fossilen Energieressourcen und der wachsenden CO<sub>2</sub>-Belastung werden Technologien benötigt, durch die Energie bezahlbar bleibt und die auch bei steigendem Energiebedarf den Schutz von Klima und Umwelt ermöglichen. Lösungen mit Licht leisten wertvolle Beiträge, um diese Herausforderungen zu meistern: sie ermöglichen sowohl die effiziente Erzeugung als auch die effiziente Nutzung von Energie.

Das Leben in der modernen Gesellschaft ist sehr stark von der Beleuchtung abhängig, sowohl am Arbeitsplatz als auch im Straßenverkehr oder im privaten Bereich. Das hat zur Folge, dass derzeit etwa 20 % der erzeugten elektrischen Energie allein für die Beleuchtung verbraucht werden. Eine Lösung bieten hier moderne Halbleiterlichtquellen – LEDs und OLEDs, sie weisen ein Einsparpotenzial von 50 % auf. In Kombination mit Lichtmanagement, welches zum Beispiel das Umgebungslicht und die Anwesenheit von Personen berücksichtigt, können nochmals 20 % eingespart werden.

Doch das Potenzial von LEDs und OLEDs reicht weiter, sie bieten nicht nur eine hohe Energieeffizienz sondern zeigen eine hohe Stabilität, Lebensdauer und Brillanz sowie völlig neue Möglichkeiten in Design und Farbgestaltung und halten auch in der Mess- und Prüftechnik Einzug.

Gleichzeitig liefert die Photonik wesentliche Technologien zur optimalen Nutzung einer nahezu unerschöpflichen Energiequelle, der Sonne. Angefangen bei neuen Konzepten der konzentrierenden Photovoltaik mit Optiken zur Bündelung des Sonnenlichts über die Erhöhung des Wirkungsgrades von Solarzellen durch deren Nanostrukturierung bis hin zu modernen Lasern für die effiziente Produktion von Solarzellen.

Lösungen mit Licht stehen für eine ressourcenschonende Erzeugung und effiziente Nutzung von Energie.

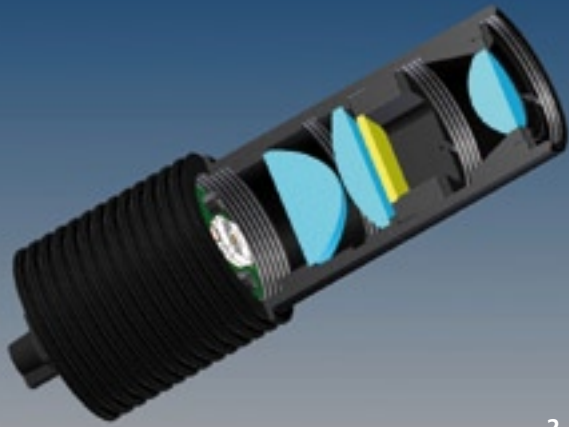
The scarcity of fossil energy reserves and rising CO<sub>2</sub> emissions call for technologies which can keep energy affordable while also protecting the climate and environment in the face of rising energy requirements. Solutions with light make valuable contributions to overcoming these challenges: they enable both the efficient generation and efficient use of energy.

Life in modern society is greatly dependent on lighting, both at work and in street traffic or in the private sphere. The result is that around 20 % of electrical energy currently generated is consumed for lighting alone. In this regard, one solution is offered by modern semiconductor light sources – LEDs and OLEDs – which present a potential saving of 50 %. In combination with light management, which for example takes account of ambient light and the presence of people, a further 20 % could be saved.

Indeed, LEDs and OLEDs present even more potential, as they offer not just a high level of energy efficiency but also exhibit great stability, a long useful life, high brilliance, as well as totally new possibilities for design and color, and are also becoming part of metrology and testing techniques.

At the same time, photonics are delivering major technologies for the optimal use of a virtually inexhaustible energy source, the sun. These start with new concepts in concentrating photovoltaics with optics to focus sunlight by increasing the efficiency of solar cells by their nanostructuring, and go all the way to modern lasers for the efficient production of solar cells.

Solutions with light represent resource-friendly generation and efficient use of energy.



2

## LEDS IN DER MESS- UND PRÜFTECHNIK

### LEDS FOR MEASUREMENT AND TESTING TECHNOLOGY

Heute stehen mit neuartigen LEDs interessante Hochleistungslichtquellen hoher Effizienz zur Verfügung. Eine stetig wachsende Zahl verfügbarer Emissionswellenlängen vom Ultraviolett bis in das nahe Infrarot sowie weiße Emittoren, lineare Modulier- und Dimmbarkeit, rauscharme Emission und geringe Herstellungskosten – die rasante Entwicklung von Hochleistungs-LEDs hat single-mode-Laserdioden in vielen Bereichen überholt /1/. Dieser Umstand motiviert Überlegungen zum Ersatz von Laserdiodenmodulen durch LED-basierte Systeme in Mess- und Überwachungstechnik und Machine Vision.

Die - verglichen mit Laserdioden – geringe räumliche Kohärenz verhindert störende Speckle im Leuchtfeld, erfordert allerdings neuartige Optikkonzepte zur Realisierung bislang »laser-typischer« strukturierter Beleuchtungen, wie Spotarrays oder Linienfoki. Während die Optik von Laserdioden-Spotarrays üblicherweise nur aus Kollimatorasphäre und diffraktivem Strahlteiler besteht, bietet sich für die LED-Realisierung eine Aufteilung der Pupille des Kollimators durch ein Mikrolinsenarray mit nachfolgender Relayoptik zur Abbildung des Spotarrays aus der Brennebene der Lenslets in die Beleuchtungsebene an (Abb. 1). Mit steigender Spotanzahl

Current high-power LEDs are light sources with outstanding efficiency. A continuously growing number of emission wavelengths from ultraviolet to infrared, as well as white light emission, linear modulation and dimming, low-noise emission and small manufacturing cost – the rapid development of high-power LEDs has overtaken single-mode laser diodes with regard to numerous parameters /1/. This fact motivated investigations to replace laser diode modules by LED-based systems in measurement applications, surveillance and machine vision.

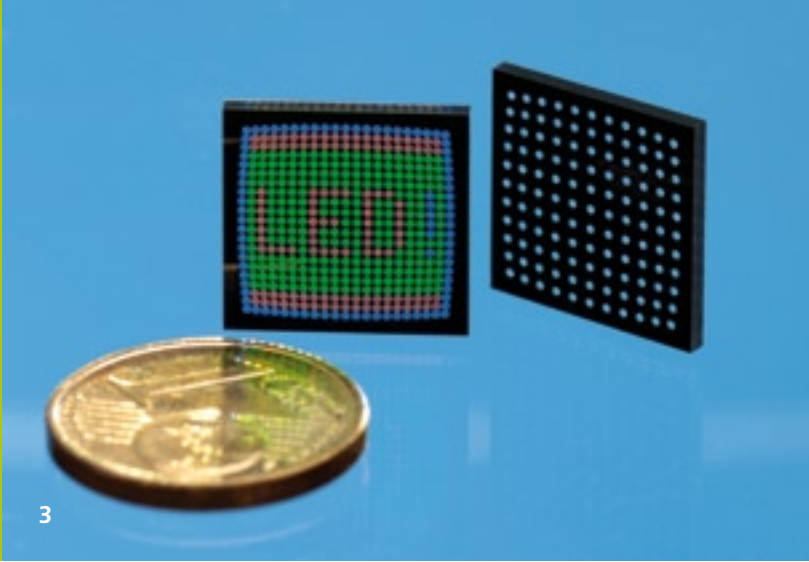
Compared with laser diodes, the small spatial coherence prevents unwanted speckle in the illuminated area but requires new optical system designs for the realization of currently laser-dominated patterned light sources like spot array generators or line-foci and pattern generators. Laser diode spot array optics usually consists of only a collimating asphere and a diffractive beam splitter. For realization of LED illuminated modules, a lens array based pupil-splitting approach combined with imaging of the spot array in the focal plane into the illumination plane by a relay optics is advantageous (Fig. 1). The beam quality of the individual spots increases with increasing spot number: Using the  $M^2$ -parameter for characterization of beam quality, the collimated beam of a high-power

2 *Aufbau des Spotarraygenerators.*

3 *Gechirpte Linsenarrays mit Blendenstrukturen und vergrabenen Farbfiltern (links).*

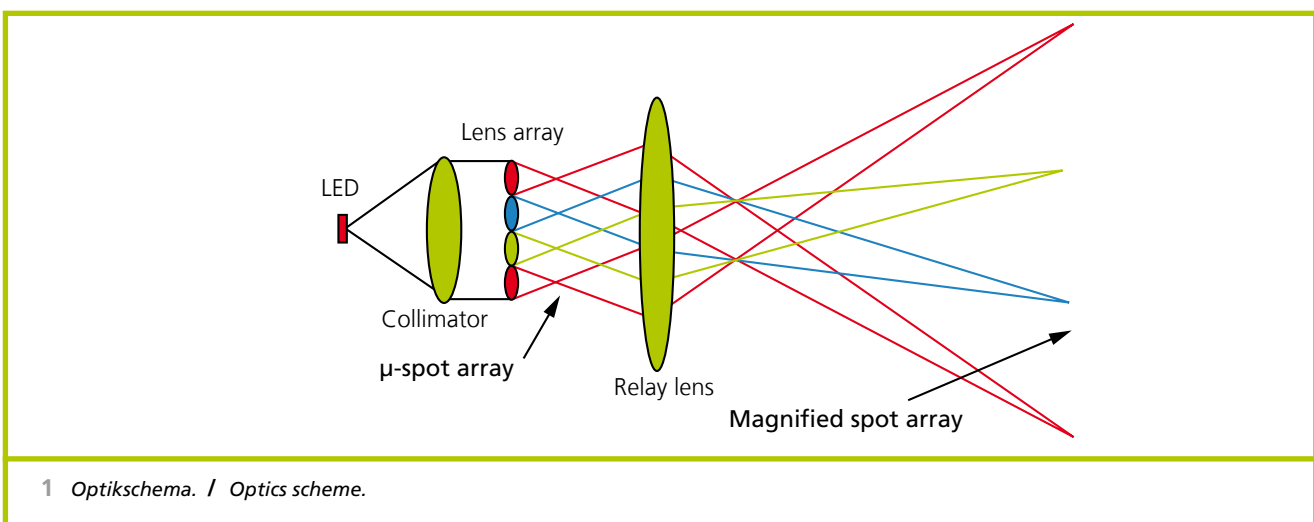
2 *Schematic diagram of the spot array generator.*

3 *Chirped lens arrays with apertures and buried color filters (left).*

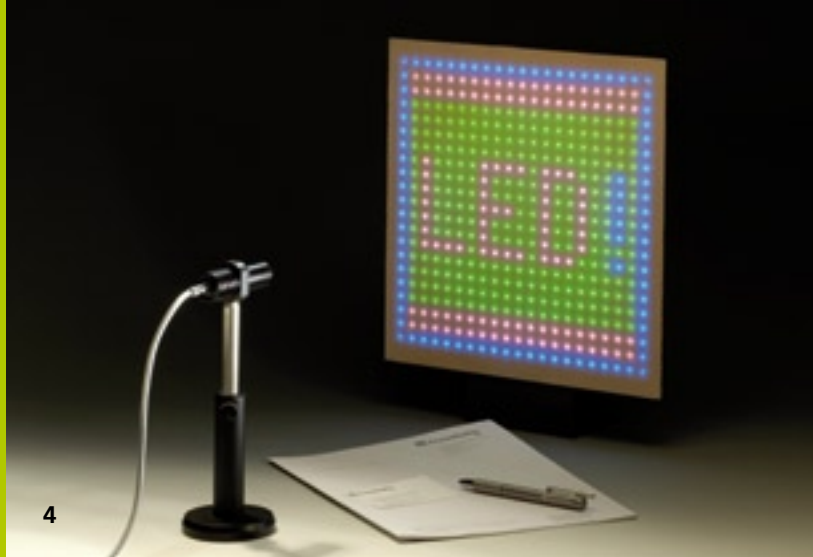


verbessert sich die Strahlqualität der Einzelspots verglichen mit der kollimierten LED: Beschreibt man die Strahlqualität mit dem in der Lasertechnik üblichen  $M^2$ -Parameter, so liegt die kollimierte Hochleistungs-LED bei größenordnungsmäßig  $M^2 \approx 1000$ , während die Bündel des  $N \times N$  Spotarrays ein um den Faktor  $N$  geringeres  $M^2$  aufweisen. Mit Laserdiodenmodulen vergleichbare Strahlqualitäten erzielt man demzufolge für Spotzahlen ab einigen  $100 \times 100$  Spots. Vorteile dieses Optikkonzepts gegenüber der diffraktiven Strahlformung sind die Wellenlängenunabhängigkeit der Spotpositionen, die Vermeidung von Streulicht durch parasitäre Beugungsordnungen, die einfache Realisierbarkeit unregelmäßiger Spotmuster und die Möglichkeit der »Individualisierung« der Spots durch individuelles Einfärben mittels Farbfilterarrays. Wesentliche Nachteile sind die auf Grund des Arrayfüllfaktors geringere Systemtransmission, die geringere Tiefenschärfe bzw. erhöhte Spotgröße und die zusätzlich erforderliche Relayoptik. Der Einsatz eines gechirpten Linsenarrays /2/ erhöht die Attraktivität des Designansatzes durch die Vorkompensation der Aberrationen der Relayoptik.

LED reaches about  $M^2 \approx 1000$ , while the individual beams of a  $N \times N$  spot-array exhibit better beam quality by a factor of  $1/N$ . Thus, beam qualities comparable with laser diode modules can be achieved for spot arrays with some  $100 \times 100$  spots. Advantages of this design approach compared to diffractive beam splitters are wavelength-independent spot positions, avoidance of stray light from parasitic diffraction orders, simple realization of irregular spot patterns and the feasibility of "individualized" spots by using buried color filter-arrays. Important shortcomings are smaller system transmission from array fill-factor and collimation efficiency and the additional required relay optics. Using a chirped lens array /2/ increases the attractiveness of this design approach by precompensation of relay optics aberrations.



1 Optikschemata. / Optics scheme.



Ein 21 x 21 Spotarray mit einer Fächerdivergenz von 40° x 40° wurde als Demonstrator mit einer kollimierten weißen Hochleistungs-LED als Lichtquelle realisiert. Das Pupillensplitting erfolgt durch ein gechirptes Linsenarray mit ca. 500 µm Pitch und einer numerischen Apertur von 0,13 bis 0,18. Die tonnenförmig verzerrte Anordnung der Lenslets gleicht die kissenförmige Verzeichnung der Relayoptik aus (denkbar ist hier auch eine Keystone-Korrektur für geneigte Beleuchtungsebenen), die nach außen zunehmende Brennweite der Lenslets kompensiert die Bildfeldwölbung. Das ermöglicht eine extrem einfache Realisierung der Relayoptik mit nur einer Plankonvexlinse und einer ebenfalls plankonvexen Feldlinse (Abb. 2). Die z. B. für Anwendungen in der 3D-Vermessung interessante »Individualisierung« der Spots wurde durch unter den Lenslets vergrabene RGB-Farbfiler und die Unterdrückung von Streulicht durch ebenfalls vergrabene Blendenstrukturen erreicht (Abb. 3). Die Herstellung des Lensarrays erfolgt durch Abformung von Reflow-Arraymastern in Polymer auf die zuvor lithographisch strukturierten Filter- und Blendenstrukturen auf ein Floatglassubstrat [3]. Das projizierte 21 x 21 Spotarray (Abb. 4) weist eine Strahlqualität der einzelnen Bündel von  $M^2 < 60$  bei einer sehr geringen Verzeichnung von weniger als 0,5 % auf.

LED-Lichtquellen mit refraktiven, mikrooptischen Arraykomponenten stellen eine attraktive Alternative zu üblichen Laserdiodenmodulen für strukturierte Beleuchtungen dar. Die leistungsstarke, specklefreie und optional mehrfarbige Beleuchtung mit kostengünstigen Quellen erlaubt verbesserte bzw. gänzlich neue Systemkonzepte.

A 21 x 21 spot array with 40° x 40° ray fan divergence was realized with a collimated white high-power LED as light source. A chirped lens array with 500 µm pitch and lenslets with numerical aperture of 0.13 to 0.18 realizes the pupil splitting. The barrel-shaped placement of the lenslets compensates for the pincushion distortion of the relay optics – optional a keystone correction for tilted illuminated planes is possible. Increased focal widths of the off-axis lenslets corrects for field curvature. This enables an extremely simple relay optics layout consisting only of a plano-convex lens and an also plano-convex field lens, placed in front of the lens array (Fig. 2). Individualization of spots, which is attractive i.e. for 3D surface profile characterization, is realized by color filters buried beneath the lenslets (Fig. 3). Suppression of straylight is achieved by an aperture array also buried in the lens array. The lens array is manufactured by replication of reflow master structures into polymer on top of lithographically structured filter and aperture arrays on a float glass substrate [3]. The projected 21 x 21 spot array (Fig. 4) offers a beam quality of  $M^2 < 60$  of the individual spots and very small spot array distortion of less than 0.5 %.

LED light sources with refractive micro-optical components are a promising approach for the replacement of the usual laser diode modules for patterned illumination. The powerful, speckle-free and optional multi-colored illumination with cost-efficient modules enables advanced features in existing layouts and completely new system designs.

Die Autoren danken Ralf Rosenberger für die Konstruktion und Theresa Kunz für die Charakterisierung des Spotarray-generators. Diese Arbeit wurde vom BMBF im Rahmen des Projekts POLO unter FKZ 13N9396 gefördert.

The authors thank Ralf Rosenberger for the mechanical design and demonstrator assembly and Theresa Kunz for characterization of the spot-array generator. This work was funded by the BMBF in the framework of the project POLO under contract 13N9396.

#### **Literatur/References**

- /1/ Steegmüller, U.; Recent Progress in High Brightness LED Technology and Applications, SEMICON West, San Francisco, 2009.
- /2/ Wippermann, F.; Schreiber, P.; Chirped refractive microlens arrays, Photonik international 2/2008.
- /3/ Dannberg, P.; Wippermann, F.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Wafer-level fabrication of complex micro-optical modules, EOS Conferences at the World of Photonics Congress 2009, München.

## **AUTHORS**

*Peter Schreiber*

*Peter Dannberg*

*Frank Wippermann*

## **CONTACT**

*Dr. Peter Schreiber*

*Phone +49 3641 807-430*

*peter.schreiber@iof.fraunhofer.de*

*Dr. Andreas Bräuer*

*Phone +49 3641 807-404*

*andreas.braeuer@iof.fraunhofer.de*



## RAUHEITSSTRUKTUREN FÜR RESSOURCEN-SPARENDE BENETZUNGSEIGENSCHAFTEN

## ROUGHNESS STRUCTURES FOR RESOURCE-CONSERVING WETTING PROPERTIES

Eine Vielzahl von Oberflächen wird unter extensiver Verwendung von Chemikalien gereinigt. Beispiele dafür im Bereich Glasoberflächen sind u. a. Fensterscheiben, Duschkabinen, Spiegel und Optikkomponenten im Innen- und Außeneinsatz. Dies belastet in hohem Maße die Umwelt und könnte durch den Einsatz von Oberflächen mit einstellbaren Benetzungseigenschaften, bis hin zur Selbstreinigung (Abb. 1), erheblich reduziert werden. Neben der Reduktion der Belastung durch Reinigungsmittel liegt ein weiterer Schlüssel zur Ressourceneffizienz in einer effektiven Prozessgestaltung zur Herstellung derartiger Funktionsflächen.

Die Benetzung einer Oberfläche wird neben ihrer chemischen Natur wesentlich durch ihre Rauheit bestimmt. Rauheitsstrukturen im Mikrometer- und insbesondere im Nanometerbereich nehmen für die Funktionalität eine immer wichtigere Schlüsselrolle ein. Benetzungseigenschaften wie Ultrahydrophobie, Hydrophilie, Beschlagfreiheit etc. können über eine Vielfalt stochastischer, aber gezielt einzustellender Rauheiten erzeugt werden. Daraus folgt sowohl ein attraktives Potential technologischer Realisierungen als auch die Möglichkeit zur Verknüpfung mit optischer Qualität (z. B. für Glasoberflächen).

Various surfaces are cleaned with extensive use of chemicals. For glass surfaces this concerns e.g. windows, shower cubicles, mirrors as well as optical components for indoor and outdoor applications. This considerable environmental impact could be significantly reduced by employing surfaces with adjustable wetting properties all the way to self-cleaning (Fig. 1). Besides reducing the economical impact through reduction of detergents, efficient manufacturing process strategies constitute another main key to resource conservation.

It is the roughness of a surface that, besides chemical composition, essentially governs its wetting properties. Roughness structures in the micro- and nano-ranges are hence gaining more and more importance for realizing the desired functionalities. Ultra-hydrophobic, hydrophilic, and anti-fog features can be achieved by a variety of stochastic, but deliberately tailored roughness characteristics. This results in a promising potential for technically fabricating such structures. Moreover, it even allows for linking the functional properties with optical quality (e.g. for glass surfaces). At the same time, novel challenges arise for appropriate characterization methods as well as simulation and modelling techniques.

1 *Selbstreinigungseffekt an Glasoberfläche mit ultrahydrophober Beschichtung.*

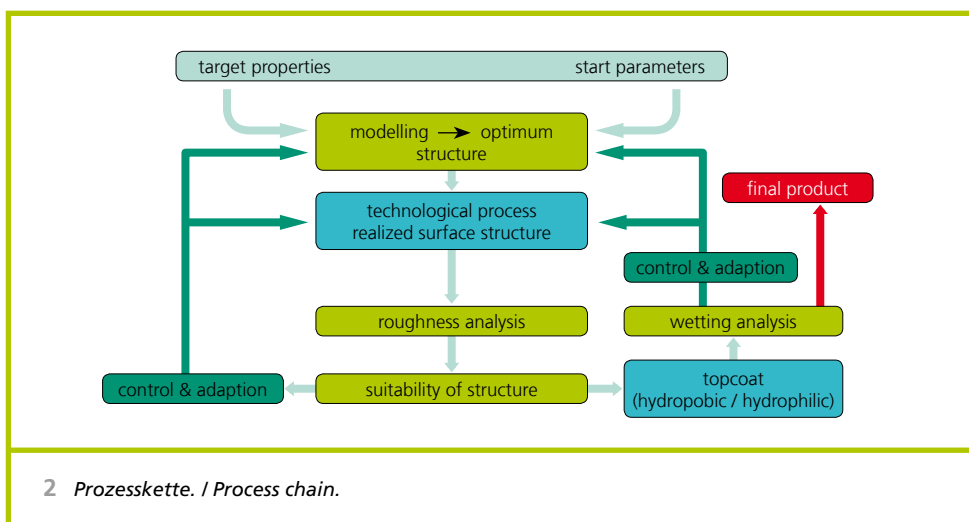
1 *Self cleaning effect on glass surface with ultra-hydrophobic coating.*

Damit verbunden sind neuartige Anforderungen an Charakterisierungsverfahren sowie Simulations- und Modellierungstechniken.

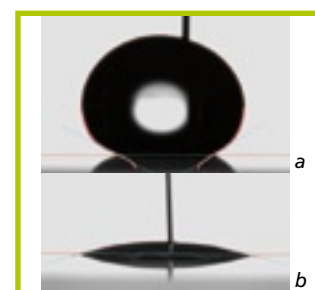
Um die Benetzungswirkung von Oberflächenstrukturen geeignet zu bewerten, ist die Kenntnis der relevanten Rauheitskomponenten der Struktur erforderlich. Am Fraunhofer IOF entwickelte flexible Modellierungsverfahren, Messtechniken und Analysemethoden /1/ ermöglichen nun sowohl die gezielte Vorgabe als auch die effiziente, belastbare Kontrolle von Rauheitsstrukturen für optimale Hydrophobie- und Hydrophilie-Eigenschaften. Dies können gängige Methoden zur Strukturbewertung durch Rauheitsparameter wie Rq, Ra etc. nicht leisten. Die direkte Verbindung von Simulation, Herstellungsprozess und Charakterisierung liefert die Grundlage für eine effektive Steuerung der gesamten Prozesskette (Abb. 2). Dadurch lassen sich umfangreiche technologische Prozessversuche und damit verbundener Energie- und Materialeinsatz maßgeblich reduzieren.

For appropriately assessing the wetting effects of surfaces structures, knowledge of the relevant roughness components is indispensable. With the flexible modelling, measurement and analysis tools developed at Fraunhofer IOF /1/ we are capable of predicting, defining and controlling roughness structures for optimal hydrophobic and hydrophilic properties. This cannot be accomplished by customary structure assessment methods using roughness parameters like Rq, Ra etc. The new direct link of simulation, fabrication and characterization constitutes a unique basis for efficiently triggering the entire process chain (Fig. 2).

With this approach, tailored wetting can be realized. This is represented e.g. by Sol-Gel coatings with adjustable nanoroughness for both ultra-hydrophobic and hydrophilic, anti-fog properties /2/. Figure 1 shows the self-cleaning effect of an accordingly fabricated ultra-hydrophobic surface after contamination by artificial soot. These surfaces exhibit advancing contact angles of 155° (Fig. 3a) and roll-off angles < 11°.



2 Prozesskette. / Process chain.



3 a) Ultrahydrophobe Oberfläche. / Ultra-hydrophobic surface.  
b) Hydrophile Oberfläche. / Hydrophilic surface.





Nach dem oben genannten Lösungsweg lassen sich beispielhaft Sol-Gel-Schichten mit Nanorauheiten sowohl für ultrahydrophobe als auch hydrophile, beschlagfreie Glasoberflächen /2/ realisieren. Abbildung 1 zeigt den Selbstreinigungseffekt einer so hergestellten ultrahydrophoben Oberfläche nach Belegung mit Rußpartikeln. Diese Funktionsflächen weisen Fortschreite-Kontaktwinkel von  $155^\circ$  (Abb. 3a) und Abrollwinkel  $< 11^\circ$  auf.

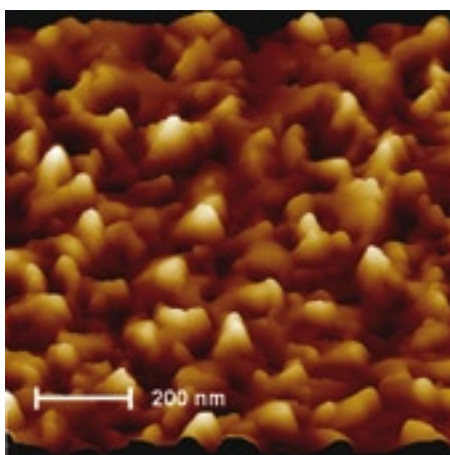
Gleichzeitig werden Streulichtverluste durch die gezielten Strukturvorgaben minimiert. Mit entsprechenden hydrophilen Oberflächen (Abb. 3b) lässt sich die in Abb. 4 deutliche Anti-Beschlagwirkung erzielen.

At the same time, as a result of the specific structural design, scattering losses are minimized. Corresponding hydrophilic surfaces (Fig. 3b) reveal the anti-fog effect demonstrated in Fig. 4.

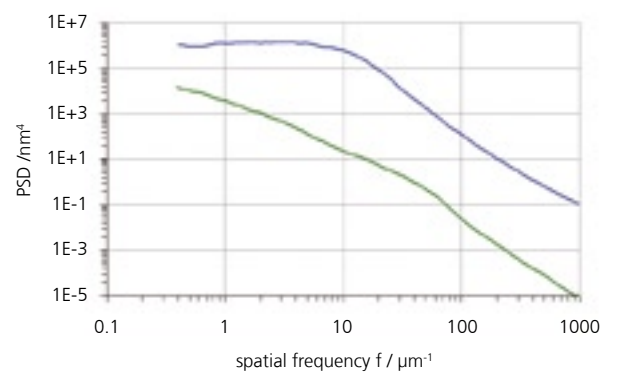
The nanostructure of the Sol-Gel coatings for both wetting types can be seen in Fig. 5, with subsequent roughness analysis through Power Spectral Density functions /3/ compared with the results for bare glass depicted in Fig. 6.

4 Beschlagtest: Banknote, betrachtet durch halbseitig hydrophil beschichtetes Glas (links: unbeschichtet, rechts: beschichtet).

4 Fogging-Test: bank note viewed through glass with (half-site) hydrophilic coating (left: uncoated; right: coated).



5 Nanostruktur der Sol-Gel-Schicht. / Nanostructure of the Sol-Gel coating.



6 PSD-Funktionen eines Glassubstrats (grüne Kurve) und einer Sol-Gel-Schicht (blaue Kurve). / PSD-functions of glass substrate (green graph) and Sol-Gel coating (blue graph).

Die Nanostruktur der Schichten für beide Benetzungsarten zeigt die AFM-Aufnahme in Abb. 5, die nachfolgende Rauheitsanalyse durch Power-Spectral-Density-Funktionen /3/ im Vergleich zum unbeschichteten Glas ist in Abb. 6 dargestellt.

Andere attraktive technologische Realisierungsmöglichkeiten des Lösungsweges werden derzeit u. a. auf der Basis rauer Sputterschichten entwickelt /4/. Weitere gegenwärtige Arbeiten betreffen die Ausdehnung der Methodik auf Rauheitsstrukturen funktionaler Metalloberflächen zur Reduktion von Kraftstoff- und Schmiermitteln /5/.

Other promising ways to implement the approach are currently being developed on the basis of rough sputtered coatings /4/. Further activities focus on extending the methodology to roughness structures of functional metal surfaces for fuel and lubricant reduction /5/.

#### **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/ ETC Products GmbH im gemeinsamen Förderprojekt der Bayerischen Forschungstiftung, PHYSIS: Photonen-unabhängige hydrophile Schichten auf Glas.

/3/ Duparré, A.: Characterization of Surface and Thin-Film Roughness using PSD Functions, OSA Topical Meeting on Optical Fabrication and Testing, Rochester (2008), Tagungsband.

/4/ BMBF-Verbundprojekt KRONOS: Kratz- und schmutzresistente geformte Glasoberflächen durch steuerbar nanostrukturierte Sputterschichten.

/5/ BMBF-Verbundprojekt SmartSurf: Funktionale Laser-Mikrostrukturierung zur Verschleiß- und Verbrauchsreduktion hochbeanspruchter Bauteiloberflächen.

## **AUTHORS**

*Luisa Coriand*

*Monika Mitterhuber<sup>1</sup>*

*Angela Duparré*

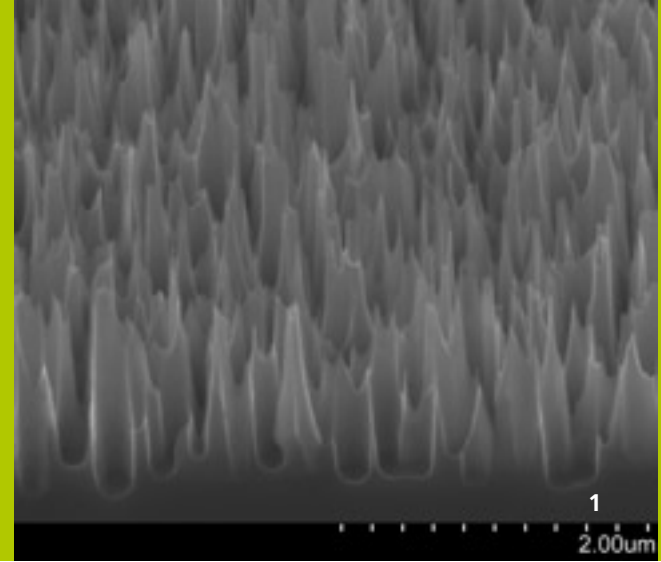
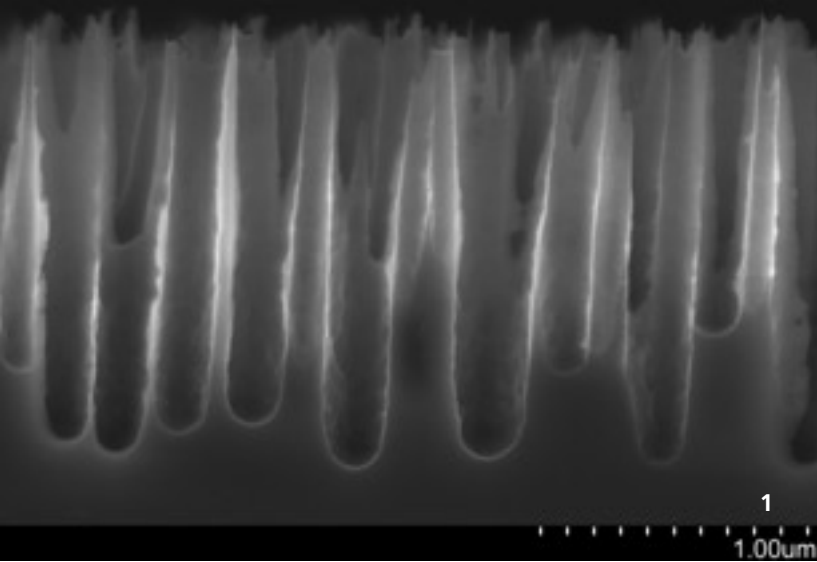
*<sup>1</sup>ETC PRODUCTS GmbH*

## **CONTACT**

*Dr. Angela Duparré*

*Phone +49 3641 807-216*

*angela.duparre@iof.fraunhofer.de*



## NANOSTRUKTURIERTE SIS-SOLARZELLEN

### NANOSTRUCTURED SIS SOLAR CELLS

Die Photovoltaikbranche steht vor der großen Herausforderung, ihr Nischendasein im deutschen und europäischen Energiemix zu verlassen und einen bedeutenden Anteil des zukünftigen Energiebedarfs bereitzustellen. Um die hohen nationalen und internationalen Ziele zu erreichen, wird derzeit intensiv an innovativen Herstellungstechnologien und optimierten Prozessen geforscht.

Einen vielversprechenden Ansatz für eine schnelle und einfache Herstellung von Solarzellen bietet der so genannte Semiconductor–Insulator–Semiconductor (SIS) Aufbau. Dabei wird ein dünner Isolator auf dotiertes Silizium aufgebracht und anschließend mit einem transparenten leitfähigen Oxid (TCO), wie z. B. Indiumzinnoxid (ITO) oder Aluminium-dotiertem Zinkoxid (AZO), überschichtet. Bei geeigneter Wahl der Siliziumdotierung und optimierter Prozessführung führen die unterschiedlichen Elektronenaustrittsarbeiten der Materialien zur Invertierung und letztendlich zur Erzeugung eines pn-Übergangs im Silizium. Aufgrund der geringen Absorption im sichtbaren bzw. nahen infraroten Spektralbereich und der hohen Leitfähigkeit der TCOs bilden diese ein transparentes Fenster für die einfallende solare Strahlung und können gleichzeitig als Frontelektrode eingesetzt werden.

The photovoltaic industry faces the challenge of departing from its niche existence in the German and European energy market to provide a significant part of future energy demands. Currently, research is concentrated on innovative fabrication technologies and optimized processes to achieve the high national and international goals.

A promising approach for rapid and simple fabrication of solar cells is the so-called semiconductor – insulator – semiconductor (SIS) system. Here, a thin insulator is coated on doped silicon, followed by the deposition of a transparent conductive oxide (TCO), e.g. indium tin oxide (ITO) or aluminum doped zinc oxide (AZO). With the appropriate choice of the silicon doping and optimized process conditions, the different work functions of the materials lead to the inversion and the formation of a p-n junction within the subsurface of the silicon surface. Due to the low absorption in the visible and near infrared spectral range and the high conductivity of the TCOs, these act as a transparent window for the incident solar irradiance and can be used as front electrode at the same time.

1 REM-Aufnahmen einer strukturierten Siliziumgrenzfläche.

1 SEM-micrographs of a structured silicon surface.

Da die TCOs einen Brechungsindex im Bereich von 2 haben, eignet sich diese Materialklasse zur Entspiegelung von Silizium. Aufgrund von Interferenzeffekten ist dies jedoch nur beim Erfüllen der Phasenbedingung, d. h. bei bestimmten Wellenlängen, gewährleistet. Da mehrschichtige Interferenzsysteme aus hoch- und niedrigbrechenden Materialien erhöhte Herstellungskosten verursachen und eine starke Winkelabhängigkeit implizieren, müssen möglichst breitbandige, winkelunabhängige und vor allem kostengünstige Alternativen erforscht werden. Eine bekannte Lösung für die Erzeugung von breitbandigen Entspiegelungen ist der Einsatz von nanostrukturierten Grenzflächen. Ein mögliches Verfahren zur Strukturierung von Silizium ist das induktiv gekoppelte Plasmaätzen. Bei diesem reaktiven Ätzprozess bewirkt ein Gemisch aus Sauerstoff und Schwefelhexafluorid  $SF_6$  die stochastische Strukturierung der Oberfläche, wobei die Strukturgeometrie durch die Prozessparameter variiert werden kann. In Abb. 1 sind typische rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von strukturierten Siliziumgrenzflächen dargestellt. Je nach vorliegender Strukturgeometrie kann die Fresnelreflexion der entstandenen Grenzfläche in einem breiten Spektralbereich auf unter ein Prozent gesenkt werden, siehe Abb. 2. Die dadurch erzeugten Grenzflächen werden nun mit dem SIS-System überschichtet und erlauben damit die Realisierung eines innovativen Zellkonzepts /1/. Sowohl der Plasmaätz- als auch der Sputterprozess werden auf skalierbaren und industrietauglichen Anlagen durchgeführt.

Abbildung 3 zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie einer unstrukturierten und einer strukturierten SIS-Solarzelle unter AM1,5G Beleuchtung mit  $1000 \text{ W/m}^2$ . Das aufgebrachte SIS-System wurde mittels gepulstem DC Magnetronsputtern realisiert, wobei als TCO Indiumzinnoxid (ITO) mit einer Schichtdicke von ca. 550 nm abgeschieden wurde.

As a result of a refractive index in the range of 2, the transparent conductive oxides are suitable as antireflection coating for silicon. Due to interference effects, the AR properties can only be achieved if the phase condition is fulfilled, i.e. at special wavelengths. Because of increasing fabrication costs and strong angle dependency in the use of multilayer stacks of high and low refractive index materials, other broadband, angle-independent and above all cost-effective alternatives have to be investigated. One known solution for the generation of broadband antireflection surfaces is the use of nanostructured surfaces. A possible technique for the structuring of silicon is etching by an inductive coupled plasma (ICP). During this reactive etching process a mixture of oxygen and sulfur hexafluoride  $SF_6$  leads to the stochastic structuring of the surface, whereas the structure geometry can be varied by the process conditions. Figure 1 shows typical SEM-micrographs of structured silicon surfaces. Depending on the structure geometry, the Fresnel reflection of the realized surface can be decreased below one percent in a broadband spectral range, see Fig. 2. After the etching process, the generated surface is covered by the SIS system to create an innovative cell concept /1/. Both the plasma etching as well as the sputtering process are executed on industry-standard machines.

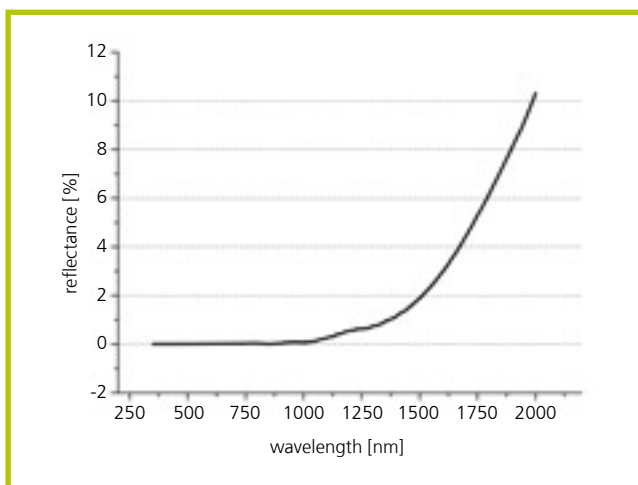
The current-voltage characteristic under  $1000 \text{ W/m}^2$  AM1.5G spectra of a structured and unstructured SIS device is shown in Fig. 3. The SIS system was deposited by pulsed DC magnetron sputtering, whereas ITO with a thickness of approximately 550 nm was used as transparent conductive oxide. Due to the structuring of the silicon surface and the light trapping of the incident irradiance, the nanostructured solar cell exhibits with  $24.05 \text{ mA/cm}^2$  a higher short circuit current compared to the unstructured device with  $20.22 \text{ mA/cm}^2$ .

Infolge der Strukturierung und der effektiven Einkopplung der einfallenden Strahlung liefert die nanostrukturierte Zelle einen höheren Kurzschlussstrom als die unstrukturierte Vergleichszelle: 24,05 mA/cm<sup>2</sup> bzw. 20,22 mA/cm<sup>2</sup>. In Folge der guten Leitfähigkeit der dünnen ITO-Schichten liegt der Füllfaktor der Zellen bei 0,65 für das strukturierte und 0,71 für das unstrukturierte Bauelement. Aufgrund der geringen Sperrspannung von 420 mV bei der strukturierten Zelle bzw. 460 mV bei der unstrukturierten Zelle liegt der Wirkungsgrad der 0,8 cm<sup>2</sup> und 1 cm<sup>2</sup> großen Laborzelle bei 6,6 % bzw. 6,9 %.

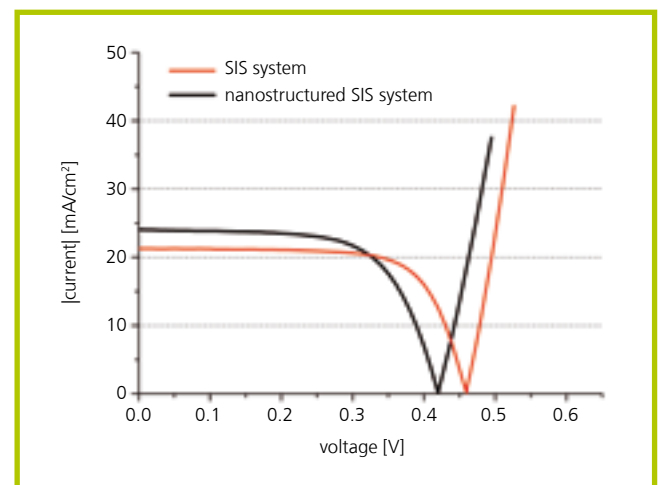
Ziel der aktuellen Forschung ist es, die Eigenschaften dieses neuen und innovativen Zellkonzepts weiterhin zu verbessern und das Potential bezüglich der einfachen Massenfertigung von Solarzellen zu evaluieren.

Because of the high conductivity, the fill factor reaches 0.65 for the structured and 0.71 for the unstructured solar cell. As a result of the low open circuit voltage of 420 mV for the 0.8 cm<sup>2</sup> structured and 460 mV for the 1 cm<sup>2</sup> unstructured solar cell, the efficiency is in the range of 6.6 % and 6.9 %, respectively.

The further improvement of the electrical properties and the potential analysis of the simple mass production process of the innovative solar cell concept is the goal of the current research.



**2** *Fresnelreflexion der strukturierten Siliziumgrenzfläche. / Fresnel reflectance of a structured silicon surface.*



**3** *Strom-Spannungs-Kennlinie einer strukturierten und unstrukturierten SIS-Solarzelle. / Current-voltage characteristic of a structured and unstructured SIS device.*

Unser Dank gilt dem BMBF für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojekts PHIOBE (FKZ 13N9669).

We would like to thank the BMBF for financial support of this work within the project PHIOBE (FKZ 13N9669).

#### **Literatur/References**

/1/ DE102007024478A1 (2007).

## **AUTHORS**

*Kevin Füchsel<sup>1,2</sup>*

*Ulrike Schulz<sup>1</sup>*

*Norbert Kaiser<sup>1</sup>*

*Thomas Käsebier<sup>2</sup>*

*Ernst-Bernhard Kley<sup>2</sup>*

*Andreas Tünnermann<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Fraunhofer IOF*

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

## **CONTACT**

*Kevin Füchsel*

*Phone +49 3641 807-273*

*kevin.fuechsel@iof.fraunhofer.de*



## ULTRAPRÄZISE METALLSPIEGEL FÜR EIN NEUARTIGES ROTIERENDES TELESKOP

## ULTRA-PRECISE METAL MIRRORS FOR A NOVEL ROTARY TELESCOPE

Moderne weltraumtaugliche Teleskope für die Planeten-erkundung und Erdbeobachtung benötigen komplexe optische Spiegel. Dabei bilden meist Sphären und Asphären ein Teleskop. Aktuell werden im Optikdesign bereits Freiformelemente (optische Flächen ohne Symmetrie) eingesetzt. Die Kombination ultrapräziser Diamantbearbeitung mit genauen Polierverfahren erweitert die Anwendung von Spiegeloptiken für den Spektralbereich von IR bis UV.

METImage ist das Konzept eines neuartigen abbildenden Multispektral-Radiometers für die meteorologische Anwendung, das in einem Nachfolge-Satellitensystem zum derzeitigen EUMETSAT Polar System (EPS) zum Einsatz kommen soll. Das Kernstück des METImage-Konzepts ist ein technologisch neuartiges rotierendes Teleskop, welches von Wissenschaftlern des Unternehmens JENOPTIK entworfen wurde (Abb. 2). Das Instrument registriert das von Erdoberfläche, Atmosphäre und Wolken reflektierte, beziehungsweise gestreute Sonnenlicht in mehreren spektralen Kanälen vom sichtbaren bis zum thermischen Infrarot-Spektralbereich /1/.

Modern space telescopes for the investigation of planets and earth observation need mirrors with complex optical shapes. State of the art telescopes tend to use spheres as well as aspheres. Sophisticated designs are increasingly using freeform elements (optical surfaces without symmetry). In this context, the combination of ultra-precise diamond turning and exact polishing procedures extends the use of reflecting optics for the spectral range from IR to UV.

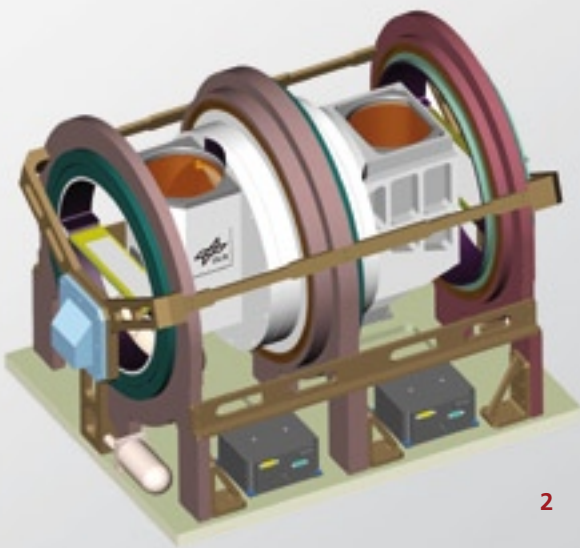
METImage is a novel telescope concept of a multi-spectral radiometer with a large swath width and a ground sampling distance of < 1km. This telescope is intended for meteorological application which will be used in a succession-satellite system to the present EUMETSAT Polar system (EP). The main idea of the METImage concept is a novel rotary telescope designed by scientists at JENOPTIK (Fig. 2). The instrument registers the light which is reflected by the earth's surface, the atmosphere, clouds or scattered sunlight in several spectral canals from visible up to the thermal infrared spectral range /1/.

1 *Freiformspiegel.*

2 *Das METImage Instrument /1/. ©Jena-Optronik GmbH.*

1 *Freeform mirror.*

2 *Model of METImage Instrument /1/. ©Jena-Optronik GmbH.*



Für neuste Teleskope wird der Designansatz eines athermalen, mechanisch stabilen und zugleich massereduzierten Aufbaus der Spiegel und der Teleskopstruktur verfolgt.

Unter Beachtung der Anforderungen an die Spiegel wie hohe Formgenauigkeit, geringe Rauheit und Ausschluss von periodischen Störungen, wurde die Kombination einer Aluminiumlegierung mit einer polierbaren Dickschicht aus Nickel-Phosphor (NiP) untersucht. Die Nickelschicht bildet unter dem Zusatz von 10 bis 12 % Phosphor ein amorphes Gefüge aus. Die NiP-Legierung wird chemisch abgeschieden und ermöglicht zugleich die ultrapräzise Diamantbearbeitung, das chemisch-mechanische Polieren und die ionengestützte Formkorrektur /2/.

Durch den Einsatz einer thermisch an NiP angepassten Aluminiumlegierung AlSi42 treten keine bzw. vernachlässigbar kleine thermische Effekte auf /3/. AlSi42 ist eine Aluminium-Silizium-Legierung mit einem Anteil Silizium von 42 % und einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $\sim 13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Dieser hohe Siliziumanteil führt zu einer signifikanten Erhöhung des Elastizitätsmoduls und zu einer Reduzierung der Masse im Vergleich zu Al6061 (allgemein als Flugaluminium bekannt). Eine Simulation des thermisch induzierten Bimetalleffekts ist für einen Spiegel des METimage Teleskops in Abb. 3 dargestellt.

Am Fraunhofer IOF wurden für verschiedenste Teleskope plane, sphärische und asphärische Spiegel mittels Diamantbearbeitung und Poliertechnik gefertigt (Abb. 4) /2/. In Zusammenarbeit mit der Carl Zeiss Jena GmbH wurden Asphären und Freiformspiegel für den visuellen Spektralbereich hergestellt (Abb. 1). In Abhängigkeit von der Anwendung erfolgt die Vergütung der Spiegel mit speziellen, patentierten Schichtsystemen für eine optimale Reflexion im gewünschten Spektralbereich.

It fulfils user requirements for measurements of physical parameters in the atmosphere, of the sea surface and of the land surface to assess meteorologically relevant states.

The design of next generation telescopes is based on an athermal, mechanically stable and light-weight construction of the mirrors as well as the whole telescope structure. This will be realized by the use of an identical material for both the mechanical structure and the optic. Considering the mirror requirements like high quality surface flatness, low roughness and no periodical structures, a combination of an aluminum-silicon alloy (AlSi42) with a polishable metal layer (electroless nickel-phosphorus) will be used. Besides ultra-precise manufacturing techniques like single point diamond turning (Fig. 4), the amorphous nickel phosphorus alloy permits post-polishing processes like chemical-mechanical polishing or ion beam polishing /2/.

The novel, patented material combination matches the CTE of electroless nickel by using an aluminium alloy with a high silicon content (mass 42 %) as mirror substrate /3/. Besides the harmonization of the CTE ( $\sim 13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), considerable advantages arise in terms of the specific stiffness. The E-Module of AlSi42 is significantly higher and the mass is lower in relation to the typical space material Al6061. Figure 3 shows a simulation of the bi-metal effect of an athermal mirror.

Flat, spherical and aspherical mirrors for a great variety of telescopes were developed at Fraunhofer IOF (Fig. 4) /2/. For instance, aspherical and freeform mirrors for the visual wavelength were realized in cooperation with Carl Zeiss Jena GmbH (Fig. 1). Depending on the application, the optical surface will be covered with a special layer sequence for optimal reflectance in the desired spectral range.





Die Spiegeloptik für ein rotierendes Teleskop wird gegenwärtig in Zusammenarbeit mit der JENOPTIK und im Auftrag der DLR entwickelt. Die Basis ist ein Three-Mirror-Anastigmat (TMA) Teleskop.

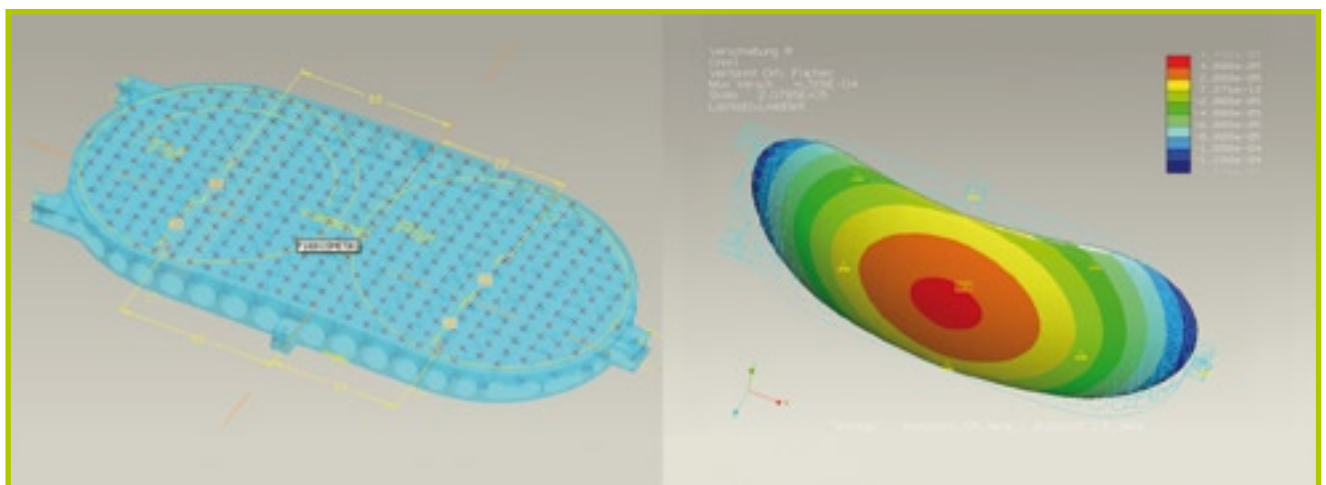
The reflective optics for the novel rotary telescope is based on a Three-Mirror-Anastigmat (TMA) Telescope. It is under development in cooperation with JENOPTIK.

Die Arbeiten zum rotierenden Teleskop werden durch die DLR unter dem Kennzeichen 50 EE 0926 gefördert.

This work is supported by the German Aerospace Center DLR and listed under number 50 EE 0926.

4 *Diamantdrehen eines Teleskopspiegels.*

4 *Single point diamond turning of an aspherical mirror.*



3 *Leichtgewichtdesign und FEM-Simulation des Bimetalleffekts eines athermalen Spiegels. / Lightweight mirror design and FEM-Simulation of bi-metallic effect of an athermal mirror.*

## Literatur/References

/1/ [http://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/  
tabid-2440/3586\\_read-10140/](http://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2440/3586_read-10140/).

/2/ Steinkopf, R. et al; Metal Mirrors with Excellent Figure and Roughness. SPIE Proceedings Vol. 7102 (2008) p.71020C-71020C-12, ISBN 978-0-819-47332-5.

/3/ Rohloff, Gebhardt, A.; Damm, Ch.; Peschel, T.: Patent DE 10 2005 026 418. Spiegelträger für einen optischen Spiegel.

## AUTHORS

*Stefan Risse*

*Andreas Gebhardt*

*Christoph Damm*

*Robert Jende*

*Ralf Steinkopf*

*Sandra Müller*

*Alexander Pillukat<sup>1</sup>*

*Matthias Merschdorf<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Jena-Optronik GmbH*

## CONTACT

*Dr.-Ing. Stefan Risse*

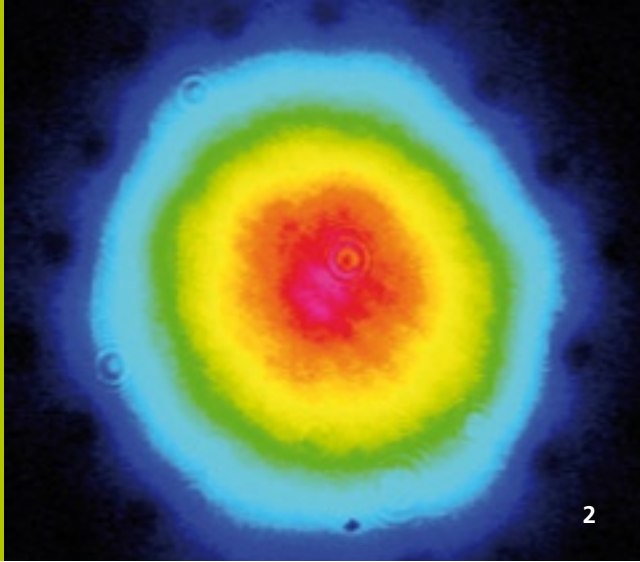
*Phone +49 3641 807-313*

*stefan.risse@iof.fraunhofer.de*

*Dr. Ramona Eberhardt*

*Phone +49 3641 807-312*

*ramona.eberhardt@iof.fraunhofer.de*



## ULTRAKURZPULS-LASER MIT 830 W DURCHSCHNITTSLEISTUNG

## ULTRA-SHORT PULSE LASER WITH 830 W AVERAGE POWER

Faserlaser und -verstärker können heute hocheffizient Laserstrahlung im nahen Infrarot erzeugen, deren Durchschnittsleistung im Multi-Kilowatt-Bereich liegt. Da hierbei das Licht in einer Wellenleiterstruktur propagiert, wird im Gegensatz zu den meisten anderen Laserarchitekturen, selbst bei diesen extremen Leistungen, eine exzellente Strahlqualität beibehalten. Im kontinuierlichen Betrieb existieren bereits interessante Quellen, welche für die energieeffiziente Produktion eingesetzt werden. Mit der Übertragung dieses Konzepts auf gepulste Systeme, die neben der Durchschnittsleistung eine hohe Puls-spitzenleistung erzeugen, stehen nun erstmals effiziente Laser für die Mikromaterialbearbeitung zur Verfügung. Auch ist die Anwendung dieser Systeme in der Grundlagenforschung sehr interessant. Derzeit prominentestes Beispiel ist die Erzeugung hoher Harmonischer, d. h. eine Frequenzvervielfachung durch Wechselwirkung von Laserpulsen extremer Feldstärken mit Materie, und deren Anwendung in Spektroskopie, linsenlosen Abbildungsverfahren oder Attosekunden-Physik /1,2/. Trotz ihrer einzigartigen Eigenschaften ist die Erzeugung dieser hohen Harmonischen extrem ineffizient. Demzufolge kann durch jedes zusätzlich vorhandene Photon des verwendeten Ultrakurzpuls-Lasers der Nutzen erheblich erhöht werden.

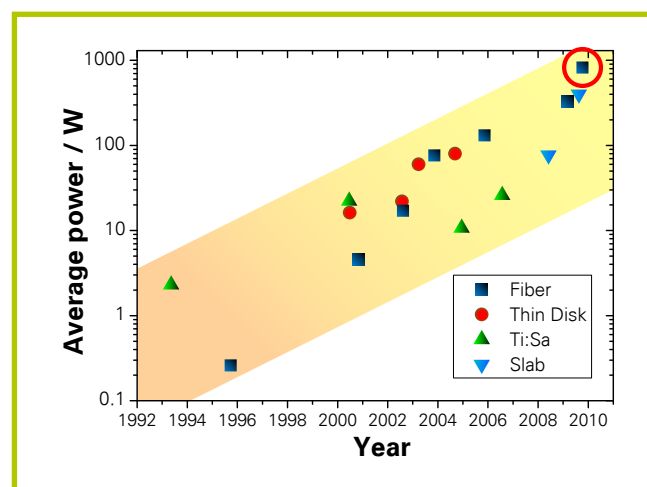
2 Strahlprofil einer Großkernfaser.

Today, fiber based lasers and amplifiers are capable of efficiently producing radiation with multi-kilowatt average power. Since light is propagating inside a waveguide structure, and in contrast to most of the other laser architectures, the excellent beam quality remains unaffected even at these power levels. In continuous wave operation sources that are interesting for energy efficient production already exist. By adapting this concept to pulsed systems, producing high average powers and high peak powers, for the first time efficient laser systems become available for micro machining. Additionally, application of these lasers in fundamental science can be very interesting. One prominent example is the generation of high harmonics, i.e. frequency up-conversion by interaction between high power laser pulses and matter, and the subsequent application of this short wavelength radiation in spectroscopy, lensless imaging and attosecond science /1,2/. Despite the unique properties, high harmonic generation suffers from poor efficiencies and its usability is increased with every additional photon from the driving ultra-short pulse laser.

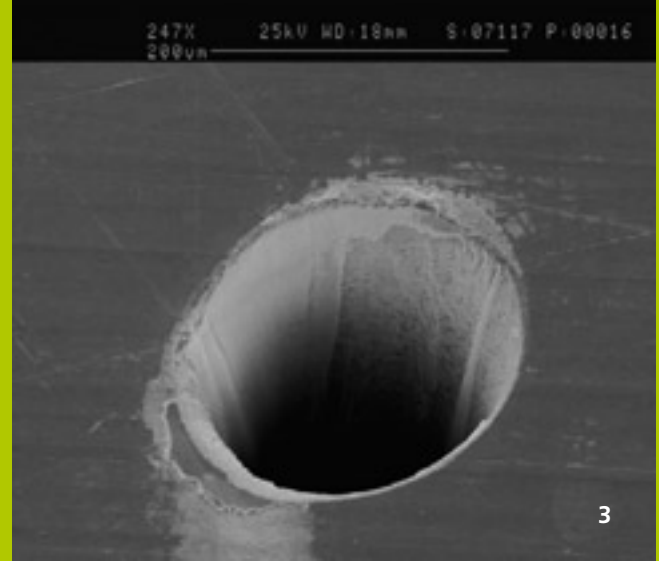
2 Beam profile of a large mode area fiber.

2009 wurde nun ein Meilenstein der Laserentwicklung durch die Demonstration eines faserbasierten »chirped pulse amplification« Systems mit 830 W Durchschnittsleistung erreicht /3/, ein Rekord auf dem Gebiet der Festkörperlaser (Abb. 1). Startpunkt des Systems ist ein modengekoppelter Femtosekunden-Oszillator, der 200 fs Pulse bei einer Zentralwellenlänge von 1042 nm und eine Pulsfolgefrequenz von 78 MHz emittiert. Um die Intensität in den Verstärkern zu reduzieren und somit störende nichtlineare Effekte zu vermeiden, werden die Pulse anschließend mit Hilfe eines Gitterstreckers auf 800 ps gestreckt. Nun wird das Signal effizient mit Hilfe von drei Faserverstärkern von wenigen Milliwatt auf 950 W verstärkt. Die entsprechende Pulsenergie beträgt 12,2  $\mu$ J. Schließlich werden die Pulse auf 640 fs Pulsdauer und 830 W Durchschnittsleistung durch einen auf hocheffizienten, dielektrischen Gittern basierten Kompressor komprimiert /4/. Die gemessene Strahlqualität beträgt bei diesem Leistungslevel  $M^2 < 1,3$ .

In 2009 a milestone in laser development was achieved by demonstrating a fiber chirped pulse amplification system with 830 W of average power /3/, a record value for ultra-short pulse solid-state lasers (Fig 1). Frontend of the system is a passively mode-locked femtosecond oscillator producing 200 fs pulses at a central wavelength of 1042 nm and 78 MHz pulse repetition frequency. In order to reduce the intensity and to avoid detrimental nonlinear effects inside the amplifier fibers these pulses are stretched in time to about 800 ps using a dielectric grating stretcher. Now, three single-pass fiber amplifier stages efficiently increase the signal power from the milliwatt-level to 950 W signal average power. The corresponding pulse energy is 12.2  $\mu$ J. Finally, these pulses are compressed down to 640 fs duration at 830 W average power with a grating compressor based on high-efficiency dielectric reflection gratings /4/. The beam quality of the main amplifier was measured to be  $M^2 < 1.3$  at this power level.



1 Entwicklung der Durchschnittsleistung von Ultrakurzpuls-Systemen. / Development of the average output power from ultra-short pulse laser systems.



Diese Parameter sind ein wichtiger Schritt in Richtung eines Ultrakurzpuls-Lasers mit 1 kW Durchschnittsleistung und 1 mJ Pulsenergie. Sie zeigen nicht nur die herausragende Leistungsfähigkeit von faserbasierten Ultrakurzpuls-Systemen, sie ermöglichen weiterhin Verbesserungen in vielen bereits etablierten Produktionsprozessen als auch komplett neue Ultrakurzpuls-Anwendungen.

Um die Überlegenheit dieser faserbasierten Ultrakurzpuls-Systeme in der Mikromaterialbearbeitung zu demonstrieren, wurden Bohrversuche in verschiedenen Metallen durchgeführt /5/. Üblicherweise ist die Qualität der Bearbeitungsergebnisse beim Einsatz herkömmlicher Laser durch thermisch oder mechanisch induzierte Schäden (Aufschmelzen, Grat- und Rissbildung, Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit etc.) limitiert.

Die Verwendung ultrakurzer Pulse hingegen bewirkt eine Verbesserung der Bearbeitungsergebnisse aufgrund der fundamental unterschiedlichen Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. So wird die Laserenergie sehr schnell von den Elektronen aufgenommen, während das Ionengitter »kalt« bleibt. Nach dem Puls wird diese Energie an das Gitter abgegeben, was zu einer Vaporisierung führt. Durch Hitze entstehende, negative Auswirkungen werden weitestgehend minimiert. Abbildung 3 zeigt die Mikroskopaufnahme eines Bohrlochs, welches durch Trepanieren in 0,5 mm dickem Kupfer bei 800 fs Pulsdauer, 1 MHz Pulswiederholrate und 50  $\mu$ J Pulsenergie erzeugt wurde. Die Durchbruchzeit betrug hierbei nur 75 ms.

These parameters are an important step towards the goal of a 1 kW average power and 1 mJ pulse energy system.

They do not only demonstrate the outstanding performance of ultra-short pulse fiber systems, they also allow for improvements in many existing applications and will enable completely new ultra-short pulse laser applications.

In order to demonstrate the applicability of these high repetition rate systems for micromachining, drilling experiments with different metals were done /5/. Here, the processing with conventional laser sources is typically limited by thermal or mechanical damage (melting, formation of burr and cracks, changes in the morphology etc.). Applying ultra-short pulses results in an improved hole quality due to the fundamentally different interaction mechanism between laser radiation and matter. Here the laser energy is deposited very fast in the electronic subsystem, while the ionic lattice remains practically cold. Mainly after the laser pulse, a fast energy transfer to the lattice is taking place resulting in vaporization. Hence, the generation of molten material and heat affected zones is minimized. Figure 3 shows a scanning electron microscope image of a hole drilled in 0.5 mm thick copper using the trepanning technique and 800 fs pulses at a repetition rate of about 1 MHz and 50  $\mu$ J pulse energy. The breakthrough time was only 75 ms.

**3** Bohrloch in 0,5 mm dickem Kupfer. Die Bearbeitungszeit betrug 75 ms.

**3** Drilled hole in 0.5 mm thick copper with 75 ms breakthrough time.

## Literatur/References

/1/ Goulielmakis, E.; Yakovlev, V. S.; Cavalieri, A. L.; Uiberacker, M.; Pervak, V.; Apolonski, A.; Kienberger, R.; Kleineberg, U.; Krausz, F.: Attosecond Control and Measurement, Lightwave Electronics, Science 317 (2007).

/2/ Krausz, F.; Ivanov, M.: Attosecond physics, Rev. Mod. Phys. 81 (2009).

/3/ Eidam, T.; Hanf, S.; Seise, E.; Andersen, T.; Gabler, T.; Wirth, C.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power, Opt. Lett. 35, 94-96 (2010).

/4/ Bunkowski, A.; Burmeister, O.; Clausnitzer, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Danzmann, K.; Schnabel, R.: Optical characterization of ultrahigh diffraction efficiency gratings, Appl. Opt. 45, 5795-5799 (2006).

/5/ Ancona, A.; Röser, F.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: High speed laser drilling of metals using a high repetition rate, high average power ultra fast fiber CPA system, Opt. Express 16, 8958-8968 (2008).

## AUTHORS

*Tino Eidam*<sup>1</sup>

*Stefan Hanf*<sup>1</sup>

*Enrico Seise*<sup>1</sup>

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

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

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

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

<sup>2</sup> Fraunhofer IOF

## CONTACT

*Dr. Jens Limpert*

*Phone: +49 3641 947 811*

*jens.limpert@iof.fraunhofer.de*



## INFORMATION UND SICHERHEIT

Durch Lösungen mit Licht ...  
... Informationsfluss optimieren  
und Sicherheit generieren.

## INFORMATION AND SAFETY

Solutions with light ...  
... optimize information flows and  
generate safety.



Informations- und Kommunikationstechnologien – allen voran das Internet – haben unser Leben nachhaltig verändert und sich als wegweisend für Unternehmen, Mensch und Gesellschaft erwiesen. Das Licht wird dabei immer mehr zur entscheidenden Komponente. Bereits jetzt werden über 90 % aller Informationen mit Hilfe von Licht transportiert. Und auch zukünftig werden optische Netzwerke mit Übertragungsraten im Terabitbereich die enormen und stetig wachsenden Datenmengen bewältigen. Neben der Übertragung von Informationen ist auch deren Visualisierung eine Domäne der Photonik. Das Spektrum reicht dabei von großformatigen Displays über integrierte Bildschirme in elektronischen Geräten bis hin zu energiesparenden und flexiblen OLED-Displays. Photonische Technologien sind entscheidend für die Herstellung der zukünftigen Generation von Computerchips mit kleinsten Strukturbreiten von 22 nm. Dies garantiert die Einhaltung des Taktes der Halbleiterindustrie, des Mooreschen Gesetzes, das die Verdopplung der Zahl der Transistoren pro Chip alle zwei Jahre in Aussicht stellt.

Neben der Information stellt das Grundbedürfnis der Menschen nach Sicherheit völlig neue Herausforderungen an Wissenschaft und Unternehmen. Leistungsstarke und intelligente photonische Sensoren bieten adäquate Lösungen, sowohl wenn es um den Kampf gegen globale Bedrohungen als auch um die Erhöhung der Sicherheit im Alltag geht. Beispiele hierfür sind auf Licht basierende biometrische Systeme, die für Sicherheit an Flughäfen und öffentlichen Plätzen sorgen oder auch Fahrerassistenz- und Nachtsichtsysteme im Automobil zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr.

Lösungen mit Licht stehen für bessere Informationstechnik und Erhöhung der Sicherheit.

Information and communication technology – primarily the internet – has permanently changed our lives and proven to be pioneering for businesses, man and society. Light is increasingly becoming the crucial component. Today, over 90 % of all information is already transported with the help of light. In future, too, optical networks with transmission rates in the terabit range will handle the enormous and constantly growing amounts of data. Alongside the transmission of information, its visualization is a domain of photonics. The spectrum ranges from large-format displays via integrated monitors in electronic equipment to energy-saving and flexible OLED displays. Photonic technologies are essential for the manufacture of future generations of computer chips with the smallest feature size of 22 nm. This guarantees an adherence to the cycles of the semiconductor industry, Moore's law, which sees a doubling in the number of transistors per chip every two years.

In addition to information, people's basic need for safety present completely new challenges for science and business. Powerful, intelligent photonic sensors offer suitable solutions, both in the fight against global threats and in increasing safety in everyday life. Examples here include biometric systems based on light, which provide safety at airports and in public places, or driver assistance/night vision systems to increase road traffic safety.

Solutions with light represent better information technology and an increase in safety.





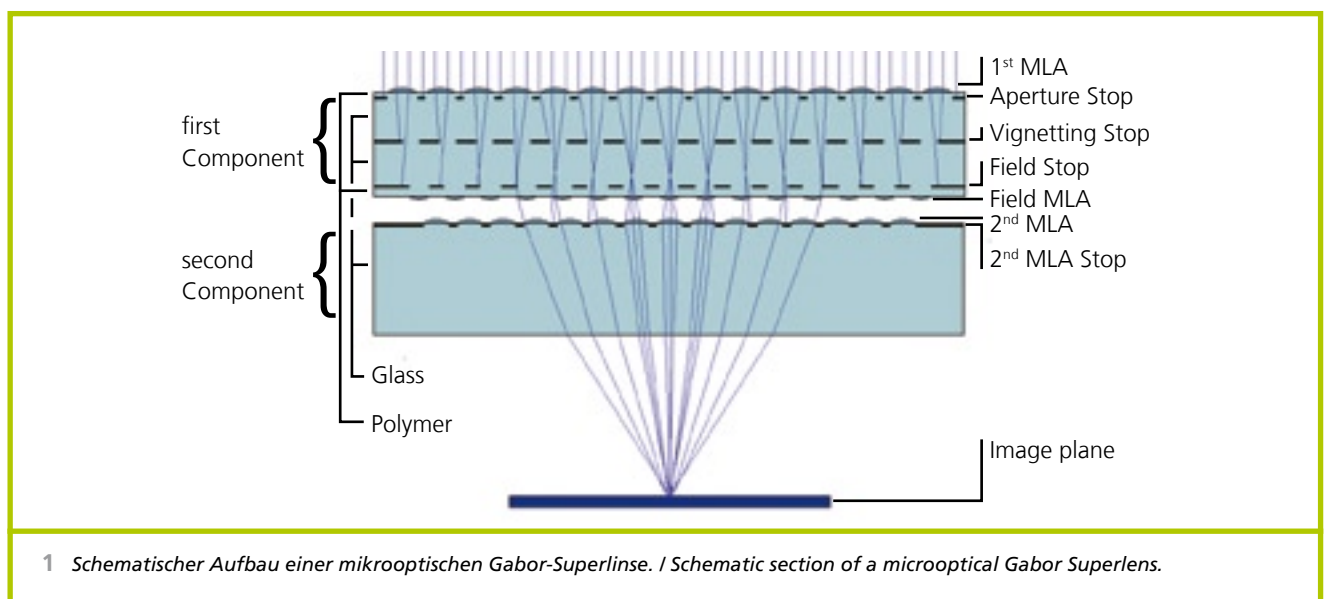
3

## ULTRAKOMPAKTES ABBILDUNGSSYSTEM ERHÖHTER LICHTSTÄRKE

## ULTRA-COMPACT IMAGING SYSTEM WITH INCREASED SENSITIVITY

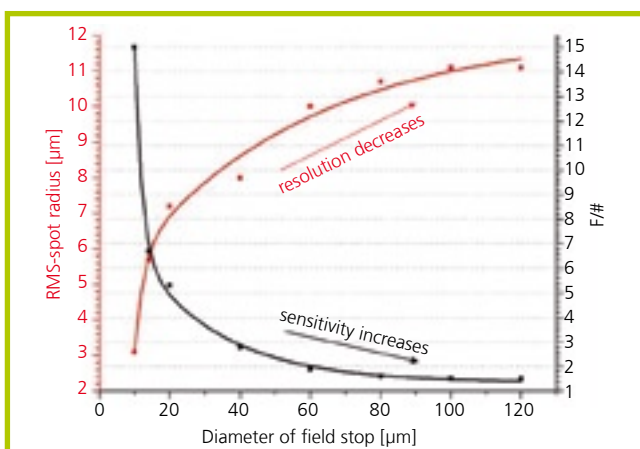
Miniaturisierte Kameras sind heute ein integraler Bestandteil einer Vielzahl von Produkten aus dem Bereich der Kommunikations- und Unterhaltungselektronik sowie der Sensorik. Allerdings sind der Verringerung der Baugröße der verwendeten Kameraoptik neben den technologischen auch physikalische Grenzen gesetzt. Bei der Verkleinerung der Optik-Baulänge (bei konstanter Lichtstärke und Bildauflösungsvermögen) verringern sich das Winkelauflösungsvermögen und die Anzahl der durch das Abbildungssystem übertragbaren Informationen /1/.

Miniaturized cameras are now an integral part of a number of devices in communication and consumer products as well as sensors. However, besides technological constraints, physical limits also apply to the reduction of camera optics size. While shrinking the total track length of optics (keeping a constant light sensitivity and image resolution), the angular resolution and the amount of information which may be transferred by the system decreases /1/.



Einen vielversprechenden Weg die letztgenannte Limitation zu überwinden, bieten Vorbilder aus der Natur wie beispielsweise Insekten. Bei diesen Tieren haben sich im Laufe der Evolution Facettenaugen herausgebildet, die den Lebensumständen der jeweiligen Art perfekt angepasst sind. So findet man bei vor allem tagaktiven Insekten die so genannten Appositionsaugen und bei nachtaktiven Insekten die Superpositionsaugen vor /2/. Die technische Adaption des erstgenannten Typs führte bereits zur Entwicklung eines ultradünnen Abbildungssensors /3/, welcher neben der ultraflachen Bauweise (300  $\mu\text{m}$ ) ein großes Gesichtsfeld (92°) sowie eine unbegrenzte Schärfentiefe aufweist. Allerdings besitzt dieses Abbildungssystem trotz seines relativ großen Sensorflächenkonsums nur eine moderate Lichtstärke (F-Zahl = 4).

Natural archetypes like insects offer a promising way to overcome the last-mentioned limitation. During their evolution, these animals have formed compound eyes which perfectly match their habitats. Thus diurnal insects exhibit a so-called apposition compound eye, whereas nocturnal insects bear a superposition eye /2/. The technical counterpart of the first type lead to the development of an ultra-compact imaging sensor /3/, which is ultra-thin (300  $\mu\text{m}$ ) and has a large field of view (92°) as well as an unlimited depth of field. However, it exhibits only moderate sensitivity (F-number = 4) although it consumes a relatively large sensor area.



2 RMS-Punktbildradius und Blendenzahl (F/#) als Funktion des Durchmessers der Feldblende. / RMS-spot radius and F-number (F/#) as a function of the diameter of the field stop.

3 Bild der »Image Processing Lena«, aufgenommen mit der Gabor-Superlinse. / Image of "Image Processing Lena" captured by the Gabor Superlens.



4

Inspiziert durch das Superpositions-Facettenauge, wurde eine Gabor-Superlinse entwickelt, die aus zwei Mikrolinsenarrays unterschiedlicher Pitches besteht, die axial einen Abstand aufweisen, der der Summe ihrer Brennweiten entspricht. Die Anordnung verdankt ihren Namen dem Erfinder und Physik-Nobelpreisträger Dennis Gabor, der sie 1940 zum Patent anmeldete. Die unserer Kenntnis nach einzige Demonstration einer solchen Optik im Jahr 1999 fiel mit 6,5 cm Baulänge bei einem Gesichtsfeld von 10° nicht besonders kompakt aus /4/. Um das Gesichtsfeld zu vergrößern, haben wir ein drittes Mikrolinsenarray (Feldlinsenarray) in die mikrooptische Gabor-Superlinse integriert (Abb. 1). Durch die für jeden Bildpunkt auftretende Überlagerung von Licht aus benachbarten Kanälen erhöht sich die Lichtstärke dieser Mikrooptik (F-Zahl = 2,8). Simulationen haben gezeigt, dass bei einer Gabor-Superlinse die Erhöhung der Lichtstärke direkt proportional zur Anzahl der überlagernden Kanäle ist, während sich die Größe des entstehenden Punktbildes indirekt proportional dazu verhält (Abb. 2). Es entsteht ein reelles und zusammenhängendes Bild (Abb. 3) in der Bildebene, so dass ein kleiner, konventioneller Bildwandler verwendet werden kann. Das Gesamtsystem besitzt eine Baugröße von 2,8 x 2,8 x 2 mm<sup>3</sup> (Abb. 4) und kann im Gegensatz zu konventionellen Einkanaloptiken im Wafermaßstab hergestellt werden /5/. Der Prototyp bildet ein Gesichtsfeld von 40° in nahezu QVGA-Auflösung (340 x 340 Pixel) ab und könnte somit z. B. als Sekundärkamera für Videotelefonie zum Einsatz kommen.

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch das BMBF im Projekt »Insekten-inspirierte Abbildungssysteme« (FKZ: 01RB0705A).

Inspired by the superposition compound eye, a Gabor superlens has been developed consisting of two microlens arrays of different pitch with an axial distance according to the sum of their focal lengths. This setup owes its name to its inventor and Physics Nobel Prize winner Dennis Gabor, who patented it in 1940. To our knowledge, the only demonstration of such optics in 1999 was not particularly compact, with a total track length of 6.5 cm and a field of view of 10° /4/. In order to increase the field of view, we integrated a third microlens array (field lens array) into the microoptical Gabor superlens (Fig. 1). The light sensitivity of the microobjective is increased (F-number = 2.8) due to the superposition of light from neighboring channels for each image point. Simulations have shown that the increase in sensitivity of a Gabor superlens is directly proportional to the number of superimposing channels, whereas the size of the point-spread-function is indirectly proportional to that (Fig. 2). A real and seamless image (Fig. 3) is created in the image plane so that a small, conventional image sensor may be used. The whole system has a size of 2.8 x 2.8 x 2 mm<sup>3</sup> (Fig. 4) and contrasting to conventional single-aperture optics it may be fabricated on wafer level /5/. The prototype captures a field of view of 40° with approx. QVGA resolution (340 x 340 pixels) and thus might be applied e.g. as secondary camera for video telephony.

The authors acknowledge the financial support within the BMBF-funded project "Insect-inspired imaging systems" (FKZ: 01RB0705A).

4 Prototyp der mikrooptischen Gabor-Superlinse im Vergleich zu einem Cent-Stück.

4 Prototype of a microoptical Gabor superlens in comparison to a cent coin.

## Literatur/References

/1/ Brückner, A.; Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Bräuer, A.: Microoptical Artificial Compound Eyes, Flying Insects and Robots, Floreano, D.; Zufferey, J.-C.; Srinivasan, M.V.; Ellington, C. (Eds.), Springer (2009), ISBN: 978-3-540-89392-9.

/2/ Land, M. F.; Nilsson, D.-E.: Animal Eyes, Oxford Animal Biology Series (Oxford University Press, Oxford, 2002).

/3/ Brückner, A.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Hoffmann, C.: Ultra-compact vision system for automotive applications, Proceedings 4th EOS Topical Meeting on Advanced Imaging Techniques, Jena, Germany (2009), p. 166-167.

/4/ Hembd-Sölner, C.; Stevens, R.F.; Hutley, M.C.: Imaging properties of the Gabor Superlens, J. Opt. A, Pure Appl. Opt. 1(1), 94–102 (1999).

/5/ Stollberg, K.; Brückner, A.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A., Tünnermann, A.: The Gabor superlens as an alternative waferlevel camera approach inspired by superposition compound eyes of nocturnal insects, Opt. Express 17 (18), p. 15747-15759 (2009).

## AUTHORS

*Andreas Brückner*

*Klemens Stollberg*

*Jacques Duparré*

*Peter Dannberg*

*Sylke Kleinle*

*Antje Oelschläger*

*Andreas Bräuer*

## CONTACT

*Dipl.-Phys. Andreas Brückner*

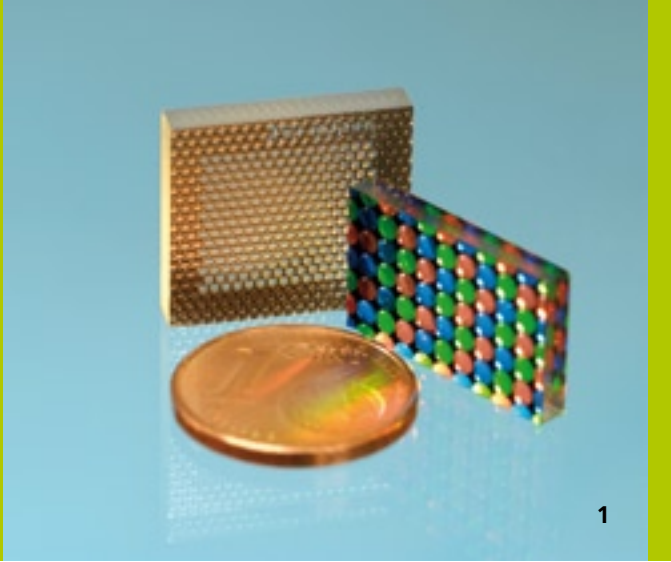
*Phone +49 3641 807-421*

*andreas.brueckner@iof.fraunhofer.de*

*Dr. Andreas Bräuer*

*Phone +49 3641 807-404*

*andreas.braeuer@iof.fraunhofer.de*



# ULTRAFLACHE ARRAY-PROJEKTIONSOPTIK

## ULTRA-SLIM ARRAY PROJECTION OPTICS

Für die Realisierung extrem miniaturisierter Projektionsdisplays (Picoprojektoren) existieren gegenwärtig zwei Systemarchitekturen: LED-beleuchtete Mikrodisplays /1/ und mikromechanische Scannerspiegel mit Laserbeleuchtung /2/. Während Laserscanner kleinste Bauvolumina ermöglichen aber durch die Laserleistung auf ca. 10 lm Bildhelligkeit limitiert sind, erreichen LED-Pico-beamer höhere Leistungen, weisen aber größere Abmaße auf. Die Miniaturisierung dieser Projektoren wird durch die Etendue der verwendeten LED-Quelle begrenzt, die bei gegebener Blendenzahl der Projektionsoptik eine minimale laterale Ausdehnung des Imagers und damit auch eine Mindestbaulänge erfordern /3/. Die für die Implementierung in mobile Geräte zulässigen maximalen Systemabmaße bestimmen somit direkt die maximale Helligkeit der Projektion.

Das Optikschemata des Array-Projektors überwindet diese Abhängigkeiten einkanaliger Projektionssysteme und ermöglicht extrem flache, dafür lateral ausgedehnte, mikrooptische Projektionssysteme großer Helligkeit. Ein solcher Array-Projektor besteht aus einer regelmäßigen Anordnung projizierender Einzelkanäle, deren Projektionen sich auf dem Schirm zum Gesamtbild vereinen und erlaubt sowohl die Realisierung statischer als auch dynamischer Projektoren.

1 *Statische, monochrome Array-Projektionsoptik (li.), Mikrolinsenarray mit vergrabenen Farbfiltern und Blenden für den dynamischen Array-Projektor (re.).*

2 *Graustufenprojektion mit einem statischen Array-Projektor.*

Typical system architectures for extremely miniaturized projection displays (pico projectors) are either LED-illuminated micro-displays /1/ or MEMS scanning mirrors with laser illumination /2/. On the one hand, laser scanners enable the smallest form factors but are limited by laser power to about 10 lm flux, on the other, LED-illuminated imagers achieve higher flux but require a larger design envelope. Miniaturization of this class of projectors is limited by the etendue of the LED light source, which requires a minimum size of the imager – and thus also a minimum overall length of the projector – for a given projection  $f/\#$  /3/. Consequently, available space, i.e. for implementation into mobile devices, determines maximum projected light flux.

The optics scheme of the array projector breaks this rule of single channel imaging systems and enables extremely slim but laterally extended projection systems with large flux. The presented array projector consists of a regular array of individual projecting channels which form a superposed image on a screen, enabling realization of static as well as dynamic projectors.

1 *Static monochrome array projection optics (left), micro-lens array with buried color filters and apertures for the dynamic array projector (right).*

2 *Grayscale projection from the static array projector.*



2

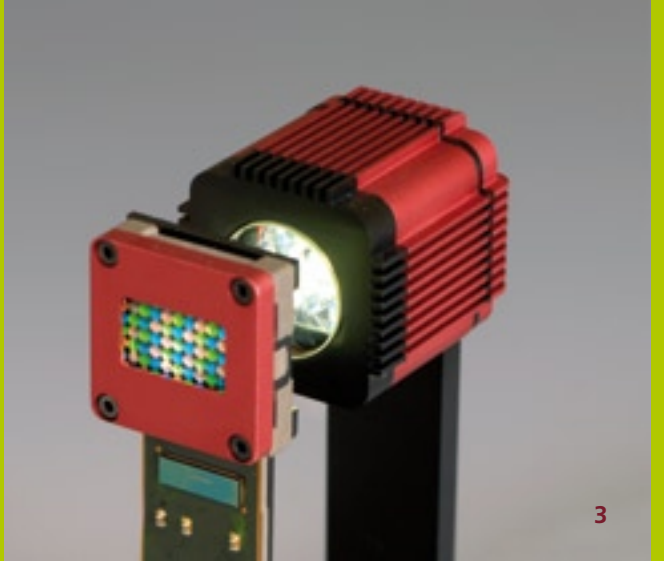
Der statische Projektor besteht aus einem Tandemarray kurzbrennweitiger Mikrolinsen mit einem vergrabenen Objektarray. Eine Helligkeitssteigerung bedarf im Gegensatz zu einkanaligen Projektoren keiner Baulängenvergrößerung, sondern einer Erhöhung der Anzahl sich überlagernder Projektionskanäle d. h. einer lateralen Vergrößerung des Arrays. Aufgrund des Wabenkondensator-ähnlichen Aufbaus erfolgt parallel zur Projektion eine Homogenisierung der Lichtquelle. Ein Array-Projektor mit einer hexagonalen Anordnung von 225 Einzelmikroprojektoren benötigt lediglich  $12 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$  Bauraum (Abb. 1). Jeder Projektionskanal besteht aus einer Feldlinse, der vergrabenen Objektstruktur und einer, zur Überlagerung der Einzelbilder dezentrierten, Projektionsoptik. Die Herstellung des monolithischen Elements erfolgt durch Replikation eines Reflow-Mikrolinsenmasters in Polymer auf ein lithographisch strukturiertes Objektarray auf einem Glassubstrat /4/. Die übertragbare Bildauflösung des ersten Prototyps ist  $350 \times 350$  Pixel. Bei Beleuchtung mit einer kollimierten  $240 \text{ lm}$  Weißlicht-LED wird ein Lichtstrom von  $35 \text{ lm}$  erzielt und so eine tageslichttaugliche Projektion bei einer Bildgröße von  $11 \times 11 \text{ cm}^2$  in  $40 \text{ cm}$  Abstand ermöglicht (Abb. 2).

Die Erzeugung farbiger Bilder wird durch eine kanalweise Einfärbung durch ein vergrabenes Farbfilterarray erreicht (Abb. 1). Da jeder Kanal nur monochrom arbeitet, ist keine Achromatisierung der Projektionsoptiken erforderlich, was eine einfache und kostengünstige Auslegung des Projektorarrays ermöglicht. Die dynamische Erzeugung farbiger Bilder mit  $180 \times 140$  Pixeln gelingt mit einem monochromen 2-Megapixel-LCD-Mikroimager (Abb. 3). Generell erfordert das Prinzip des Array-Projektors Mikroimager mit möglichst vielen und möglichst kleinen Pixeln, wobei Einzelpixelfehler weit weniger kritisch sind als bei herkömmlichen Einkanalprojektoren. Durch die geringe Transmission des LCD und der Farbfilter werden hier gegenwärtig nur  $8 \text{ lm}$  Bildhelligkeit erreicht (Abb. 4).

The static projector consists of a tandem array of micro-lenses of short focal length with a buried mask representing the object array. Contrary to single channel architectures, flux enhancement requires no enlarged overall length but an increased number of superposed projection channels i.e. only a lateral increase in size. Because of the system design similar to a fly's eye condenser, a homogenization of the illumination source takes place simultaneously with the projection. A hexagonal array of 225 individual micro-projectors requires only  $12 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$  overall size (Fig. 1). Each projection channel consists of a field lens, a buried object structure and a projection lens, which is slightly decentered to achieve perfect superposition of the individual images at a defined distance. The monolithic array projector is manufactured by replication of a reflow lens-array master into polymer on a buried lithographic object array on a glass substrate /4/. The resolution of the realized sample is  $350 \times 350$  pixels. Illumination with a collimated  $240 \text{ lm}$  white light LED results in  $35 \text{ lm}$  flux, enabling projection in bright daylight with a projected image size of  $11 \times 11 \text{ cm}^2$  at a distance of  $40 \text{ cm}$  (Fig. 2).

Channel-wise coloration of images using a buried RGB color filter array (Fig. 1) permits generation of full-color images. Monochrome operation of the individual channel supersedes achromatization of the projection optics resulting in cost-efficient realization of the projector array.

We realized dynamic generation of colored images with  $180 \times 140$  pixels with a monochrome 2 megapixel LCD micro-imager (Fig. 3). Generally speaking, the array projector approach requires micro-imagers with the most and smallest possible pixels. This requirement is relaxed by a large tolerable rate of pixel failures compared to common single channel projectors. Currently, we are achieving only  $8 \text{ lm}$  flux of the projected image because of the small transmission of the LCD and the color filters (Fig. 4).



Die Systemarchitektur des dynamischen Array-Projektors erlaubt auf Grund der hohen Tiefenschärfe der einzelnen Mikroprojektoren die Einstellung der Projektionsentfernung in einem großen Bereich ohne mechanisch bewegte Teile durch die elektronische Einstellung der Dezentrierung der einzelnen Mikrobilder auf dem LCD-Display.

Kombiniert mit einer flachen Lichtquelle, ähnlich einer Display-hinterleuchtung, erlaubt das Prinzip des Array-Projektors die Realisierung lichtstarker statischer und dynamischer monochromer und RGB-Projektorsysteme, deren Helligkeit unter Beibehaltung einer geringen Baulänge im Bereich von ca. 1 cm durch laterale Vergrößerung von Lichtquelle und Array-Projektionsoptik skalierbar ist. VGA-Auflösung ist durch Erweiterung des Projektors um eine weitere Optikebene erreichbar.

Die Autoren danken Peter Dannberg und Erik Förster für die Unterstützung bei der Herstellung der mikrooptischen Elemente und der Assemblierung der Projektoren.

System architecture of the dynamic array projector allows focusing for different projection distances without mechanical moving parts by electronic control of decentration of the individual micro-images on the LCD display.

Combined with a flat light source similar to a display backlight, the array projector principle enables realization of high-brightness static and dynamic, monochrome and RGB projector systems. The light flux of these projectors scales with lateral extension, while maintaining a short overall length in the range of 1 cm. By adding a second optics layer for the projection lens, VGA resolution is achievable.

The authors thank Peter Dannberg and Erik Förster for assistance in manufacturing the micro-optical components and assembly of the sample projectors.

3 *Blick auf den dynamischen RGB-Array-Projektor.*

4 *RGB-Projektion mit dynamischem Array-Projektor.*

3 *Dynamic RGB array projector.*

4 *RGB projection from the dynamic array projector.*

## Literatur/References

/1/ Darmon, D.: LED-Illuminated Pico Projector Architectures, SID Digest 2008.

/2/ Handschy, M. A.; Spenner, B. F.: The future of pico projectors, Information Display 24, No. 12, 2008.

/3/ Geissler, E.: Meeting the Challenges of Developing LED-based Projection-Displays, SPIE Proc. 6196 Photonics in Multimedia, Strasburg, 2006.

/4/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L.; Bräuer, A.: Polymer UV-molding for micro-optical systems and O/E integration, SPIE Proc. 4179 Micromaching Technology for Micro-Optics, Santa Clara, 2000.

## AUTHORS

*Marcel Sieler*

*Peter Schreiber*

## CONTACT

*Dr. Peter Schreiber*

*Phone +49 3641 807-430*

*peter.schreiber@iof.fraunhofer.de*

*Dr. Andreas Bräuer*

*Phone +49 3641 807-404*

*andreas.braeuer@iof.fraunhofer.de*





## POLYMERFOLIEN MIT ANTIREFLEXEIGENSCHAFTEN DURCH PLASMAÄTZEN – POLAR

### PLASTIC WEB WITH ANTIREFLECTIVE PROPERTIES BY PLASMA ETCHING – POLAR

Im innovativen Netzwerk POLAR /1/ entwickeln mehrere Firmen gemeinsam mit zwei Fraunhofer-Instituten und der TU Dresden eine neue Technologie zur Entspiegelung von Kunststofffolien. Für solche Folien gibt es eine breite Palette von Anwendungen in technisch hochwertigen Produkten. Diese reichen von Schutzverkapselungen von Arzneimitteln und elektronischen Gütern über dekorative Elemente bis hin zur Realisierung von komplexen Funktionen in Displays oder Solarzellen.

In vielen Fällen müssen die optischen Eigenschaften der Folie so modifiziert werden, dass Reflexionen vermindert werden und die Lichtdurchlässigkeit ansteigt. Wegen der unterschiedlichen Brechzahl von Kunststoffen und Luft wird das Licht bei transparenten Folien z. B. aus PET etwa zu 12 % reflektiert, ein Wert höher als bei Glas. Typische Anwendungsfelder für entspiegelte Folien sind hochtransparente Flächen von Vitrinen und Schauwindowern, großflächige optische Elemente für Projektionsgeräte (Abb. 1) und Fahrzeugteile. Daneben sind z. B. für Sportbrillen, Windschutzscheiben und Displays Oberflächen interessant, die sowohl reflexmindernd ausgerüstet als auch beschlagfrei sind.

The innovative project network POLAR /1/ was formed by several companies, two Fraunhofer Institutes and an institute at the TU Dresden. The aim of the project is the development of a new technology to provide polymeric web with antireflective properties. Web material is useful for many applications, including the protection of drugs and electronic goods, for decorative elements, displays and solar cells. For optical applications, the reflection on the surfaces should be reduced to achieve a maximum light transmission. Typical foil material (PET) reflects about 12 % of the incident light because of its relatively high refractive index. Applications for web with antireflective properties include high-transparent areas of display cases and show windows and for example screens (Fig. 1). Combinations of antireflection and antifogging properties are especially interesting for sports glasses, windshields and diverse display applications.

<sup>1</sup> Entspiegelte Elemente werden auch in 3D-Bildschirmen verwendet  
© SeeReal Technologies GmbH.

<sup>1</sup> Antireflective components are used for 3D display technology  
© SeeReal Technologies GmbH.

Im Projekt POLAR soll die Entspiegelung verschiedener Folien durch kontrollierten Abtrag der Oberfläche erreicht werden. Basierend auf dem patentierten AR-plas®-Prozess des Fraunhofer IOF /2/ werden die Kunststoffe speziellen Plasma-behandlungen ausgesetzt, in deren Folge an der Oberfläche statistisch verteilte Nanostrukturen entstehen. Die wissenschaftliche Zielstellung des Teilprojekts umfasst die Erforschung der Wechselwirkungen der verschiedenen Plasmabestandteile mit den Polymeroberflächen, die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Dicke und Art von Vorbeschichtungen und den danach durch Ätzen erreichbaren Strukturen sowie die Untersuchung verschiedener Möglichkeiten zur Realisierung von Antibeschlageigenschaften einerseits und von superhydrophoben Eigenschaften andererseits durch die Übersichtung der Strukturen sowie durch Adsorption hydrophiler und hydrophober Chemikalien. Die erreichten Ergebnisse werden an einer Rolle-zu-Rolle-Anlage demonstriert. Die Verfahrensoptimierung und die technologische und wirtschaftliche Bewertung erfolgt für verschiedene Folienmaterialien, wobei die technologischen Zielsetzungen der Industriepartner starke Beachtung finden.

Am Fraunhofer IOF wurde bereits die Strukturierbarkeit von PET (Typ Melinex™), TAC (Firma Island Polymers GmbH) und dem hydrophoben Material NOWOFLON grundlegend untersucht. Für alle Materialien konnte ein Abtrag im Plasma prinzipiell nachgewiesen werden. Durch das Abscheiden dünner Schichten vor dem Ätzen konnte das Entstehen von Nanostrukturen mit entspiegelnder Wirkung initiiert werden. Sowohl die Ionenquelle APS als auch die HF-Ätzstation einer Magnetron-Sputteranlage erwiesen sich in bestimmten Prozessfenstern als geeignet für die Strukturierung. Abbildung 2 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von PET-Folien mit verschiedenen Antireflexstrukturierungen. Die dazugehörigen Transmissionsspektren sind in Abb. 3 dargestellt.

The aim of the network project POLAR is the controlled etching of web materials to achieve an antireflective nanostructure. The process is based on a patented technology of the Fraunhofer IOF /2/. Special plasma parameters have to be applied to initiate the self-organized growth of suitable nanostructures. The basic research of the project comprises investigations of the interactions between plasma and web surfaces and the control of structure growth by thin layer deposition before etching. Hydrophilic or super-hydrophobic properties of the treated web shall be achieved by coating the structured surfaces with special chemicals. Optimal process chains will be implemented in a web coating plant to realize a roll-to-roll movement with high rate. The technology optimization will be carried out for different web materials taking into account technological and economical aspects and the special applications of the companies taking part in the project.

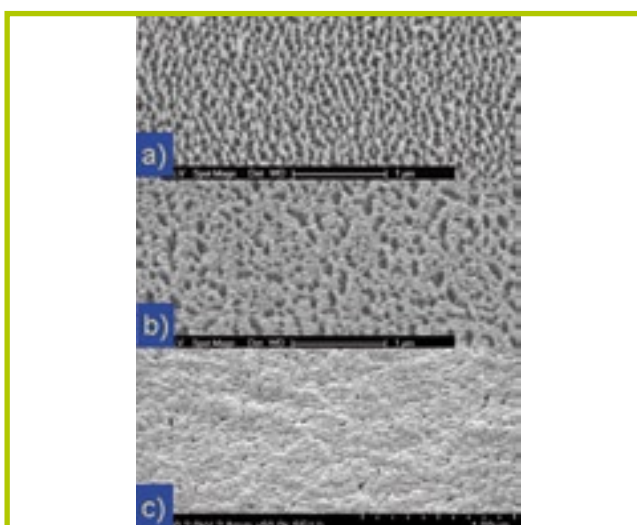
A basic investigation of the etching behavior of PET (Typ Melinex™), TAC (Firma Island Polymers GmbH) and the hydrophobic material NOWOFLON was already completed at Fraunhofer IOF. For all materials, an ablation effect combined with a structure formation was found. Antireflective effects were achieved mainly by depositing thin initial layers followed by etching. Both investigated plasma sources, the ion source APS and the HF-etching station of a magnetron sputter coater, were proved to be suitable. Figure 2 shows scanning electron micrographs of the different antireflective structures on PET. The transmission spectra belonging to these surfaces are shown in Fig. 3.



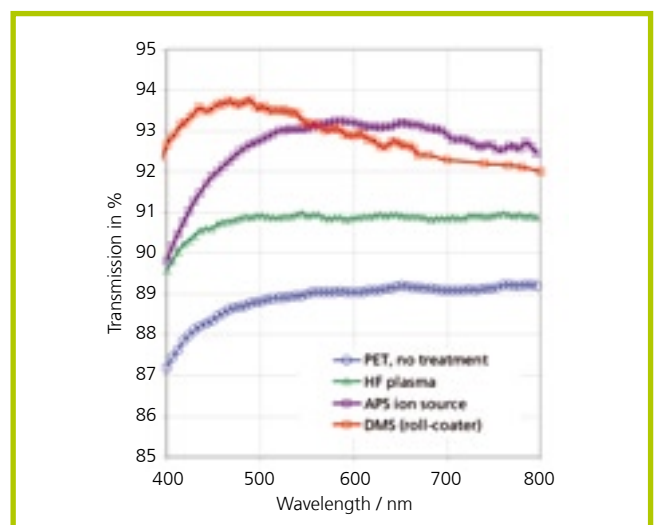
Erste Versuche zur Übertragung des am IOF entwickelten Ätzverfahrens erfolgten am Fraunhofer FEP an der Bandbeschichtungsanlage coFlex® 600 (Abb. 4, 5). Die prozessierbare Folienbreite beträgt hier bereits 600 mm. Mögliche Ionenquellen zur Realisierung des Ätzabtrags sind eine lineare Ionenquelle oder eines oder mehrere der sechs Doppelmagnetronsysteme, die in den Prozesskammern installiert sind. Für beide Ätzsysteme konnten bereits für die Entspiegelung geeignete Parameterfenster gefunden werden. Besonders erfolgversprechend auch im Hinblick auf eine hohe Bandlaufgeschwindigkeit sind die mit der Magnetronanordnung erreichten Ergebnisse (Abb. 2, 3). Damit ist eine deutliche Erhöhung der Produktivität absehbar. Gegenstand der weiteren Arbeiten sind Fragestellungen zur Langzeitstabilität des Strukturierungsprozesses, zur mechanischen Beständigkeit der Strukturen sowie zur hydrophilen und hydrophoben Ausstattung der Oberflächen.

A first attempt to transfer the processes to a roll-coating technique was successfully carried out at the Fraunhofer FEP with a coFlex® 600 web coating plant, a linear ion source (LIS, Advanced Energy) and one of the six existing double magnetron systems (DMS) in the process chamber (Fig. 4, 5). Both systems showed good results. But in particular, an arrangement of double magnetrons (DMS) is promising for the attainment of high speed in the roll-to-roll process. The next investigations will be focused on the stability of the roll-coater process over a longer time, the mechanical stability of the structured surfaces and on hydrophilic und hydrophobic surface treatments.

4 *Bandanlage für die Rolle-zu-Rolle-Beschichtung von Folien*  
© Fraunhofer FEP. / *Web coating plant for the roll-to-roll coating of plastic films* © Fraunhofer FEP.



2 *REM-Aufnahmen von PET-Folie nach Behandlung im Plasma: APS (a), HF (b) und DMS (c).* / *SEM images of PET-foil after plasma treatment: APS (a), HF (b) and DMS (c).*



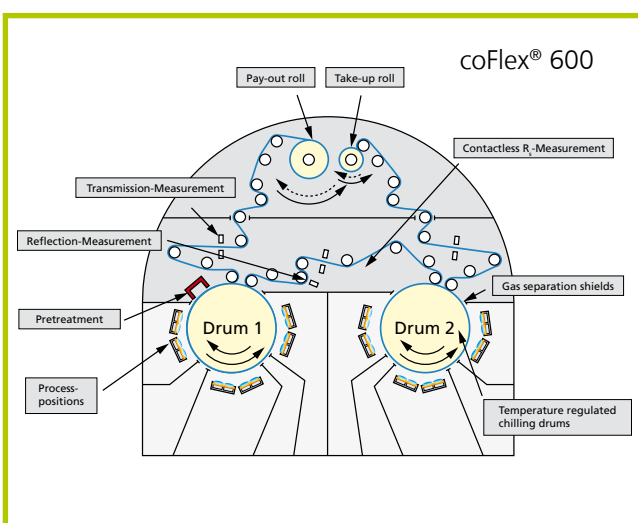
3 *Transmissionsspektren von PET, unbehandelt und nach verschiedenen Ätzprozessen (Rückseite jeweils unbehandelt).* / *PET transmission spectra, untreated and after various etching processes (rear untreated in each case).*

## Literatur/References

/1/ Projekt POLAR im Programm »Förderung von innovativen Netzwerken« (InnoNet) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), FKZ 16IN0723.

Partner: Fraunhofer FEP, Fraunhofer IOF, Institut für Festkörperelektronik TU Dresden, Roth&Rau AG, Southwall Europe GmbH, NOWOFOL Kunststoffprodukte GmbH&Co. KG, SeeReal Technology GmbH, Island Polymer Industries GmbH, Rodenstock GmbH, Leica Microsystems CMS GmbH, Johnson Controls GmbH.

/2/ DE10241708, DE102006056578A1, WO04092789A1.



5 Schema der Bandbeschichtungsanlage am Fraunhofer FEP. / Scheme of the web coating plant at Fraunhofer FEP.

## AUTHORS

Ulrike Schulz  
Peter Munzert  
Norbert Kaiser  
Waldemar Schönfelder<sup>1</sup>  
Matthias Fahland<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Fraunhofer FEP, Dresden

## CONTACT

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



## KOLLEKTORSPIEGEL FÜR DIE EUV-LITHOGRAPHIE

## COLLECTOR MIRRORS FOR EUV LITHOGRAPHY

Seit den frühen 1970er Jahren folgt die Chipherstellung der Halbleiterindustrie dem so genannten Mooreschen Gesetz: der Verdoppelung der Zahl der Transistoren pro Chip alle zwei Jahre. Nach allgemeinem Konsens führender Halbleiterhersteller wird sich die Miniaturisierung integrierter Schaltkreise auch in den kommenden Jahren fortsetzen. So gilt die EUV-Lithographie mit einer extrem kurzen Wellenlänge von nur 13,5 nm als das bisher aussichtsreichste Herstellungsverfahren für zukünftige Generationen von Computerchips mit Strukturweiten weit unter 22 nm.

Die nutzbare Leistung einer Hochleistungs-EUV-Quelle bei 13,5 nm sowie die Lebenszeit von Quelle und Kollektoroptik stellen gegenwärtig eine der größten Herausforderungen beim Übergang der EUV-Lithographie vom Entwicklungsstatus in die Produktion dar /1/. Im Auftrag der Cymer Inc. wurden am Fraunhofer IOF Technologien zur definierten Beschichtung hochreflektierender lateraler Gradientenschichtsysteme auf stark gekrümmten Kollektorsubstraten sowie ein Verfahren zur Charakterisierung der Hochfrequenzrauheit von EUV-Substraten entwickelt /2/.

Since the early 1970s the semiconductor industry follows what is called Moore's law: the number of transistors per area should double every two years. According to general consensus of leading chipmakers the miniaturization of integrated circuits will continue during the next years accordingly. Owing to its extremely short wavelength of only 13.5 nm EUV lithography is viewed as the most promising device manufacturing technology for computer chips with critical dimensions far below 22 nm.

The usable power of high-power EUV light sources at 13.5 nm and also the lifetime of source and collector optics are currently considered to be the largest challenges encountered during the transition of EUV lithography from development to production /1/. Upon a contract from Cymer Inc. Fraunhofer IOF Jena has developed technologies for defined coating of highly reflective multilayer systems with lateral gradients on strongly curved collector substrates as well as a method for characterizing the high spatial frequency roughness of EUV substrates /2/.

1 *Einrichtung eines Kollektorsubstrats zur Streulichtmessung.*

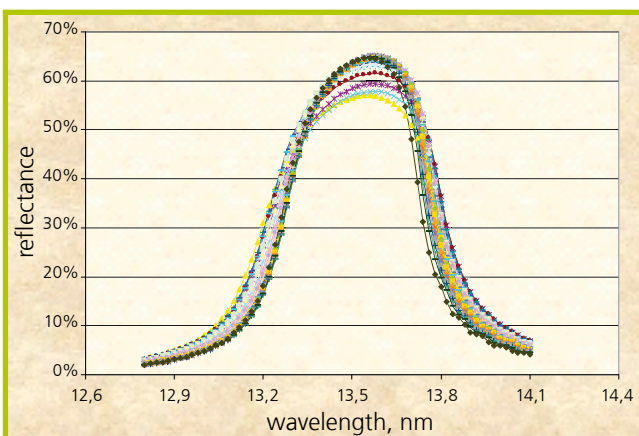
1 *Adjustment of a collector substrate for light scattering measurement.*

Zur Herstellung hochreflektierender EUV-Spiegel sind Substrate mit hoher Oberflächenqualität (rms-Rauheiten  $< 0,2 \text{ nm}$ ) erforderlich. Dies bei gleichzeitig sehr großer und komplexer Oberflächengeometrie zu realisieren stellt eine enorme technologische Herausforderung dar und macht eine genaue Prüfung der Substrate vor der Beschichtung hinsichtlich anwendungsrelevanter Nanorauheit und Homogenität unabdingbar.

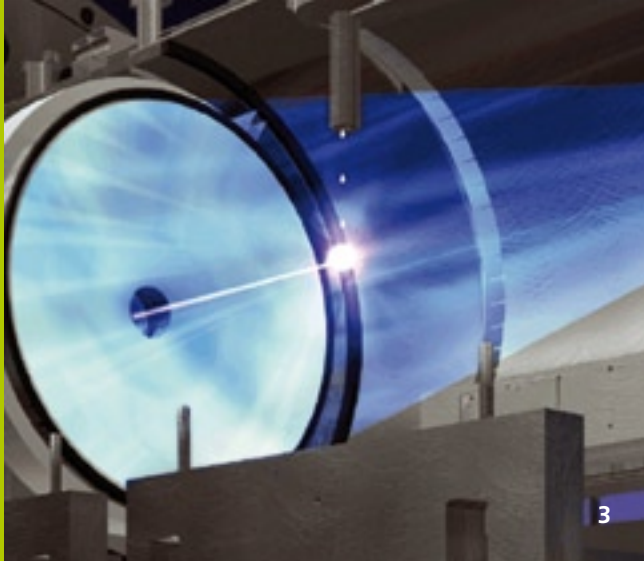
Am Fraunhofer IOF wird dazu ein neuartiges Verfahren eingesetzt, das auf der Analyse von gestreutem Licht basiert. Mit dem am IOF entwickelten System ALBATROSS werden dazu winkelaufgelöste Streulichtmessungen bei einer Wellenlänge von  $442 \text{ nm}$  (HeCd-Laser) durchgeführt. Das Messsystem ist selbst zur Untersuchung komplexer Probengeometrien geeignet und weist dabei gleichzeitig eine enorme Sensitivität bis hin zu Oberflächenrauheiten unter  $0,1 \text{ nm}$  auf [3]. Aus den Streulichtdaten werden anschließend

Substrates with very high surface quality (rms roughness  $< 0.2 \text{ nm}$ ) are required for the manufacturing of highly reflective EUV mirrors. To realize this with at the same time very large and complex surface geometries poses an enormous technological challenge and requires an accurate analysis of the substrates prior to coating with respect to relevant nano-roughness and homogeneity.

At Fraunhofer IOF a novel method is being used that is based on the analysis of light scattering. Angle-resolved measurements of scattered light at a wavelength of  $442 \text{ nm}$  (HeCd-laser) are carried out with the system ALBATROSS developed at IOF. The measurement system is suitable even for the investigation of complex sample geometries and has at the same time an extremely high sensitivity up to a surface roughness level of below  $0.1 \text{ nm}$  [3]. Subsequently the power spectral density (PSD) functions of the surface are calculated



**2** Reflexionskurven bei unterschiedlichen Radien des Kollektorspiegels entlang einer Geraden. Messungen: PTB Berlin. / Reflectivity curves of the collector mirror along a straight line at different radii. Measurements: PTB Berlin.



Leistungsspektraldichtefunktionen (PSD) der Oberfläche durch Anwendung von Vektorstreuungstheorien berechnet. Durch Analyse dieser Rauheitsspektren und Ausnutzung der fraktalen Oberflächenstruktur kann die Rauheit bis in den für die Anwendung bei 13,5 nm relevanten Ortsfrequenzbereich ermittelt werden. Das inzwischen routinemäßig eingesetzte Verfahren (Abb. 1) ermöglicht somit eine schnelle und genaue Prüfung der Oberflächenqualität der Substrate vor der Beschichtung sowie quantitative Vorhersagen der erreichbaren optischen Eigenschaften bei der Anwendungswellenlänge  $\lambda/4$ .

Besonderheit bei der Beschichtung der 5,5 sr LPP Kollektorspiegel für das NXE:3100 EUV Tool ist die extreme Variation des Einfallswinkels auf der Spiegeloberfläche mit dem Spiegelradius. Dies erfordert die Realisierung eines lateralen Schichtdickegradienten, wobei an jedem Ort der Spiegeloberfläche Schichtdickegenauigkeiten von weniger als 0,015 nm eingehalten werden müssen. Das EUV-Schichtsystem reflektiert auf einem Spiegelradius von 50 bis 230 mm ca. 64 bis 65 % und zwischen 240 bis 320 mm ca. 57 bis 64 % bei einer Wellenlänge von  $(13,50 \pm 0,02)$  nm (Abb. 2). Der 5,5 sr Kollektorspiegel ist mit einem Durchmesser von über 660 mm, einer Pfeilhöhe von über 150 mm sowie einer Masse von ca. 50 kg der weltweit größte EUV-Spiegel, der bisher für die EUV-Lithographie hergestellt und mit einem Multilayer beschichtet wurde.

Das Fraunhofer IOF Jena dankt Cymer Inc. für die finanzielle Unterstützung der FuE-Arbeiten.

from the light scattering data by application of vector scattering theory. By analysis of these roughness spectra and by use of the fractal surface structure the roughness can be determined for the spatial frequency range that is relevant for the application at 13.5 nm. The method that is now routinely being used (see Fig. 1) thus permits a fast and accurate measure of the surface quality of the substrates prior to coating and also enables quantitative predictions of the optical properties that can be reached at the application wavelength  $\lambda/4$ .

A characteristic feature of the coating of the 5.5 sr LPP collector mirrors for the NXE:3100 EUV tool is the extreme variation of the incidence angle on the mirror as a function of mirror radius. This requires the realization of a lateral layer thickness gradient where for each location on the mirror surface a layer thickness accuracy of less than 0.015 nanometers has to be maintained. The EUV multilayer system reflects 64 to 65 % for a mirror radius of 50 to 230 mm and 57 to 64 % between 240 to 320 mm at a wavelength of  $(13.50 \pm 0.02)$  nm (Fig. 2). The 5.5 sr collector mirror with its diameter of more than 660 mm, its sag of more than 150 mm, and its mass of about 50 kg is the largest EUV mirror worldwide that was manufactured for EUV lithography and coated with a multilayer to date.

Fraunhofer IOF Jena gratefully acknowledges financial support by Cymer Inc. for research and development projects.

3 EUV-Quelle: Laserproduziertes Plasma (LPP), erzeugt mit einem  $\text{CO}_2$  Laser auf ein Zinn-Tröpfchentarget. © Cymer, Inc.

3 EUV source: laser-produced plasma (LPP) generated by a  $\text{CO}_2$  laser on a tin droplet target. © Cymer, Inc.

## Literatur/References

/1/ Böwering, N. R.; Ershov, A.; Marx, W. F., Khodykin, O. V.; Hansson, B. A. M.; Vargas E. L.; Chavez, J. A.; Fomenkov, I. V.; Myers, D. W.; Brandt, D. C.: EUV Source Collector, Proceedings of SPIE Vol. 6151 (2006), ISBN 0-8194-6194-6.

/2/ Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.; Böwering, N. R.; Ershov, A. I.; Khodykin, O. V.; Viatella, J. W.; Bruzzone, K. A.; Fomenkov, I. V.; Myers, D. W.: High-temperature LPP collector mirror. Proceedings of SPIE Vol. 6151 (2006), ISBN 0-8194-6194-6.

/3/ Schröder S., Herffurth T., Duparré A.: Finish assessment of complex surfaces by advanced light scattering techniques. SPIE Proc. Vol. 7102 (2008) Art. 71020F.

/4/ Schröder S., Feigl T., Duparré A., Tünnermann A.: EUV reflectance and scattering of Mo/Si multilayers on differently polished substrates. Optics Express. Vol. 15. No. 21 (2007). S. 13997-14012.

## AUTHORS

*Torsten Feigl*

*Marco Perske*

*Hagen Pauer*

*Sergiy Yulin*

*Sven Schröder*

*Marcus Trost*

*Angela Duparré*

*Norbert Kaiser*

*Norbert Böwering<sup>1</sup>*

*Oleh Khodykin<sup>1</sup>*

*Igor V. Fomenkov<sup>1</sup>*

*David Brandt<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Cymer Inc., San Diego,  
United States*

## CONTACT

*Dr. Torsten Feigl*

*Phone +49 3641 807 240*

*torsten.feigl@iof.fraunhofer.de*





## **GESUNDHEIT UND MEDIZINTECHNIK**

Durch Lösungen mit Licht ...  
... Gesundheitsversorgung innovieren.

## **HEALTHCARE AND MEDICAL ENGINEERING**

Solutions with light ...  
... enliven healthcare provisions.



Der demographische Wandel in den Industriestaaten schreitet fort und wird in den nächsten Jahrzehnten weiter an Dynamik gewinnen. Waren 2007 etwa 8 % der Weltbevölkerung über 65 Jahre alt, werden es im Jahr 2030 bereits 13 % sein. Die Alterung der Gesellschaft stellt insbesondere die Gesundheitsversorgung vor enorme Herausforderungen. Optische Technologien leisten entscheidende Beiträge bei der Lösung drängender Fragen in der Medizin, sei es Prävention, Diagnostik oder Therapie.

Das Licht leistet wesentliche Beiträge bei der Entwicklung verbesserter Wirkstoffe um die Ausbreitung gefährlicher Krankheiten zu verhindern und die Heilung zu beschleunigen. So können zum Beispiel verschiedenste Erreger oder Antikörper mit Hilfe von optischen Methoden nachgewiesen werden und Licht ermöglicht den Blick in die lebende Zelle. Laserstrahlung wird für die höchst präzise und zugleich schonende Behandlung von Gewebe eingesetzt, sowohl in der Augenheilkunde als auch in der Dermatologie, Chirurgie und Dentaltechnik.

Handgeführte 3D-Scanner auf der Basis von Licht ermöglichen die schnelle und berührungslose Formerfassung beispielsweise von Gebissgeometrien zur Vor- und Nachbereitung von zahntechnischen Behandlungen oder von Gesichtspartien für Behandlungen in der plastischen Chirurgie.

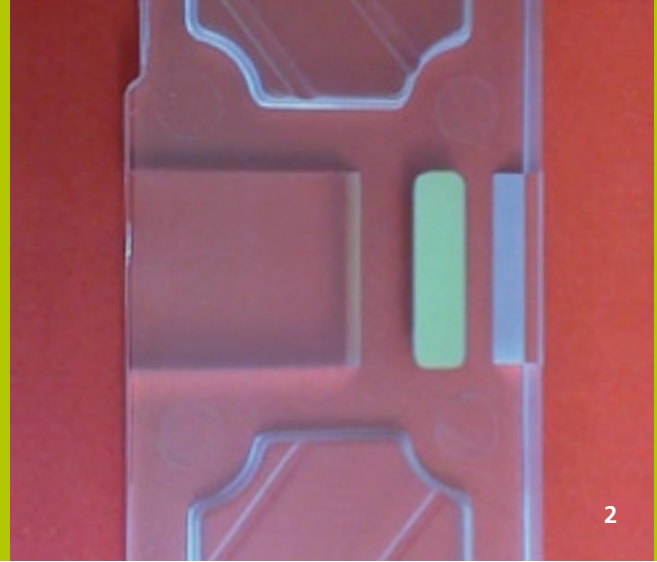
Lösungen mit Licht verbessern den Nachweis von Krankheitserregern, erlauben den Blick in die Zelle und ermöglichen die Entwicklung schonender Behandlungsmethoden.

Demographic change in the industrialized nations is advancing and will continue to gain momentum in the coming decades. Where 8 % of the world's population was over 65 years of age in 2007, the figure in the year 2030 will already stand at 13 %. Aging populations present enormous challenges, especially in healthcare provisions. Optical technologies are making essential contributions to solving pressing issues in medicine, whether in prevention, diagnostics or therapy.

Light contributes greatly to the development of improved agents in preventing the spread of dangerous diseases and accelerating recovery. For example, the widest range of pathogens or antibodies can be identified with the help of optical methods, and light makes possible a view of the living cell. Laser irradiation is used for the ultra-precise and simultaneously gentle treatment of tissue, in ophthalmology as well as in dermatology, surgery and dental technology.

Handheld 3D scanners based on light enable rapid and contactless shape measurement, for example of teeth geometries for the preparation and revision of dental treatments or of facial features for treatment with plastic surgery.

Solutions with light improve the detection of pathogens, enable a view of the cell and make possible the development of gentle treatment methods.



# PARALLELE SPR ALS NACHWEIS- TECHNOLOGIE FÜR DIE BIOSENSORIK

## PARALLEL SPR-BASED BIOSENSOR TECHNOLOGY

Die Beobachtung molekularer Bindungsereignisse an Oberflächen gewinnt in der biochemischen Diagnostik zum Nachweis verschiedener Erreger oder Antikörper zunehmende Bedeutung. Anwendungen reichen von der Umwelt- und Lebensmittelanalytik, über die Veterinär- bis hin zur Humanmedizin. Unter den verschiedenen Verfahren hat sich hierbei die optische Methode der Oberflächenplasmonenresonanz (»surface plasmon resonance« – SPR) als empfindliches, markierungsfreies Messverfahren etabliert. Neben der Nutzung als analytisches Forschungsinstrument steht die Suche nach preiswerten Nachweisplattformen im Vordergrund /1/, wobei die gleichzeitige Beobachtung möglichst vieler Messflächen angestrebt wird.

Hier wurde der Ansatz der monochromatischen, winkelaufgelösten SPR-Messung verfolgt /2/ und als Analysesystem realisiert (Abb. 1). Das Licht einer LED wird als Linie auf die Oberfläche eines Polymerchips (Abb. 2) abgebildet. Mittels einer lateralen Abbildung der Goldoberfläche können eindimensionale Arrays aus mehreren, in einer Reihe angeordneten Messflächen analysiert werden. Dabei wird für jede Position des beleuchteten Streifens das Winkelspektrum der Reflexion in den entsprechenden Spalten des CCD-Detektors

The analysis of molecular binding events at interfaces gains increasing importance in detecting the presence of pathogens or antibodies in biochemical diagnostics. Potential applications range from environmental and food control to veterinary and human diagnostics. Among the wealth of possible approaches, the optical method of surface plasmon resonance (SPR) has been established as a sensitive, label-free tool in biochemical sensing. Besides being used as an analytical research instrument, its extension towards inexpensive platform technologies is currently desired /1/, keeping in mind the necessity of analyzing a large number of measuring spots at the same time.

Here, the approach of the monochromatic, angular resolved SPR measurement has been applied /2/ and set up as an analytical device (Fig. 1). The light of an LED is imaged as a "light stripe" onto the surface of a polymer chip (Fig. 2). The analysis of a one-dimensional array, i.e. the measurement of spots arranged within a single row, becomes possible by means of laterally resolved imaging of the gold surface. Therefore, the angular spectrum of reflected light at every position in the illuminated stripe is separately measured along the columns of the CCD camera. Thus, a characteristic

1 *Gerät zur parallelen SPR Messung auf polymeren Chips.*

2 *SPR Chip mit integrierten mikrooptischen Elementen.*

1 *Device for parallel SPR analysis on polymer chips.*

2 *SPR chip with integrated micro optical elements.*

gemessen. Dies liefert ein charakteristisches Minimum, dessen Verschiebung ausgewertet wird. Als Substrate der Messung dienen spritzgegossene Chips aus Topas® (KDS Radeberg), in die bereits optische Funktionen zur Kopplung zwischen Gerät und Chip integriert sind, um immersionsfreies Arbeiten zu ermöglichen.

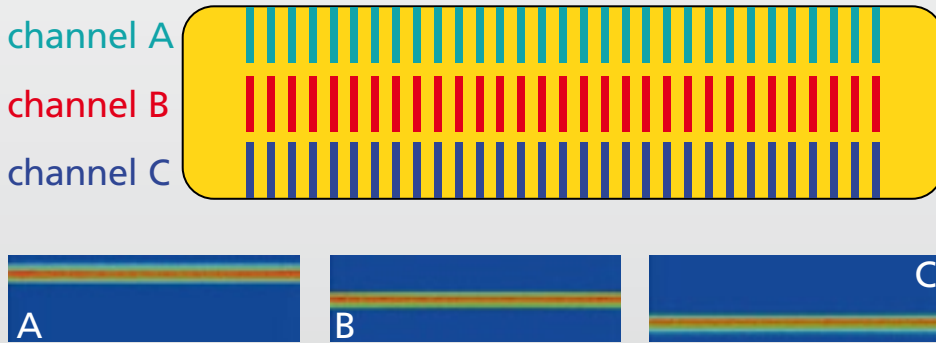
Erste Applikationen, wie die Detektion von Antikörpern gegen den Zytomegalie-Virus im Spenderserum oder der Nachweis unterschiedlicher DNA- oder RNA-Sequenzen, wurden erfolgreich demonstriert /3/. Die Anzahl der Messflächen ist dabei durch die Spaltenanzahl des verwendeten CCD-Detektors und die optische Auflösung des lateral abbildenden Systems beschränkt. Die Erweiterung des SPR-Ansatzes auf zweidimensionale Arrays von Messflächen bedingt normalerweise den Verzicht auf winkelaufgelöste Messungen. Hier wurde ein alternativer Ansatz gewählt, um eine größere Anzahl von Messflächen detektieren zu können. Eine segmentierte Lichtquelle beleuchtet drei nebeneinander liegende Streifen und erlaubt damit die Beobachtung von drei separaten eindimensionalen Spotarrays (Abb. 3). Die Messungen der drei Arrays erfolgen nun sequentiell, wobei trotzdem zeitaufgelöste Analysen mit einer Auflösung unter einer Sekunde erreicht werden. Abhängig von der angestrebten Applikation können unterschiedliche mikrofluidische Systeme für die Probenzufuhr mit dieser Nachweisplattform kombiniert werden.

Aktuell wird das SPR System zur schnellen Detektion genetischer Variationen qualifiziert /4,5/. Dabei sind die Produkte einer Polymerase-Kettenreaktion (PCR, Biotype) durch 25 Basen lange, einsträngige DNA (»Tag«) markiert. Die komplementäre, einsträngige DNA-Sequenz (»Anti-Tag«) wird auf der Goldoberfläche des Chips mit einem Spotter (GeSiM mbH) strukturiert immobilisiert. Abbildung 4 zeigt die orts aufgelöste Veränderung des SPR-Signals nach der Bindung von PCR-Produkten an alle Messflächen und demonstriert

minimum of reflectivity is obtained and its shift is analyzed. As a result of integrating optical functionality into the injection molded Topas® chips (KDS Radeberg) no kind of immersion is needed for optical coupling between the chip and the device.

Example applications have been shown previously, e.g. the detection of antibodies against the cytomegaly virus in donor blood serum or the recognition of different DNA or RNA sequences /3/. Unfortunately, the number of measurement spots is limited by the number of columns of the CCD detector as well as the lateral resolution of the optical imaging system. Extending the SPR principle towards two-dimensional arrays usually requires dropping all angular resolution and related analysis. Here, another approach has been put forth in order to increase the number of spots to be analyzed. A segmented light source illuminates three neighboring stripes, corresponding to the analysis of three separate one-dimensional arrays of spots (Fig. 3). The analysis of these arrays is performed sequentially, still reaching a temporal resolution of analysis below one second. Different micro fluidic systems for sample delivery can be combined with this device depending on the desired application.

The system is currently established for the fast detection of genetic variations by SPR /4,5/. For this purpose, the products of a multiplexed polymerase chain reaction (PCR, Biotype) are tagged with specific 25 bases long, single-stranded DNA ("tag"). The complementary, single-stranded DNA sequence ("anti-tag") is immobilized as a spot pattern on the gold surface by means of spotting (GeSiM mbH). The spatially resolved SPR signal shift due to DNA binding onto 60 spots, except onto nine reference spots, is given in Fig. 4. It demonstrates the analysis of 60 measuring spots within a single channel of the system. The specificity of this detection is also given in Fig. 5. The signal values shown represent the averaged signals of nine experiments that have been performed on a single



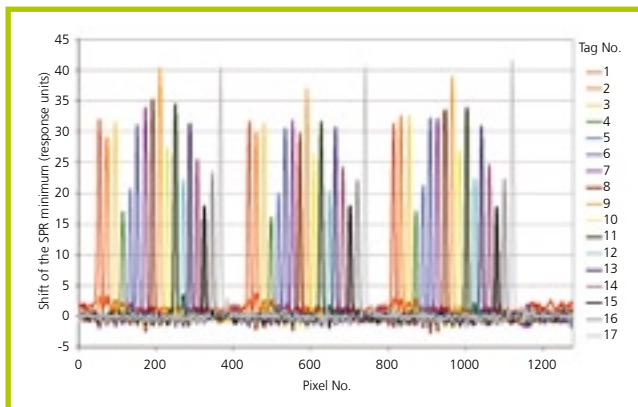
3

die Beobachtung von 60 Messflächen in einem der drei Messkanäle. Die Spezifität des Nachweises kann auch Abb. 5 entnommen werden. Die dargestellten Signale sind die Mittelwerte von neun Experimenten auf einem einzelnen Chip, da in jedem der drei Messkanäle alle Messflächen dreifach präpariert wurden /4/. Damit konnte die parallele Detektion von 180 Messflächen auf einem SPR-Polymerchip demonstriert werden.

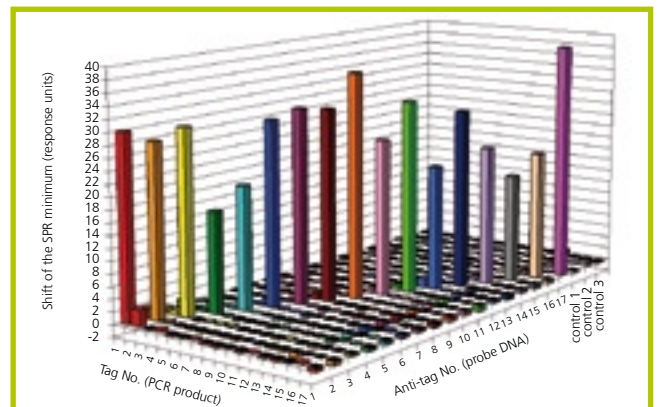
chip by preparing all spots threefold in each of the three channels /4/. Therefore, the parallel SPR analysis of 180 spots on a polymer chip could be demonstrated.

We acknowledge the BMBF and the fruitful cooperation with all partners in the BMBF funded project "SPR-Biochips" (FKZ 03WKBH2), especially KDS Radeberg and Biotype AG Dresden.

Besonderer Dank gilt dem BMBF und allen Partnern im BMBF-Projekt »SPR-Biochips« (FKZ 03WKBH2), insbesondere KDS Radeberg und Biotype AG Dresden.



**4** Hybridisierungssignale von einsträngiger DNA an 60 Spots (3 Blöcke mit je 17 komplementären und drei nicht komplementären Anti-Tags als Kontrolle), wobei an den 9 Kontrollspots keine Bindung beobachtet wird. / Hybridization signals of single-stranded DNA onto 60 spots (3 blocks with 17 complementary and three non-complementary anti-tags as references) without binding at the reference spots.



**5** Dreidimensionale Darstellung der Signale verschiedener PCR Produkte mit 25 Basen langen, einsträngigen PCR Tags auf den entsprechenden Anti-Tag-Spots /4/. / Three-dimensional diagram of signals due to the interaction of different PCR products with 25 bases long, single-stranded DNA tags on the corresponding anti-tag spots /4/.

## Literatur/References

/1/ Hoa, X.D.; Kirk, A.G.; Tabrizian, M.: Towards integrated and sensitive surface plasmon biosensors: a review of recent progress, *Biosens. & Bioelectron.* 23 (2007) 151-160.

/2/ Danz, N.; Hofmann, A.: Plasmonenresonanzsensor, DE102006041338.

/3/ Sonntag, F.; Schmieder, S.; Danz, N.; Mertig, M.; Schilling, N.; Klotzbach, U.; Beyer, E.: Novel lab-on-a-chip system for label-free detection of DNA hybridization and protein-protein interaction by surface plasmon resonance (SPR), *Proc. SPIE* 7365 (2009) 73650Q.

/4/ Mertig, M.; Kick, A.; Bönsch, M.; Katzschner, B.; Voigt, J.; Sonntag, F.; Schilling, N.; Klotzbach, U.; Danz, N.; Begemann, S.; Herr, A.; Jung, M.: A Novel Platform Technology for the Detection of Genetic Variations by Surface Plasmon Resonance, *IEEE SENSORS* (2009) 392 – 395.

/5/ Kick, A.; Bönsch, M.; Begemann, S.; Sonntag, F.; Schilling, N.; Voigt, J.; Katzschner, B.; Herr, A.; Danz, N.; Howitz, S.; Klotzbach, U.; Jung, M.; Brabetz, W.; Mertig, M.: SPR-basierte DNA-Mikroarrays, *Proc. 9. Dresdner Sensor-Symposium* (2009).

3 *Anordnung der drei Spotarrays (oben) und simulierte Beleuchtungsintensitäten (unten). / Arrangement of the three spot arrays (top) and simulated illumination intensity distributions (bottom).*

## AUTHORS

*Norbert Danz*

*Bernd Höfer*

*Frank Sonntag<sup>1</sup>*

*Alfred Kick<sup>2</sup>*

*Udo Klotzbach<sup>1</sup>*

*Michael Mertig<sup>2</sup>*

*Ralf Rosenberger*

*Harald Kießling*

*Wolfgang Buss*

<sup>1</sup>*Fraunhofer IWS Dresden*

<sup>2</sup>*Max-Bergmann-Zentrum für Biomaterialien und Institut für Werkstoffwissenschaft, Technische Universität Dresden*

## CONTACT

*Dr. Norbert Danz*

*Phone +49 3641 807-750*

*norbert.danz@iof.fraunhofer.de*

*Dr. Andreas Bräuer*

*Phone +49 3641 807-404*

*andreas.braeuer@iof.fraunhofer.de*



1



2

## OPTISCHER 3D-HANDSCANNER FÜR PATIENTENINDIVIDUELLE ATEMMASKEN

## OPTICAL HAND-HELD 3D SCANNER FOR INDIVIDUAL RESPIRATORY MASKS

Mobiles 3D-Scannen gewinnt in Industrie, Medizin, Archäologie und Kriminalistik eine immer größere Bedeutung. Im Unterschied zu anderen handgeführten Scannern, die vornehmlich mit Laserlicht arbeiten, wurde am Fraunhofer IOF der mobile handgeführte 3D-Scanner »kolibri CORDLESS« /1/ auf Basis der Streifenprojektions-technik entwickelt (Abb. 1), mit dem es möglich ist, an jedem Ort und in kurzer Zeit ohne großen Aufwand eine berührungslose 3D-Vermessung vorzunehmen.

Basis des Messsystems /2/ ist eine Hochgeschwindigkeitsprojektion und -aufnahme einer Sequenz von Streifenmustern mit einer Frequenz von 60 Hz, wodurch kurze Messzeiten (kleiner 250 ms) realisiert werden. Die Messgenauigkeit liegt bei bis zu 50 µm für die Vermessung eines Messfelds von 24 cm x 17,5 cm bei einem Arbeitsabstand von 40 cm. Innerhalb weniger Sekunden werden die Messpunkte in ein digitales 3D-Bild umgerechnet. Durch seine ergonomische Gestaltung und sein geringes Gewicht von 1,6 kg ist der Sensorkopf sehr gut zu handhaben. Die Steuerung und Energieversorgung erfolgt über ein mobiles System (Laptop), das über der Schulter getragen werden kann (Abb. 2). Ein iPod am Handgelenk dient zur schnellen Kontrolle und Visualisierung der Messung.

1 Sensorkopf »kolibri CORDLESS«. /2/ Gesamtsystem »kolibri CORDLESS«; Sensorkopf + iPod + Steuereinheit.

Mobile 3D scanning devices are gaining in importance in industry, medicine, and archaeology. Hand-held systems usually use laser technique and mobile fringe projection systems normally use a tripod for the sensor head positioning. In comparison the mobile optical 3D scanner "kolibri CORDLESS" /1/ (Fig. 1) based on fringe projection technique can be used both moveable and hand-held. It was developed at Fraunhofer IOF in Jena. The scanner makes contactless measurement of several measuring objects possible at any location in a short time with low effort.

The system /2/ is based on high velocity projection of a fringe pattern sequence and recording by a stereo camera pair with a frequency of 60 Hz which allows measurement times below 250 ms. The accuracy for a measuring field of 240 mm x 175 mm and a working distance of about 400 mm is up to 50 µm. The measuring values are converted into a digital 3D image within a few seconds. The handling of the sensor is very easy because of its small weight of 1.6 kg and its ergonomic design. Control and the power supply is realized by a mobile system (laptop) which can be carried over the shoulder (Fig. 2). An iPod at the wrist is used for a quick evaluation of the measurement and visualization of the measuring values.

1 Sensor head "kolibri CORDLESS". /2/ Complete system "kolibri CORDLESS", sensor head + iPod + control unit.



Eine Vollkörpervermessung ist durch softwaregestütztes Matching der Messdaten, die aus verschiedenen Ansichten gewonnen werden, möglich. Ebenso sind Farbe und Textur in hoher Auflösung erfassbar.

Speziell bei der Herstellung patientenangepasster Atemmasken wird dieses System zukünftig von der Firma Medizintechnik Kleeblatt in Regensburg eingesetzt. Diese Masken sind für alle Patienten gedacht, die langfristig beatmet werden müssen.

Herkömmliche Atemmasken können teilweise erhebliche Probleme verursachen, die auf schlechten Tragekomfort zurückzuführen sind.

Zu diesen Beschwerden zählen z. B.

- Empfindlichkeiten im Nasenrückenbereich,
- Luftaustritt an undichten Randbereichen,
- Schmerzen infolge von Druckbelastungen,
- Trockenheit im Mund,
- Belastendes Restvolumen beim Ein- und Ausatmen,
- Stresssituationen während der Abdrucknahme,
- Gewebedeformation durch die Verwendung von Silikon oder Gips zur Abdrucknahme.

Um diese Beschwerden signifikant zu lindern oder abzustellen, bestand das Ziel, die Atemmaske so genau wie möglich der Gesichtsform anzupassen und damit eine individuelle Maske zu realisieren. Hierzu wurde die nachfolgend dargestellte durchgängige Prozesskette von der Datenaufnahme bis zur Maskenfertigung aufgebaut.

A whole body measurement is possible by using software driven matching of the measuring data which are obtained from different views. Additionally, color and texture may be obtained in high resolution.

Especially for the production of individually fitted respiratory masks, the scanner system will be used by Medizintechnik Kleeblatt in Regensburg. The masks are designed for so called sleep apnoeics, i.e. patients with a range of breathing difficulties which require the carriage of respiratory masks during the night (Fig. 3).

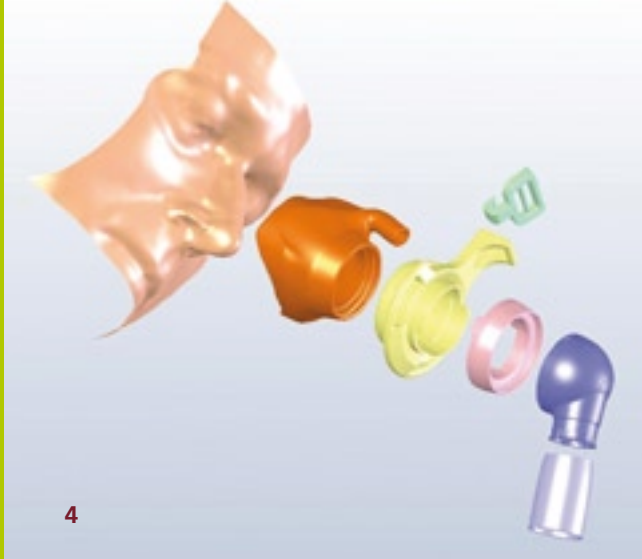
Usual respiratory masks may sometimes cause considerable problems, attributable to bad comfort of carriage.

These complaints may include

- Increased sensitivity in the area of the bridge of the nose,
- Air emission at leaking marginal areas,
- Pains resulting from compressive loads,
- Dry mouth,
- Stressing remaining volume on inhalation and expiration.
- Stressing at impression taking
- Tissue deformation using silicon or cast.

In order to reduce or prevent these complaints, the goal was to fit the mask as well as possible to the face shape of the patient, thus creating an individual mask. In order to achieve this goal, the following process chain from the data recording to the mask production was developed.





Ausgangspunkt ist die berührungslose schnelle Erfassung der Gesichtsgeometrie mit Hilfe des 3D-Handscanners. Diese 3D-Daten werden via Internet an die Firma KET übermittelt, wo unter Verwendung von CAD-CAM-Technologien aus den individuellen Gesichtsdaten ein angepasster Dichtwulst für die Atemmaske konstruiert und gefertigt wird. Dieser Dichtwulst wird mit dem restlichen Maskenkörper verbunden und bildet das Kernstück der individuellen Gesichtsmaske, die aus den Teilen Individualmaske mit Dichtwulst und Füllventil – orange, Maskengrundkörper – gelb, Gurthaken – grün und Drehwinkel – rosa + blau besteht (Abb. 4). Der Dichtwulst bietet die Möglichkeit, die Luftfüllung nach individueller »Tagesform« anzupassen.

In einem ersten Test wurden im schlafmedizinischen Zentrum Dresden die individuellen Atemmasken bei zehn Patienten mit einer vierwöchigen Anwendungsdauer untersucht (Abb. 5). Das Ergebnis dieser Untersuchung wird im Augenblick ausgewertet. Nach einem ersten Eindruck erscheint die klinische Erprobung positiv verlaufen zu sein.

An der Weiterentwicklung und Vermarktung der neuen Maske unter dem Namen »AEROplus« arbeitet derzeit die Firma Medizintechnik Kleehaupt.

After the fast contactless scan of the face geometry by the 3D scanner the data are transmitted via internet to the KET company. There an adopted sealing bulge is designed and produced from the individual face data using CAD-CAM technologies. This sealing bulge is connected with the remaining mask body and becomes the key part of the individual breathing mask consisting of the individual mask with sealing bulge and filling valve parts – orange, basic mask body – yellow, belt hook – green, turning angle – pink and blue (Fig.4). The sealing bulge makes individual air filling possible.

The individual breathing masks were initially tested at the center for sleep medicine in Dresden on ten patients over four weeks (Fig.5). The results of the clinical testing are currently analyzed and seem to be positive.

Medizintechnik Kleehaupt is currently working on the further development and merchandizing of the product under the label "AEROplus".

4 Aufbau der individuell angepassten Atemmaske (orange: individualisierter Teil). © KET Kunststoff- und Elasttechnik GmbH.

5 Anprobe zweier Masken auf einer Gesichtsform. Die Form wurde aus den Gesichtsmessdaten durch 3D-Druckverfahren hergestellt. © KET Kunststoff- und Elasttechnik GmbH.

4 Structure of the individually adopted breathing mask (orange: individualized part). © KET Kunststoff- und Elasttechnik GmbH.

5 Fit of two masks to a face shape. The shapes were produced from the face data by 3D impression techniques. © KET Kunststoff- und Elasttechnik GmbH.

## Literatur/References

/1/ Munkelt, C.; Bräuer-Burchardt, C.; Kühmstedt, P.; Schmidt, I.; Notni, G.: Cordless hand-held optical 3D sensor, Proc. SPIE Vol. 6618, 66180D-1, (2007).

/2/ Munkelt, C.; Schmidt, I.; Bräuer-Burchardt, C.; Kühmstedt, P.; Notni, G.: Cordless portable multi-view fringe projection system for 3D reconstruction, Proc. CVPR, (2007).

## AUTHORS

*Peter Kühmstedt*

*Gunther Notni*

*Ingo Schmidt*

*Konrad Kleehaupt<sup>1</sup>*

*Gunter Böttcher<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Medizintechnik Kleehaupt*

<sup>2</sup>*KET Kunststoff- und Elasttechnik  
GmbH*

## CONTACT

*Dr. Peter Kühmstedt*

*Phone +49 3641 807-230*

*peter.kuehmstedt@iof.fraunhofer.de*



## LÖTEN VAKUUMDICHTER FENSTER FÜR MEDIZINTECHNISCHE PRODUKTE

### SOLDERING OF HERMETICALLY SEALED WINDOWS FOR BIOMEDICAL DEVICES

Die Miniaturisierung von Endoskopen für minimal-invasive operative Eingriffe vermindert die Risiken und die Dauer von Operationen und senkt gleichzeitig die Schmerzbelastung des Patienten. Neuartige optische Designs und miniaturisierte Komponenten, z. B. Gradientenindexlinsen, erlauben die Verkleinerung von Endoskopobjektiven. Für die dauerhafte Funktion eines Endoskops sind ein hermetisch dichter Verschluss mit einem optisch transparenten Fenster sowie die Langzeitstabilität der Fügeverbindung während mechanischer Reinigung und Desinfektionsprozessen notwendig. Durch Löten erzeugte stoffschlüssige, metallische Fügeverbindungen stellen eine autoklavierbare Alternative zu polymerbasierten Klebstoffen dar.

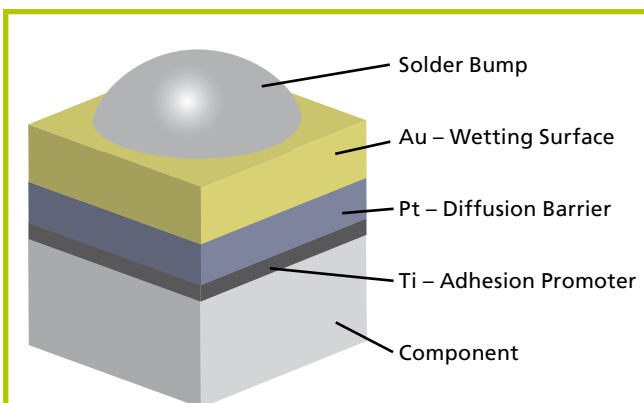
Miniaturization of endoscopes for minimally invasive diagnostic medical procedures reduces risk and duration of surgery, as well as lowering the patient's burden of pain. New optical designs and miniaturized optical components, such as gradient index lenses, allow for the downsizing of endoscopic systems. To ensure long-lasting operation of the endoscope both during usage and cleaning processes, the objective has to be hermetically sealed with an optical transparent window. This sealing has to provide long term stability and resist mechanical cleaning and disinfection procedures. Soldering can provide material fit, metal-based joints that permit for processing in steam autoclaves as an alternative to polymeric adhesives.

**1** Montagevorrichtung mit fixierter Baugruppe einer Endoskopspitze mit Solderjet-Bondkopf.

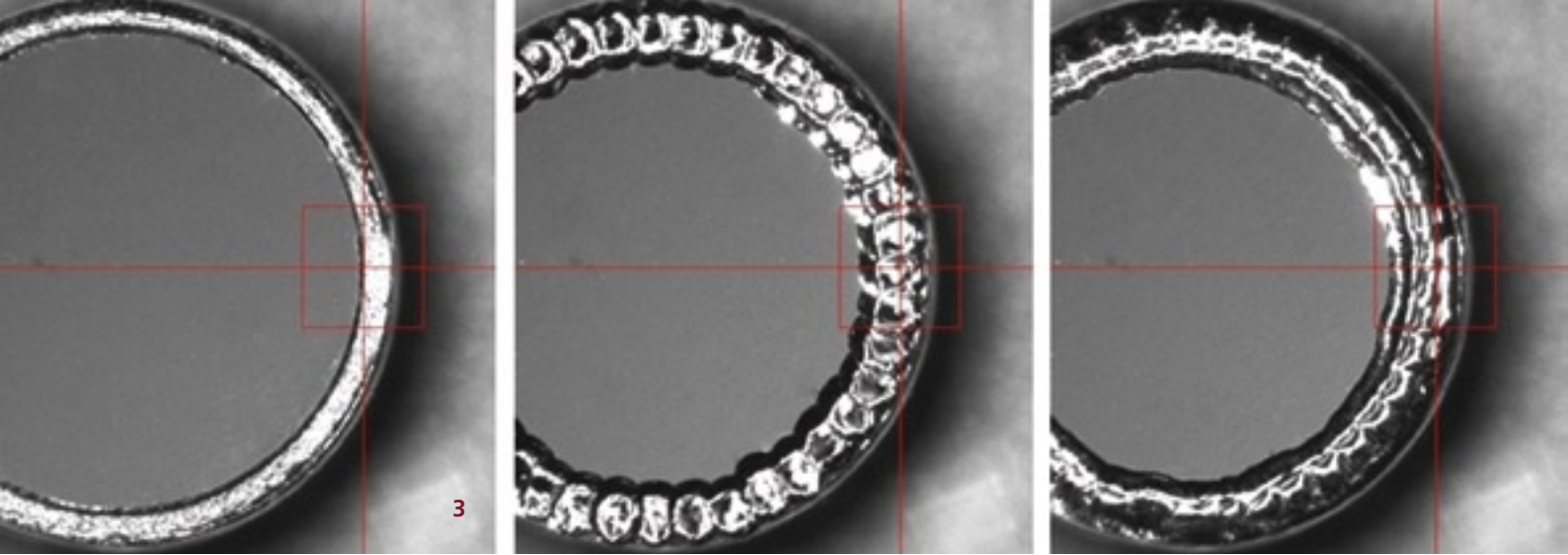
**1** Mounting device and fixated subassembly of an endoscopic tip with Solderjet bond-head.

Das laserbasierte Solderjet Bumping erlaubt bei lokal und zeitlich begrenztem Eintrag thermischer Energie die flussmittelfreie Verbindung von unterschiedlichen metallischen bzw. metallisierten Materialien (Abb. 2). Bei diesem Verfahren werden Lotkugeln mit einem Durchmesser im Bereich von 80  $\mu\text{m}$  bis 760  $\mu\text{m}$  vereinzelt, in einer Platzierkapillare (Abb. 1) durch einen Laserpuls umgeschmolzen und aus der Kapillare durch einen Stickstoffstrom ausgestoßen, um beide Fügepartner zu benetzen. Die Verwendung von Edelmetallen als lötfähige Metallisierung sowie der mechanische Impuls des Lottropfens verbessern die Benetzungseigenschaften im flussmittelfreien Prozess. Die Auswahl aus verschiedenen Lotlegierungen, von niedrigschmelzenden BiSn-Loten über bleifreie Zinn-basierte Lote bis zum hochschmelzenden eutektischen AuSn-Lot, sowie die Variation der Prozessparameter erlauben die flexible Anpassung an unterschiedliche Benetzungsverhältnisse und komplexe Fügegeometrien /1/.

Laser-based Solderjet Bumping allows for the flux-free creation of solder joints between different metallic or metalized materials with localized and time-restricted insertion of thermal energy (Fig. 2). The process singulates solder spheres with diameters ranging from 80  $\mu\text{m}$  to 760  $\mu\text{m}$  from a reservoir and feeds them to a placement capillary (Fig. 1). Next to the joint geometry, the solder sphere is then heated and melted by a laser pulse and jetted as a liquid solder droplet towards to both components to be joined by means of nitrogen pressure. The usage of noble metallization and the kinetics of the solder droplet enhance wetting in the flux-free process. The selection from a wide variety of solder alloys ranging from the low-melting BiSn alloy over lead-free tin-based solders to the high-melting eutectic AuSn solder alloy, as well as the parameterization of the process allow for precise adjustment to different wetting behaviors and complex shaped joining geometries /1/.



**2** PVD Dünnschichtmetallisierung zur Erzeugung von Benetzungsschichten auf nichtmetallischen Komponenten. / PVD metallization system to provide wettable surfaces on non-metallic components.



Unter Nutzung des Solderjet-Verfahrens werden für Endoskopobjektive Saphirfenster (Durchmesser 1,2 mm) durch überlappende Platzierung von Au80Sn20-Lotkugeln (Durchmesser 100 µm) mit Edelstahlkapillaren hermetisch dicht verlötet (Abb. 1, 4). Für den Lötprozess ist es notwendig, die Oberflächen beider Fügepartner lokal mit einer benetzungsfähigen Metallisierung zu versehen (Abb. 2). Dafür kommt eine etablierte PVD-Dünnschichtmetallisierung (Haftvermittler: Titan, Diffusionsbarriere: Platin, Benetzungsschicht: Gold) mit einer Gesamtdicke von 500 nm zum Einsatz. Bereits durch die überlappende Platzierung der schmelzflüssigen Lotkugeln, d. h. in nur einem Umschmelzschritt pro Lottropfen, wird die hermetische Versiegelung erzielt (Abb. 3, Mitte). Ein nachfolgender zusätzlicher Umschmelzvorgang zur Homogenisierung der Lotnaht ist optional (Abb. 3, rechts). Leckratenuntersuchungen mit Helium weisen Leckraten besser als  $10^{-8}$  mbar·l/s bis  $4 \cdot 10^{-9}$  mbar·l/s auf. Nach Überdruckprüfung (5 bar, Stickstoff) und vier Autoklavierzyklen (134 °C; 2,1 bar; Wasserdampf) zeigen optische Inspektion und Leckratenprüfungen keine Veränderung der Demonstratoren.

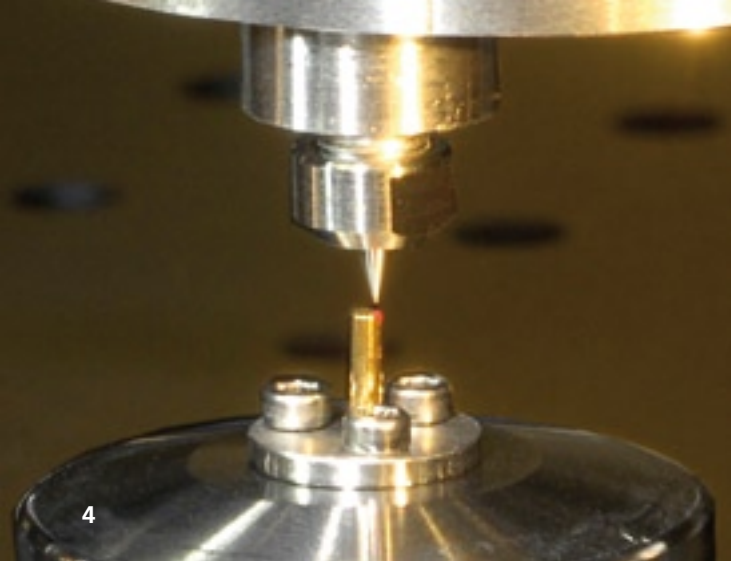
Die Untersuchungen zeigen, neben bisherigen Ergebnissen zu erzielbaren Bondkräften und Fügegenauigkeiten im sub-µm-Bereich, die Eignung des vorgestellten Fügeverfahrens für den hochpräzisen Aufbau medizintechnischer Mikrosysteme und hybrider mikrooptischer Systeme /2/. Solderjet Bumping erlaubt die Erzeugung multifunktionaler stoffschlüssiger Verbindungen, die neben mechanischer, elektrischer und thermischer Kontaktierung auch die Funktion der hermetischen Versiegelung erfüllen können.

Das Projekt wird mit Mitteln des BMBF innerhalb des Rahmenkonzepts »Forschung für die Produktion von morgen« (FKZ 02PC2063) gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Produktion und Fertigungstechnologien, betreut.

Windows made of sapphire (diameter 1.2 mm) have been soldered to endoscope tips made of stainless steel by subsequent placement of eutectic AuSn solder spheres (diameter 100 µm) using the Solderjet Bumping technique (Fig. 1, 4). The window and the endoscope tip are covered with a wettable metallization by a physical vapor deposition process (PVD) to allow for soldering (Fig. 2). The established PVD process provides a thin film metallization system consisting of titanium, platinum, and gold with an overall thickness of 500 nm assisting flux-free processing. The overlapping placement of liquid solder droplets leads to hermetic sealing of the joint in only one reflow step per solder drop (Fig. 3, center). An additional reflow of the complete solder joint to provide homogenization is therefore optional or even unnecessary (Fig. 3, right). Measurements of leakage rate with helium showed results better than  $10^{-8}$  mbar·l/s to  $4 \cdot 10^{-9}$  mbar·l/s. Pressure test (5 bar, nitrogen) and four sterilization cycles in an autoclave (134 °C, 2.1 bar, steam) showed no detectable change during optical inspection and measurement of leakage rate.

In addition to present results on bonding forces and sub-micron joining accuracy and repeatability the investigation shows the suitability of Solderjet Bumping for the precision packaging and assembly of biomedical microsystems and hybrid-optical systems /2/. The technique allows for the creation of multi-functional, material fit joints that provide mechanical, electrical, and thermal contacting as well as hermetical sealing.

This research and development project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the Framework Concept "Research for Tomorrow's Production" (fund number FKZ 02PC2063) and managed by the Project Management Agency Forschungszentrum Karlsruhe, Production and Manufacturing Technologies Division.



### Literatur/References

/1/ 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 2009.

/2/ Burkhardt, T., Kamm, A., Beckert, E., Eberhardt, R., F. Buchmann, Tünnermann, A.: Solderjet bumping for the assembly of optical fibers, VII. ITG Workshop Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik, edited by U. H. P. Fischer-Hirchert, pp. 42-46, ISBN 978-3-86955-008-4 (2009).

3 Saphirfenster gelötet in Edelstahlkapillare (Links: Fügestelle vor dem Lötprozess, Mitte: Lotapplikation durch Solderjet Bumping, Rechts: Zweites Umschmelzen zur Homogenisierung der Lotnaht). / Window soldered into stainless steel capillary (left: Joining geometry before soldering, center: Application of solder alloy by Solderjet Bumping, right: Second reflow for homogenization of solder joint).

4 Platzierkapillare des Solderjet-Bondkopfes an der Fügestelle einer Endoskopspitze. / Placement capillary next to joint geometry of the assembly.

## AUTHORS

Thomas Burkhardt

Marcel Hornaff

Wieland Stöckl

Erik Beckert

Ramona Eberhardt

## CONTACT

Thomas Burkhardt

Phone +49 3641 807-339

thomas.burkhardt@iof.fraunhofer.de

Dr. Ramona Eberhardt

Phone +49 3641 807-312

ramona.eberhardt@iof.fraunhofer.de



## BREITBANDIGE DIELEKTRISCHE SPIEGEL FÜR MEDIZINISCHE ANWENDUNGEN

### BROADBAND DIELECTRIC FRONT-SURFACE MIRRORS FOR MEDICAL APPLICATIONS

Medizinische Anwendungen, insbesondere zahnmedizinische, erfordern hochreflektierende farbneutrale Spiegel mit einer hohen Abbildungsqualität. Metallische Spiegel sind in der Regel farbneutral, weisen aber abhängig von der Ausführung als Front- oder Rückflächenspiegel unterschiedliche Nachteile auf. Rückflächenspiegel verwenden meistens Aluminium oder Silber als reflektierendes Material. Sie weisen hohe Reflexionswerte auf, aber die Konturen der Abbildung verlieren durch zusätzliche Reflexionen an Vorder- und Rückseite des Substrats an Schärfe. Frontflächenspiegel erzielen eine sehr gute Abbildungsqualität, doch die Reflexionswerte sind aufgrund der verwendeten Materialien (oft Chrom oder Rhodium) deutlich geringer.

Ziel eines gemeinsamen Projekts mit der Firma E. HAHNENKRATT GmbH war die Entwicklung dielektrischer Frontflächenspiegel, welche im sichtbaren Spektralbereich (400 nm – 700 nm) eine Reflexion von mehr als 95 % aufweisen. Des Weiteren sollten die hergestellten Spiegel stabil gegenüber einer Reinigung mit Desinfektionsmitteln und Autoklavierungen sein.

Medical applications, especially dentistry, require highly reflective color-neutral mirrors with a high image quality. Metallic mirrors are usually color-neutral but have different disadvantages depending on their realization as front surface or rear surface mirrors. Rear surface mirrors are commonly based on aluminum or silver as reflective materials. They achieve a high reflectivity but the outlines of the image lose sharpness due to additional reflections on the surfaces of the substrate. Front surface mirrors have an excellent image quality but their reflectivity is considerably lower due to the used materials (often chrome or rhodium)

The aim of this joint project with the company E. HAHNENKRATT GmbH was the development of a dielectric front-surface mirror that achieves a reflectivity greater than 95 % in the visible spectral region (400 nm -700 nm). Furthermore, the mirrors had to be stable against cleaning procedures with disinfectants and autoclaving.

1 Dielektrische Frontflächenspiegel für zahnmedizinische Anwendungen. © E. Hahnenkratt GmbH.

1 Dielectric front-surface mirrors for dentistry applications. © E. Hahnenkratt GmbH.

Es wurden erfolgreich drei verschiedene Schichtsysteme entwickelt. Zwei rein dielektrische Systeme mit jeweils 34 Schichten und einer Gesamtdicke von rund 3  $\mu\text{m}$  wurden mittels Magnetronspütern bzw. ionengestützter Verdampfung realisiert. Ergänzend wurde per Magnetronspütern ein hybrides Schichtsystem hergestellt, welches aus einem 22-lagigen dielektrischen System auf der Frontseite und einer mit Silber verspiegelten Rückseite bestand.

Das endgültige Schichtsystem erreicht eine Reflexion von mehr als 95 % in einem Spektralbereich von 440 nm bis 830 nm und übertrifft die bisher verfügbaren Spiegel deutlich.

Three different coatings were developed. Two pure dielectric coatings consisting of 34 layers each and a total thickness of approximately 3  $\mu\text{m}$  were deposited via magnetron sputtering and ion assisted deposition. Additionally, a hybrid coating consisting of a 22 layered dielectric reflector on the front surface and a silver mirror on the rear surface was deposited.

The final coating achieves a reflectivity greater than 95 % in a spectral region of 440 nm to 830 nm which clearly exceeds the mirrors available at present.

## AUTHORS

*Wieland Stöckl*

*Mark Schürmann*

*Michael Scheler*

*Christoph Gödeker*

*Johannes Jobst*

*Norbert Kaiser*

*Peter Schepperheyn<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>E. HAHNENKRATT GmbH

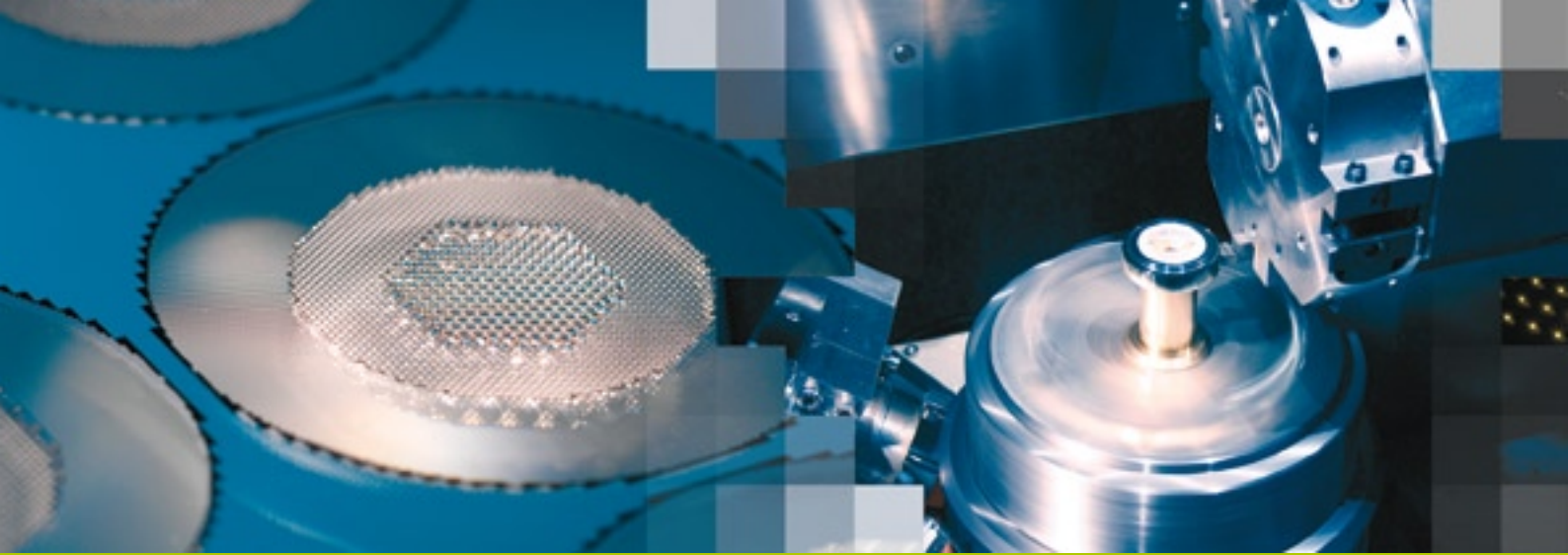
## CONTACT

*Dipl.-Ing. (FH) Wieland Stöckl*

*Phone +49 3641 807-324*

*wieland.stoeckl@iof.fraunhofer.de*



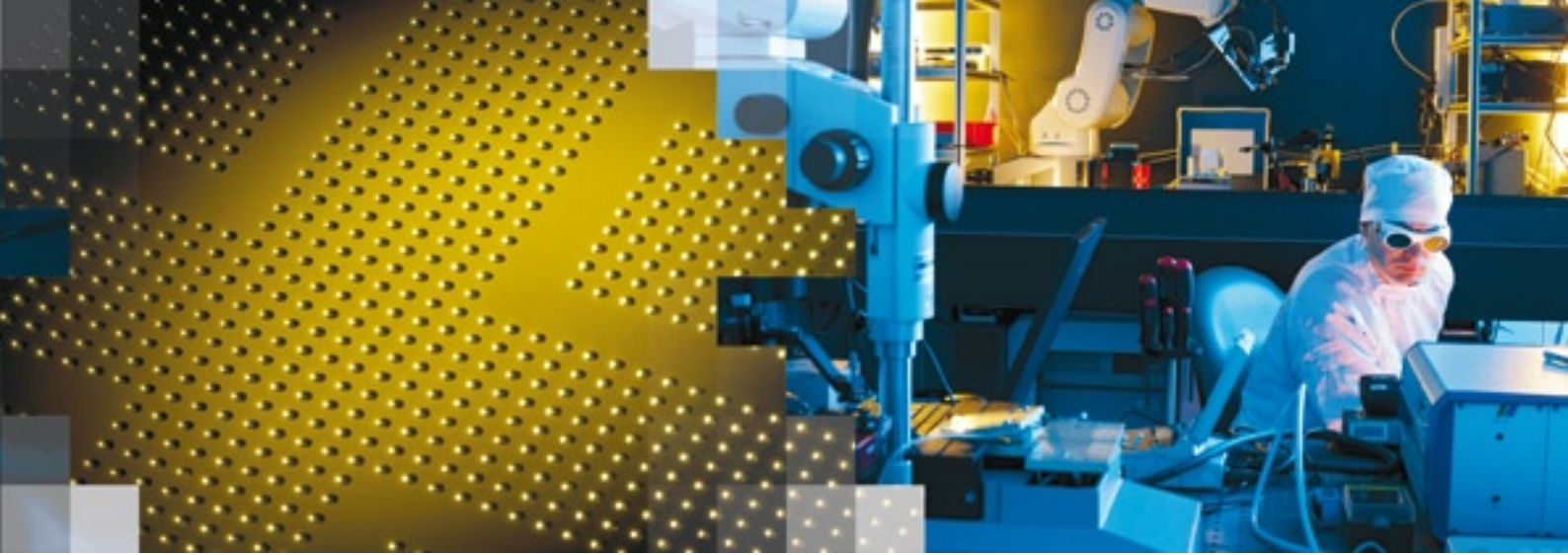


## TECHNOLOGIE

Für Lösungen mit Licht ...  
... bewährte Prozesse verbessern,  
neue Technologien entwickeln.

## TECHNOLOGY

Improve successful processes,  
develop new technologies ...  
... for solutions with light.



Das IOF und das IAP sind spezialisiert auf die industrienahe Entwicklung von Methoden des optischen und mechanischen Designs, die Funktionalisierung von Oberflächen, Verfahren zur Herstellung von optischen Komponenten und Systemen sowie Bildgebung und Messtechnik.

Einen Schwerpunkt bilden Technologien zur direkten Herstellung von Optiken, wie z.B. die hochpräzise Diamantzerspanung. Auf modernsten Maschinen und in Kombination mit neuester Messtechnik werden die technologischen Möglichkeiten erforscht und optimiert, um den steigenden Anforderungen an die Präzision von Optiken zur Erdbeobachtung oder für astronomische Geräte Rechnung zu tragen. Lithographische Verfahren zur Erzeugung von Mikro- und Nanostrukturen mit höchster Genauigkeit auf bis zu 12" großen Substraten werden ständig für High-Tech-Anwendungen weiter entwickelt.

Eine der grundlegendsten Technologien zur Leistungssteigerung optischer Systeme sind Beschichtungen. Mit optischen Schichten können Oberflächen für die vielseitigen Anforderungen moderner Anwendungen maßgeschneidert werden. Dazu werden vorhandene Beschichtungsprozesse angepasst und optimiert, neue Prozesse entwickelt und in die Industrie transferiert.

Die Miniaturisierung optischer, optoelektronischer und optomechanischer Systeme erfordert die Entwicklung neuartiger Montage- und Justagetechnologien, beispielsweise für die Fertigung von Hochleistungskomponenten für Faserlaser.

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

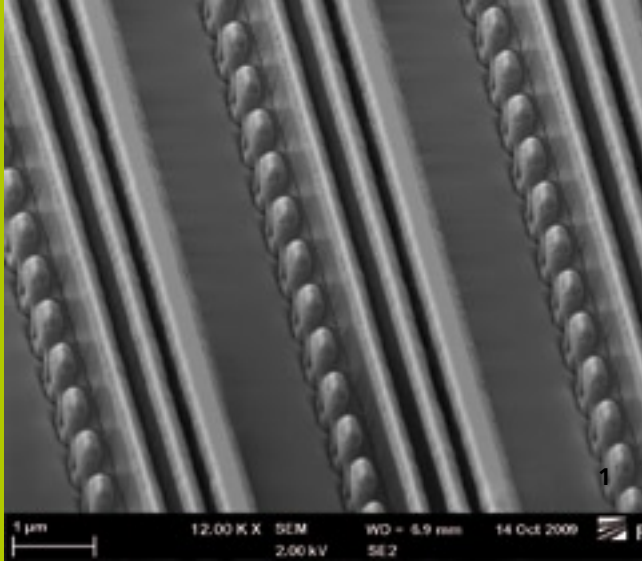
The IOF and the IAP specialize in the industry-oriented development of methods in optical and mechanical design, functionalization of surfaces, processes to manufacture optical components and systems as well as imaging methods and metrology.

Technologies for the direct manufacture of optics, e.g. ultra-precise diamond cutting, form one focal area. Technological possibilities are investigated and optimized on ultramodern machines and in combination with the latest metrology in consideration of the growing demands on the precision of optics for earth observation or for astronomical equipment. Lithographic processes to create microstructures and nanostructures with the highest accuracy on substrates up to 12" large are being continuously developed for high-tech applications.

Coatings are one of the most basic technologies to increase the performance of optic systems. With optical coatings, surfaces can be tailored to the diverse demands of modern applications. In addition, existing coating processes are adapted and optimized, new processes are developed and transferred to industry.

The miniaturization of optical, opto-electronic and opto-mechanical systems requires the development of novel assembly and alignment technologies, for example for the manufacture of high-performance components for fiber lasers.

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



## SPEKTROMETERGITTER FÜR DIE GAIA-WELTRAUMMISSION

## SPECTROMETER GRATING FOR THE GAIA SPACE MISSION

Spektrometergitter werden für verschiedene wissenschaftliche Weltraummissionen oder die Erdbeobachtung eingesetzt.

Die hohen technischen Ansprüche, die an die in den Weltraum zu bringenden Instrumente gestellt werden, spiegeln sich auch in den Anforderungen für die Herstellung dieser Gitter wieder.

Ein solches Instrument ist das Radial Velocity Spectrometer (RVS) der Astrometriemission Gaia der ESA /1/. Das RVS soll dabei der Vermessung von Sternentfernungen dienen, die an Hand der Rotverschiebung einer Spektrallinie des Elements Kalzium des beobachteten Objekts im Wellenlängenbereich zwischen 847 nm und 874 nm durchgeführt wird. Zentrales Bauteil des Spektrometers ist ein geblaztes Transmissionsgitter mit einer Gitterperiode von 3,1 µm. Dessen charakteristische Parameter, wie die laterale Größe von 205 mm x 155 mm, die Abbildungsqualität mit einem Wellenfrontfehler < 8 nm RMS sowie die geforderte Beugungseffizienz von >70 % machen dieses Gitter zu einem äußerst anspruchsvollen Element.

Die Gesamtheit dieser Forderungen ist nur äußerst schwer mit Gittern erfüllbar, die mit konventionellen Herstellungsmethoden, wie Ritzen oder Interferenzlithographie, erzeugt werden.

Different earth-observation and scientific space missions require special spectrometer gratings. As satellite instruments typically operate close to technological limits, the realization of the respective gratings is also extremely demanding. One such instrument is the Radial Velocity Spectrometer (RVS) of the ESA astrometry mission Gaia /1/. The RVS is dedicated to the measurement of star distances by deriving the red shift of a measured object by a spectral signature of the element calcium in the spectral range between 847 nm and 874 nm. The heart of this spectrometer is a blazed transmission grating with a grating period of 3.1 µm. Its characteristic parameters, like the lateral dimensions of 205 mm x 155 mm, imaging performance (wave front error < 8nm RMS), and a required diffraction efficiency of > 70 %, make it an extremely demanding element. Furthermore, it must be qualified for application in a space environment. The entirety of all these parameters makes it difficult to fulfill them with gratings built by conventional methods like ruling or interference lithography.

1 REM-Aufnahme der Gitterstruktur. Die kontinuierliche Phasenfunktion innerhalb einer Gitterperiode ist durch eine binäre Subwellenlängenstruktur erzeugt.

1 SEM-image of the grating structure. The continuous phase shift within one grating period is realized by a binary sub-wavelength pattern – a so-called effective medium structure.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie, die im Auftrag der ESA im Jahr 2008 am IOF durchgeführt wurde, sollte daher eine alternative Herstellungstechnologie für das RVS-Gitter gefunden werden. Auf der Basis langjähriger Erfahrungen in der mikro- und nanostrukturierten Optik /2/ konnte eine spezielle Gitterstruktur mit einer effektiven Brechungsindexvariation entwickelt werden, die sowohl die geforderte optische Funktion als auch die Randbedingungen des Herstellungsprozesses erfüllt. Die Struktur eines solchen effektiven Mediums besteht aus binären Substrukturen innerhalb einer Gitterperiode, deren laterale Dimension unterhalb der Wellenlänge der Anwendung liegt. Dadurch spürt das Licht die Struktur nur in Form eines gemittelten Brechungsindex. Der lokale Brechungsindex ist dann eine Funktion des ortsabhängigen Füllfaktors der Struktur. Abbildung 1 zeigt eine REM-Aufnahme des Gittermusters, welches für das RVS-Gitter entwickelt wurde. Deutlich wird der Aufbau der Gitterperiode aus den Subwellenlängenstrukturen mit der Variation des lokalen Füllfaktors. Das Oberflächenprofil des Gitters hat lediglich zwei Höhenstufen, wodurch dieser Ansatz einen mehrstufigen lithographischen Herstellungsprozess umgeht. Dadurch werden auch die negativen Auswirkungen von Überdeckungsfehlern zwischen verschiedenen Lithographieebenen, wie die Verringerung von Beugungseffizienz und Abbildungsqualität, vermieden.

Das Gitter wurde am »Center for Advanced Micro- and Nano-Optics« /3/ des Fraunhofer IOF mittels hochauflösender Elektronenstrahlolithographie und reaktiven Ionenätzprozessen in einem Kieselglassubstrat hergestellt. Mit diesem Element findet das Prinzip der effektiven Medien erstmalig eine reale Anwendung außerhalb reiner Reflexminderung.

Finding an alternative realization technology for the Gaia RVS grating was the aim of a feasibility study conducted by IOF on behalf of ESA in 2008. Based on the long term experience in micro- and nano-structured optics /2/, a very special grating structure comprising an effective refractive index variation has been developed which fulfills both the optical requirements and the constraints of the fabrication process. This so-called effective medium structure is composed of binary sub-structures within one grating period with lateral extensions well below the operation wavelength used in the application. Such structures are experienced by the illumination light only as an averaged refractive index. The local refractive index is a function of the local filling factor of the structure. Figure 1 shows an SEM image of the final grating pattern developed for the RVS grating. It can be seen that the grating period is composed of sub-wavelength structures with a variation of the local sub-structure density. The grating surface profile has only two height levels. This approach avoids the need for multiple successive lithography steps and thus, the efficiency- and wave-front-performance degrading effects of misalignment between the different lithography layers.

The grating has been fabricated at the "Center for Advanced Micro- and Nano-Optics" /3/ of the Fraunhofer IOF by high resolution electron-beam lithography on a SB350 OS (Vistec) system and successive reactive ion etching processes in a fused silica substrate. With this element, the principle of effective media is used for the first time in a real world application outside of pure reflection reduction.

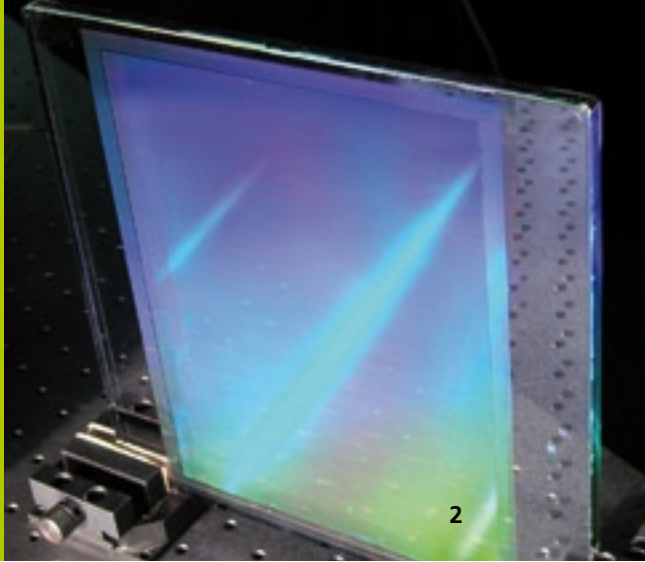


Abbildung 2 zeigt das fertige RVS-Gitter, für das die Erfüllung aller relevanten Parameter erfolgreich demonstriert werden konnte. Im Ergebnis der Machbarkeitsstudie wurde das Fraunhofer IOF im Januar 2009 als Lieferant für die Flugmuster des Gitters ausgewählt. Deren Auslieferung ist für Februar 2010 geplant. Der Gaia-Satellit, und damit auch unser Gitter, soll im Dezember 2011 in den Weltraum gestartet werden.

#### Danksagung

Die Herstellung der Gitter erfolgte mit einem Elektronenstrahlschreiber SB350 OS. Die Anschaffung dieser Anlage wurde durch die Europäische Union, den Freistaat Thüringen und die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt (FZK: B 408 – 04004).

A full-size version of the RVS grating is shown in Fig. 2. The compliance of the design and the technology to fulfill all relevant grating parameters has been demonstrated successfully. As a result, Fraunhofer IOF was selected as a supplier for Gaia RVS flight gratings in January 2009. The fabrication of these gratings is still in progress and delivery is scheduled for February 2010. The Gaia satellite, and thus our grating, is planned to be launched in December 2011.

#### Acknowledgments

All gratings exposures for this study were done with an e-beam writer SB350 OS. The purchase of this facility was supported by the European Union (FZK: B 408 – 04004).

2 Photographie des Spektrometergitters. Die nutzbare Gitterfläche hat eine Abmessung von 155 mm x 205 mm.

2 Photograph of the spectrometer grating. The useful grating extension is 155mm x 205mm.

## Literatur/References

/1/ <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=GAIA&page=index>  
<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=26>

/2/ Zeitner, U.D.; Kley, E.-B.: Advanced Lithography for Micro-Optics, Conference on Laser Beam Shaping VII, SPIE Annual Meeting, Proc. SPIE 6290, Aug. 2006.

/3/ [www.cmn-optics.org](http://www.cmn-optics.org)

## AUTHORS

*Uwe Detlef Zeitner*

*Dirk Michaelis*

*Tino Benkenstein*

*Torsten Harzendorf*

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

*Jörg Fuchs<sup>1</sup>*

*Matthias Erdmann<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup> *ESA-ESTEC, Noordwijk, Netherlands*

## CONTACT

*Dr. Uwe Detlef Zeitner*

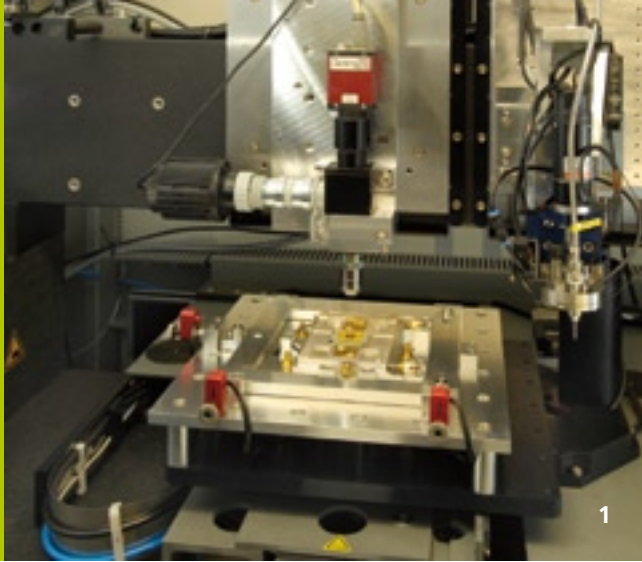
*Phone +49 3641 807-403*

*[uwe.zeitner@iof.fraunhofer.de](mailto:uwe.zeitner@iof.fraunhofer.de)*

*Dr. Andreas Bräuer*

*Phone +49 3641 807-404*

*[andreas.braeuer@iof.fraunhofer.de](mailto:andreas.braeuer@iof.fraunhofer.de)*



## MEHRFACH-ABLENKARRAYS FÜR DIE »MULTI SHAPED BEAM LITHOGRAPHY«

### MULTI DEFLECTION ARRAYS FOR "MULTI SHAPED BEAM LITHOGRAPHY"

Die »Multi Shaped Beam Lithography« stellt einen aussichtsreichen Technologieansatz der maskenlosen, direkt schreibenden Lithographie mit hohem Durchsatz zur Realisierung von Strukturgrößen im »22 nm node« /1/ dar. Schlüsselkomponenten zur Realisierung dieses Verfahrens sind Mehrfach-Ablenkarrays, die eine Vielzahl von Einzelelektronenstrahlen, generiert durch mikromechanisch hergestellte Aperturen, durch ansteuerbare Elektroden ablenken.

Um die Ablenkung der Elektronenstrahlen in x- und y-Richtung zu erreichen, werden zwei gekreuzte Mehrfach-Ablenkarrays zu einer Multi-Deflection-Array (MDA)-Baugruppe integriert, da die Ablenkrichtung der MDA-Chips, bedingt durch die hohe Dichte der Elektrodenanordnung, auf eine Koordinate beschränkt ist.

Der Einsatz der MDA-Baugruppen in einer Elektronenstrahlanlage erfordert den Einsatz vakuumtauglicher, unmagnetischer Materialien mit geringstem Ausgasverhalten. Die Montage erfolgt unter Reinraumbedingungen (Klasse 5 ISO 14644-1). Für die Gewährleistung der notwendigen Justier- und Messunsicherheiten ist eine auf 1 K temperaturstabilisierte Montageumgebung Voraussetzung.

Multi Shaped Beam Lithography is a promising approach for high throughput mask and direct writing that addresses the shot count/writing time bottleneck /1/ for the 22 nm node and beyond. Multiple apertures and electrodes of several MEMS Multi Deflection Arrays (MDA) are the MSB key components.

The x- and y-deflection functionality of a Multi-Beam Deflector (MBD) requires the face to face alignment and mounting of two individual deflection arrays that deflect the beam either in the x- or y-direction only. Due to this, mounting each MDA chip on an individual LTCC carrier and afterwards aligning these sub-assemblies with respect to each other was the method chosen for the implemented assembly.

As a result of the MBD operation in an electron beam environment under vacuum conditions, the used materials have to be non-magnetic, radiation-resistant and vacuum-suitable with low outgassing. To maintain the cleanliness of the apertures of the MDA chip, the assembly has to take place under clean room conditions (class 5 ISO 14644-1). A temperature stability of the assembly device of < 1 K is necessary to reach the high alignment accuracy and measurement uncertainty.

1 Montagevorrichtung.

1 Assembly device.

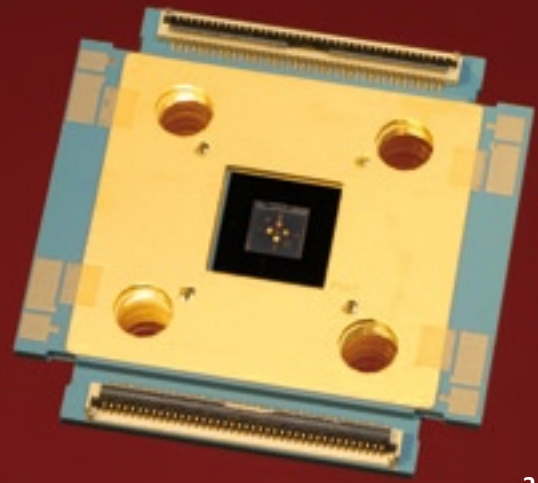
Die Montage der MDA-Baugruppe wird in zwei Montageschritten durchgeführt. Die mikromechanischen Chips der Größe 8 mm x 8 mm x 0,6 mm werden in die Mehrlagenleiterplatten aus LTCC justiert und durch Solder Ball Bumping /2, 3/ fixiert und zugleich elektrisch kontaktiert. Das Justierkriterium bei diesem Montageschritt ist die Positionierung der Kontaktpads der MDA-Chips zu den Kontaktlöchern der Leiterplatte mit einer Genauigkeit von 10 µm bis 20 µm.

Im zweiten Justierschritt werden die Leiterplatten, in denen bereits die MDA-Chips integriert sind, relativ zueinander justiert. Die Freiheitsgrade der Rotation um die x- und y-Koordinate (Verkipfung) und die Einstellung des Abstandes der Subbaugruppen zueinander wird durch die mechanische Qualität der LTCC-Leiterplatten definiert, die Verdrehung der Bauteile um die elektronenoptische Achse (Rz) darf zur Realisierung der Überdeckungsgenauigkeit der Aperturen von 2 µm einen Winkelfehler von 17 mrad nicht übersteigen. Die Justierung in x-, y- und Rz-Richtung erfolgt unter Verwendung der lithographisch strukturierten Justiermarken auf den MDA-Chips. Die Positionen aller Justiermarken werden in Abhängigkeit des Bildfelds und der Tischposition des Montagesystems berechnet. Ziel der Justierung ist es, die Positionen der Aperturen unter Verwendung der Referenzmarken bestmöglich zur Überdeckung zu bringen. Die Justierung erfolgt iterativ und wird beim Erreichen einer Abweichung der Überdeckungsgenauigkeit der Justiermarken von 500 nm abgebrochen.

The assembly of an MBD can be divided into two assembly steps. First, an MDA chip is aligned and fixed to the LTCC system carrier. During this assembly step, the alignment criterion is the positioning of the MDA contact pads with respect to the contact via holes in the LTCC carrier, requiring an alignment accuracy in the range of 10 µm to 20 µm.

In the second assembly and alignment step, two LTCC/MDA sub-assemblies are aligned and mounted with respect to each other. This alignment has to be done in the x- and y-direction with less than 2 µm accuracy. Tip (Rx) and tilt (Ry) degrees of freedom are given by the contact of the LTCC carriers; the rotation around z (Rz) has to be aligned with an accuracy of less than 17 mrad. For this assembly task, lithographically structured alignment marks within the MDA chip are used for alignment. Overall, eight alignment marks are detected, their centre of gravity calculated and saved with respect to the field of view and the position of the x-y-positioning system for later calculation of the alignment status by image processing. The alignment status of the upper MDA chip with respect to the lower chip then can be calculated by comparing the lower and the upper mask position. The alignment process iterates until the position failure is less than 500 nm.





2

Die Fixierung der justierten LTCC-Leiterplatten erfolgt durch Solder Ball Bumping /2, 3/. Die elektrischen Kontakte, die einen elektrischen Widerstand von  $1,5 \Omega$  je Kontaktstelle aufweisen, zeigen auch nach thermischer Wechselbeanspruchung keine Änderung der gemessenen elektrischen Eigenschaften. Untersuchungen zur Scherfestigkeit ergaben durchschnittliche Scherkräfte von  $10,5 \text{ N}$  pro Lötverbindung. Nach einem geometrischen Redesign der Leiterplatten und optimierter Justiermarken der MDA-Chips konnten Montagegenauigkeiten der fixierten MDA-Baugruppen von  $300 \text{ nm}$  erreicht werden.

Die erfolgreiche Integration der MDA-Chips in die LTCC-Leiterplatten ist durch die Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften der Baugruppen nachgewiesen. Die Technologie des Solder Ball Bumpings ist erfolgreich in den Montage- und Justierprozess integriert. Die realisierten Baugruppen erreichen eine Überdeckungsgenauigkeit der lithographisch hergestellten Strukturen von kleiner  $1 \mu\text{m}$  nach Abschluss aller Montageprozesse.

Die Funktionalität der Mehrfach-Ablenkarrays wird derzeit von der Firma VISTEC Electron Beam GmbH während der Proof-Of-Lithography (POL) Experimente untersucht.

Die nächste Herausforderung der MDA-Montage ist die Automatisierung der Montage- und Justageprozesse.

The fixation of the aligned MDA chips was done by solder bumping /2, 3/. The solder joints provide both mechanical fixation and electrical contacts with a resistance of less than  $1.5 \Omega$  per contact. Thermal cycling up to  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  peak temperature shows no significant change in electrical behavior. Shear force measurements show an average ultimate strength of  $10.5 \text{ N}$  per solder joint. After the fixation by soldering using a redesigned LTCC carrier and optimized alignment marks, an overlap accuracy of about  $300 \text{ nm}$  was reached.

The developed LTCC carrier platform is the basic component for the integration of the MDA chip. The solder bumping technology has been successfully used for the MDA assembly and alignment process during MBD manufacturing. An assembly accuracy of less than  $1 \mu\text{m}$  was reached during the whole process chain of MBD manufacturing.

The manufacturing and evaluation of several prototypes of MBDs prove an overlay accuracy of  $1 \mu\text{m}$ . The functionality of beam deflection using these assemblies will be demonstrated by VISTEC Electron Beam GmbH carrying out Proof-Of-Lithography (POL) experiments.

The next steps in MDA assembly activities will be the automation of the assembly and alignment processes for higher efficiency of manufacturing.

## Literatur/References

/1/ Stolberg, I.; Doering, H.-J.; Elster, T.; Slodowski, M.:  
Coulomb blur advantage of a multi-shaped beam lithography  
approach. SPIE Advanced Lithography [7271-26] 24-25, 2009.

/2/ Beckert, E.; Burkhardt, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.:  
Solder bumping - A flexible joining approach for the precision  
assembly of optoelectronic systems. Conference Information:  
4th International Precision Assembly Seminar. Date: FEB  
10-13, 2008 Chamonix FRANCE. Source: MICRO-ASSEMBLY  
TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS. Volume: 260. Pages:  
139-147 Published: 2008.

/3/ Burkhardt, T.; Hornaff, M.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tün-  
nermann, A.: Parametric investigation of solder bumping for  
assembly of optical components. In: Laser-based Micro- and  
Nanopackaging and Assembly III. Proc. SPIE. Vol. 7202. edited  
by Wilhelm Pfleging et al., 2009.

## AUTHORS

*Matthias Mohaupt*  
*Erik Beckert*  
*Thomas Burkhardt*  
*Marcel Hornaff*  
*Christoph Damm*  
*Ramona Eberhardt*  
*Hans-Joachim Döring<sup>1</sup>*  
*Ines Stolberg<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Vistec Electron Beam GmbH*

## CONTACT

*Dipl.-Ing. Matthias Mohaupt*  
*Phone +49 3641 807-342*  
*matthias.mohaupt@iof.fraunhofer.de*

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



## ULTRAPRÄZISE ASPHÄRISCHE SPIEGEL MIT DEFINIERTEN REFERENZSTRUKTUREN

## ULTRA-PRECISE MIRROR ASSEMBLIES WITH WELL-DEFINED REFERENCE STRUCTURES

Moderne und leistungsfähige Spiegeloptiken für die Abbildung, Spektroskopie und Strahlformung basieren auf asphärischen Flächen. Diese neue Gestaltungsfreiheit des Optikdesigns ist jedoch mit Herausforderungen bei der Herstellung und der Montage von optischen Komponenten verbunden. Nur Spiegel, die ultrapräzise gefertigt, charakterisiert und mikrometergenau in den Strahlengang eingebaut sind, zeigen ihre Leistungsfähigkeit in der Anwendung. Referenz- und Anlagestrukturen mit fester Lagebeziehung zur Spiegelfläche sind daher ebenso entscheidend, wie die hohe Qualität der optischen Fläche selbst.

Die sonst zeitaufwändige Montage von optischen Geräten, wie z. B. Spiegelteleskopen kann deutlich vereinfacht werden, indem ein Montagezustand mehrerer Spiegel bereits während der Bearbeitung hergestellt wird. Die Lage mehrerer Spiegelflächen wird fertigungstechnisch in höchster Präzision fixiert.

Aspherical surfaces for imaging, spectroscopy or beam shaping are a centerpiece of today's high-performance mirror optics. The growing design freedom is accompanied by new challenges regarding the manufacturing and assembly of optical components. Only mirrors that are manufactured ultra-precisely, characterized and assembled into the optical path with micrometer accuracy can tap their full potential in application. References and interfaces with a tight geometrical relation to the mirror are just as important as the high quality of the optical surface itself. The time consuming assembly of optical instruments like mirror telescopes can be considerably reduced by adjusting the position of more than one mirror surface during the manufacturing process. Hence the alignment of mirrors on a common substrate is fixed with the highest precision using this manufacturing approach.

1 Spiegelbaugruppe mit zwei exakt ausgerichteten asphärischen Spiegeln und zusätzlichen Referenzierungselementen.

1 Ultra-precise optic assembly with two aspherical mirrors and additional reference elements.

Viele Nichteisenmetalle können hervorragend mit einem Diamantwerkzeug drehend bearbeitet werden. Die geringe Formabweichung im Submikrometerbereich wird durch Korrekturzyklen erreicht, wobei der auftretende systematische Formfehler durch eine modifizierte Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine auf ein Minimum reduziert wird. Ein neuartiger Fertigungsansatz, der neben der Gestalt zusätzlich die Referenzposition berücksichtigt, erlaubt nicht nur die Form sondern auch die Lage der Spiegelfläche zu Referenzmarken, Anlageflächen oder sogar einem weiteren Spiegel zu kontrollieren und exakt einzustellen.

Grundlage ist die Bearbeitung des Spiegels, der Referenz- und Anlageflächen und weiterer Spiegel in nur einer Maschinenaufspannung (Abb. 3). Alle Funktionselemente werden in einem gemeinsamen Koordinatensystem gefertigt. Dieses steht durch die zusätzlichen Referenzmarken weiteren Prozessen z. B. Messprozessen zur Verfügung. Die Fehlererfassung der Form und Lage erfolgt nun mit festem Bezug zum optischen Koordinatensystem des Spiegels und ermöglicht so in einem weiteren Bearbeitungsschritt auf der Ultrapräzisions-Drehmaschine die zielgerichtete Korrektur der Form und der Lage aller Elemente mit Bezug auf die Referenzmarken.

Die Gestaltungsvielfalt für die Form und Position der Elemente wird durch den Einsatz einer zusätzlichen Frässpindel mit einem Diamantschaftfräser auf der Drehmaschine enorm gesteigert. Durch den Betrieb der Maschine mit inkrementeller Ansteuerung der Drehachse, analog zu einer polaren Achse, können zusätzliche Funktionselemente wie z. B. Kalotten und Planflächen in beliebigen Bereichen des Spiegelsubstrats gefertigt werden. Diese dienen später als Messmarken und Anlageflächen bei der Montage.

The diamond tool offers outstanding properties for the ultra-precise cutting of a variety of non-ferrous metals. The reduction of the form deviation to the sub-micrometer level over the optical surface is achieved by correcting the measured systematic errors with a modified tool path during the cutting process. A newly developed manufacturing approach, which accounts for the shape and also for the position of functional elements, allows for the control and precise correction of not only the form but also the alignment of reference marks, assembly surfaces or even other mirror faces in the sub-assembly. The approach is based on the manufacturing of the mirror surface, references, interfaces and other optical mirrors in just one machine setup (Fig. 3).

All mentioned elements are machined in a conjoint coordinate system, which is available to additional linked processes, such as measurement, using the in-process reference marks. The acquisition of form and position errors is now based on a fixed relation to the optical coordinate system of the mirror surface. Hence the targeted correction of form and position of all elements relative to the reference marks can be achieved in an additional manufacturing step on the ultra-precision machine.

The freedom of design for the form and position of references and contact surfaces is enormously enlarged by the integration of an additional milling spindle with a diamond ball end mill on an ultra-precision lathe. The operation of the turning spindle in an incremental mode, analog to a polar machine axis, allows the cutting of functional elements like e.g. spherical calottes or plan surfaces with optical quality on arbitrary positions on the substrate. These elements are useful for referencing or as interfaces for the assembly.



Bei symmetrischen Designs, wie z. B. Korsch-Teleskop oder dem Three-Mirror-Anastigmat (TMA) Teleskop /1/, kann durch die Bearbeitung von zwei Spiegeln auf einer Tragstruktur der Einbauzustand in sehr hoher Qualität fertigungstechnisch hergestellt werden. Nach der Bearbeitung des ersten Spiegels wird der Träger der zweiten optischen Fläche auf der Maschine reproduzierbar in das Modul integriert und bearbeitet. Zusätzliche Referenzmarken erlauben die Korrektur der Form und der Lage der Spiegel zueinander und zu Anschlagflächen, die für den Einbau des Moduls vorgesehen sind.

Das Spiegelmodul in Abb. 1 umfasst den Sekundär- und Tertiärspiegel eines Korsch-Teleskops. Die Formabweichung von M2 ist 280 nm; M3 weicht 350 nm von der idealen Asphäre ab. Die Scheitelpunkte beider Spiegel liegen nur 200 nm voneinander und 500 nm von der Ebene durch die im Prozess gefertigten Anlageflächen entfernt. Die Verkippung der Spiegel gegen die Einbauebene, die durch die kinematisch entkoppelten Anlageflächen gegeben ist, beträgt weniger als 5'' (Abb. 2). Damit erschließt das Verfahren eine neue Fertigungsstrategie mit dem Potential einer Verbesserung der Lagebeziehung von Mehrspiegelanordnungen um eine Größenordnung.

#### Danksagung

Die grundlegenden Untersuchungen werden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR im Rahmen des Projekts IRS-TEL, FK: 50EE0804 gefördert.

Taking advantage of the rotational symmetry of system designs like the Korsch-Telescope or Three-Mirror-Anastigmat (TMA) Telescope /1/, it is also possible to diamond turn whole mirror assemblies containing two or more mirrors with different aspheric shapes on a common breadboard (platform) with a relative position of both surfaces with the highest machine precision. After machining the first surface, the blank for the second mirror is mounted reproducibly onto the breadboard in the turning setup and is diamond turned. Additional reference marks allow the correction of the shape of each mirror, their relative position and the position of interfaces for the system integration.

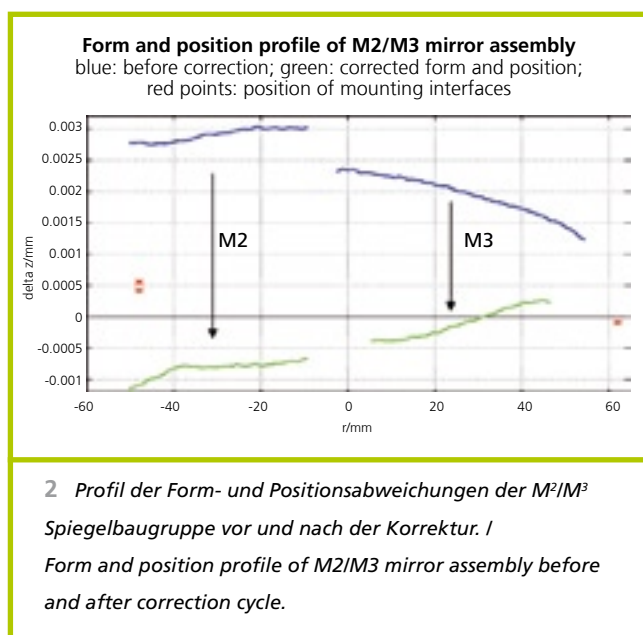
The completed mirror module as shown in Fig. 1 contains a secondary and tertiary mirror of a Korsch-Telescope. The form error of M2 is 280 nm (p-v); M3 deviates 350 nm (p-v) from the ideal aspheric shape. The vertex positions of both mirrors are aligned within a distance of only 200 nm. Both mirrors are positioned within 500 nm to the plane through the in-process manufactured mounting interfaces for the system assembly. The tilt of the mirrors vs. the mounting plane is less than 5 arcsec (Fig. 2). The shown method opens up a novel manufacturing strategy with the potential to enhance the relative positioning accuracy of mirrors in an assembly by an order of magnitude.

#### Acknowledgment

The fundamental investigations were funded by the German Aerospace Center DLR within the project IRS-TEL, FK: 50EE0804.

## Literatur/References

/1/ Risse, S.; et al.: Novel TMA telescope based on ultra precise metal mirrors, Proc. SPIE 7010, Marseilles (2008).



## AUTHORS

*Sebastian Scheiding*

*Andreas Gebhardt*

*Christoph Damm*

*Thomas Peschel*

*Stefan Risse*

## CONTACT

*Sebastian Scheiding*

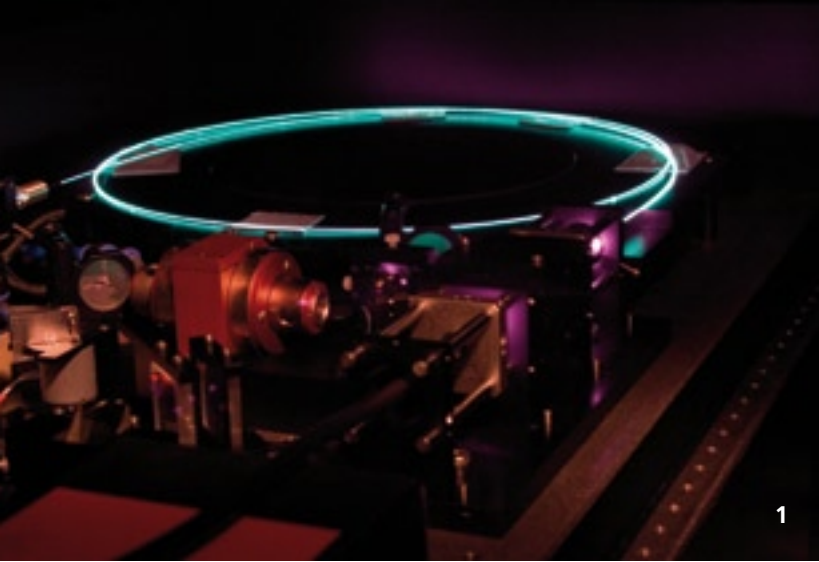
*Phone +49 3641 807-353*

*sebastian.scheiding@iof.fraunhofer.de*

*Dr. Stefan Risse*

*Phone +49 3641 807-313*

*stefan.risse@iof.fraunhofer.de*



1

## HOCHLEISTUNGSKOMPONENTEN FÜR FASERLASER

### HIGH-POWER COMPONENTS FOR FIBER LASERS

Faserlaser spielen heutzutage eine nicht unerhebliche Rolle in Anwendungen wie der Materialbearbeitung. Hohe Leistungen und beugungsbegrenzte Strahlqualität sowie Gesamteffizienzen von über 20 % sind die Markenzeichen dieser Laser. Für Anwendungen mit speziellen Anforderungen an optische Parameter, wie Kurzpuls- oder einfrequente Laser hoher Leistung, müssen Spezialfasern und Verstärkerarchitekturen aufgebaut werden (Abb. 1). Hierbei kann größtenteils nicht auf kommerzielle Komponenten zurückgegriffen werden. Ausgehend von solchen Herausforderungen sind neue Konzepte und Vorrichtungen zu deren Lösung entwickelt worden.

Die Ausgangscharakteristik eines mit einer photonischen Kristallfaser betriebenen Hochleistungslasers ist in Abb. 2 dargestellt. Das Eingangssignal wurde von einem kompakten Faserlaser (JTOE) mit einer Ausgangsleistung von 200 W geliefert. Dieser ist vom eigentlichen Hauptverstärker durch einen Hochleistungsisolator für unpolarisierte Strahlung (JTOE) optisch getrennt. Die Hauptverstärkerfaser (photonische Kristallfaser, PCF) besitzt einen Pumpkerndurchmesser von 500  $\mu\text{m}$ , realisiert durch einen Luftmantel und einen aktiven Stufenindex-Kern mit einem Durchmesser von 26  $\mu\text{m}$ , sodass sich eine Faserlänge aufgrund der Pumplichtabsorption bei 976 nm von 15 m ergab. Gepumpt wurde diese Faser durch

Nowadays, fiber lasers play a major role in material processing applications. High power levels and diffraction-limited beam quality as well as wall-plug efficiencies of more than 20 % are distinct features of these lasers. For application with special optical requirements like high-power short pulse or single-frequency lasers, custom designed fibers and amplifier systems have to be used (Fig. 1). In most of these cases, there are no commercial components available. Therefore, based on these challenges, new concepts and equipment to solve such issues have been developed.

The output characteristic of a high power photonic crystal fiber amplifier is shown in Fig. 2. The seed signal is provided by a compact fiber laser (JTOE) with an output power of 200 W. It is optically isolated from the main amplifier by a high power isolator (JTOE) for unpolarized light. The main amplifier (photonic crystal fiber, PCF) offers a 500  $\mu\text{m}$  pump core realized by an air-cladding and a rare-earth doped step-index core with a size of 26  $\mu\text{m}$ , resulting in a pump light absorption length of 15 m at 976 nm. The fiber was pumped by a fiber pigtailed diode laser imaged to one end of the fiber. The total extracted power was 2500 W. The beam quality has been measured to be  $M^2 < 1.3$  in the output power range up to 1800 W.

1 Faserlasersystem.

1 Fiber laser system.

das Faserende mittels eines fasergekoppelten Hochleistungsdiodenlasers über eine Freistrahloptik. Es konnte eine Leistung von 2500 W extrahiert werden. Die Strahlqualität von  $M^2 < 1,3$  wurde bis zu einer Leistung von 1800 W gemessen.

Um eine solche Faser in kompakteren Aufbauten zu benutzen, sind neue Konzepte zur Pumplichteinkopplung notwendig.

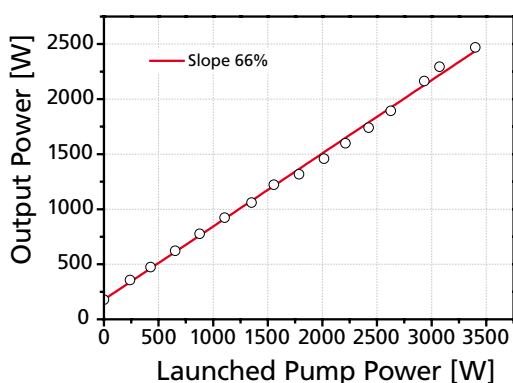
Das hier verfolgte Konzept ist in Abb. 3 dargestellt.

Mehrere Pumpfasern sind konzentrisch um die aktive Faser angeordnet. Das von diesen Fasern gelieferte Pumplicht wird über die gekrümmte innere Fläche einer angespleißten Plan-Convex-Linse (Abb. 4) in den Pumpkern der aktiven Faser abgebildet. Die Fläche der Endkappe ist dichromatisch beschichtet, sodass Pumplicht reflektiert wird und Laserlicht aus dem aktiven Faserkern kommend transmittiert wird.

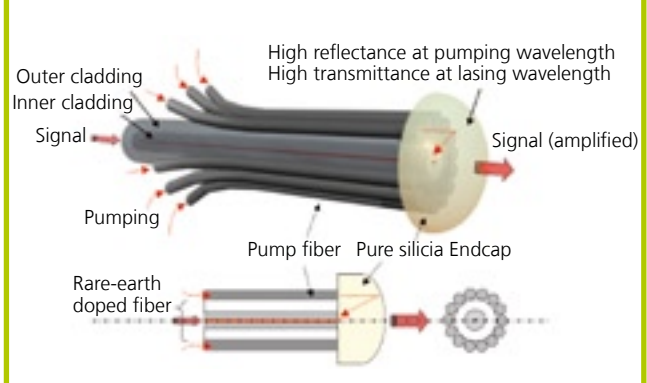
Somit ist es bei entsprechender Auslegung der Endkappe möglich, Leistungsdichten beim Strahlaustritt zu vermindern und neben der monolithischen Pumplichteinkopplung eine hohe Leistungsstabilität zu gewährleisten.

In order to be able to use such a fiber in a more compact setup, novel pump concepts are required.

Figure 3 shows the concept, which is described in the following. Several pump fibers are arranged concentrically around an actively doped fiber. The pump light delivery by these fibers is imaged by the curved surface of the spliced end-cap to the pump core of the active fiber. This curved surface has a dichroic multilayer coating reflecting the pump light but transmitting laser light from the active core of the fiber. With a suitable design of the end-cap it is therefore possible to reduce the power density at the beam exit and to realize high power stability as well as a monolithic pump light coupling.

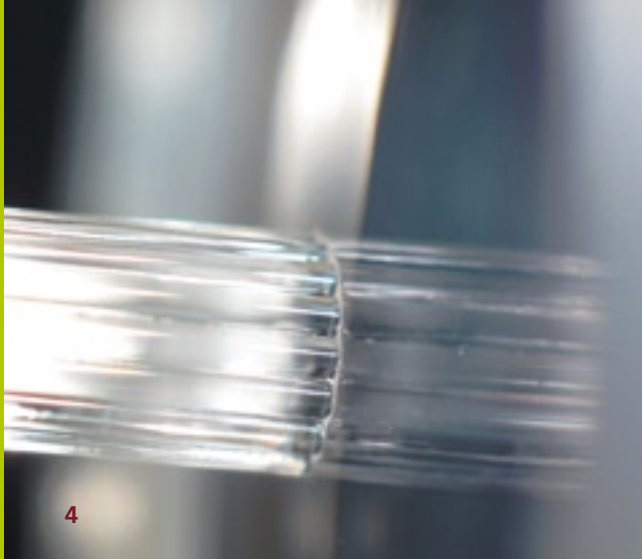


2 Leistungscharakteristik eines Hochleistungsfaserverstärkers. / Output characteristic of a high power fiber amplifier.



3 Schema des monolithischen Endkopplers. / Schematic drawing of the monolithic pump coupler.





Bei Verwendung von 5 der möglichen 14 Pumpfasern (Abb. 5) wurde eine eingekoppelte Leistung von 42 W mit einer Effizienz von 81 % erreicht. Thermische Effekte sind aufgrund der Linearität der erhaltenen Kennlinie nicht erkennbar. Weitere experimentelle Tests zeigten eine ebenso gute Einkopplung für einen weiteren Ring von Pumpfasern um die aktive Faser. Damit erhöht sich nicht nur die Anzahl der möglichen Fasern und die Leistung, sondern auch die hohe numerische Apertur des Pumpmantels von  $NA = 0,5$  wird besser ausgenutzt. Das theoretische Limit bei dieser Fasergeometrie liegt bei vier nutzbaren Ringen und damit möglichen Pumpleistungen von einigen kW. Der Koppler stellt ein monolithisches Koppelkonzept für Pumplicht dar, bei dem das verstärkte Licht als Freistrahler durch eine Endkappe ausgekoppelt wird und somit beispielsweise zur weiteren Nutzung in einem Gitterkompressor als Teil eines Kurzpuls-Faserverstärkers (siehe Beitrag Seite 50) eingesetzt werden kann.

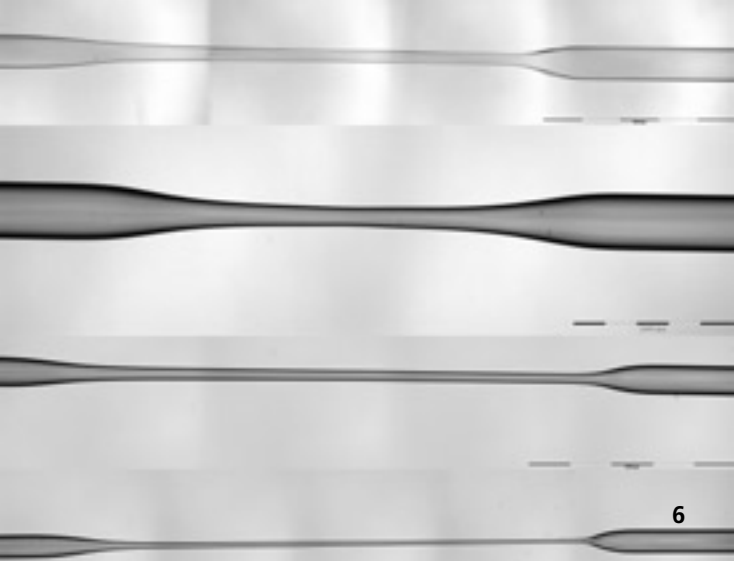
Zusätzlich zu diesen Pumpkoppelkonzepten wurden zur Verlustminimierung bei der Erzeugung und Übertragung hoher Laserleistung über verschiedene Faserquerschnitte unterschiedliche Taper- und Spleißkonzepte evaluiert. Auf Basis einer am Institut bestehenden Spleißvorrichtung für Endkappen wurde eine weitere Vorrichtung entwickelt, die neben dem Spleißen von unterschiedlichen Faserdurchmessern auch das Tapern und Kollabieren von optischen Wellenleitern und Kapillaren (Abb. 6) und somit weitere Komponenten für Hochleistungs-faserlaser ermöglicht.

Diese Arbeiten wurden vom BMBF im Rahmen des Projekts Fabri »Faserlaser höchster Brillianz« unter FKZ 13N9099 gefördert.

Using five of the 14 pump fibers available (Fig. 5), a coupled power of 42 W with an efficiency of 81 % was realized. No thermal effects have been observed as a result of the linearity of the coupling characteristics. Additional experiments showed a similar coupling efficiency using the next possible outer ring of pump fibers around the active fiber. It is therefore not only possible to increase the number of fibers and launched power, but also to make better use of the high numerical aperture  $NA = 0.5$ . The theoretical limits of the fiber shown here are four rings of pump fibers and therefore a total power of several kW. This device provides a monolithic pump coupling concept, where the amplified light is emitted through the end-cap for further use, for instance, in a grating compressor as part of a short pulse fiber amplifier system (see article on page 50).

Additionally to these pump coupling concepts, different taper and splicing concepts were evaluated for minimized losses during creation and delivery of laser light within a fiber. On the basis of a home-built splicing device used for fiber end-caps, a new tapering device was set up, which can be used not only for splicing fibers of different diameters but also for tapering and collapsing of optical waveguides and capillaries (Fig. 6). With this device, novel components for high power lasers are now possible.

This work is supported by the German federal ministry of education and research (BMBF) within the project Fabri under contract number FKZ 13N9099.



6

4 *Angespleißtes Faserbündel. / Spliced fiber bundle.*

5 *Präparierte Pumpfasern um eine photonische Laserfaser. / Pump fibers surrounding an active photonic crystal fiber.*

6 *Getaperte Faser. / Tapered fiber.*

## AUTHORS

*Thomas Schreiber  
Christian Hagemann  
Jun Ki Kim  
Thomas Peschel  
Steffen Böhme  
JT Optical Engine GmbH*

## CONTACT

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

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



## VIRTUELLE BESCHICHTUNGSLÄUFE ZUR DESIGN- UND PROZESSOPTIMIERUNG

## COMPUTATIONAL MANUFACTURING FOR DESIGN- AND PROCESS OPTIMIZATION

Die Leistungsfähigkeit anspruchsvoller optischer Schichtsysteme wird in der Praxis unter anderem durch nie völlig vermeidbare Abweichungen in den Schichtdicken bzw. den optischen Konstanten der abgeschiedenen Schichten von den beim Design zugrunde gelegten Werten bestimmt. Die Abweichungen selbst sind anlagen- und prozessspezifisch. Um kostspielige Fehlchargen möglichst zu vermeiden, bietet es sich daher an, vor der eigentlichen Schichtpräparation die zu erwartende Gutausbeute unter Berücksichtigung der Spezifika der tatsächlich vorhandenen Abscheidetechnologie durch realistische Simulationsläufe (virtuelle Beschichtungen oder auch computational manufacturing) abzuschätzen. Das IOF hat in diesem Zusammenhang ein Simulationswerkzeug entwickelt, das statistische Schwankungen oder auch systematische Fehler in optischen Konstanten und Schichtdicken in ihrer Auswirkung auf die geforderte Spezifikation eines gegebenen Designs auslotet. Der am IOF geschaffene neuartige Lösungsansatz für die virtuellen Prozessläufe ist gekennzeichnet durch:

- Berücksichtigung flexibler Monitoringstrategien (Schwingquartzmonitoring, optisches Breitbandmonitoring mit dem Prozessphotometer OptiMon sowie daraus abgeleitete hybride Strategien)

The performance of advanced optical coatings is limited in practice by always present deviations in thickness and optical constants from the ideal values that have been presumed at the design stage. The mentioned deviations themselves are specific to the applied deposition systems and techniques. In order to avoid cost-intensive waste charges, it is therefore extremely useful to calculate the estimated production yield of a coating by realistic process simulation runs (so-called computational manufacturing) prior to real deposition experiments. In this context, IOF has developed a simulation tool that allows predicting the impact of small statistic fluctuations in optical constants and film thicknesses on the performance of a given coating design. Our novel solution is characterized by:

- The possibility to simulate flexible monitoring strategies (quartz monitoring, optical broadband monitoring with the OptiMon process photometer, as well as hybrid strategies)
- The exclusive use of Kramers–Kronig-consistent dispersion models for considering statistical fluctuations in optical constants
- The possibility of activating reoptimization routines through an interface to commercial OPTILAYER coating design software.

In the simulation, specific fluctuations in shutter reaction time and deposition rate are considered to comply with thickness

- Verwendung ausschließlich Kramers–Kronig–konsistenter Dispersionmodelle für die Berücksichtigung von Fluktuationen in den optischen Konstanten
- Möglichkeit zur automatischen Aktivierung von Reoptimierungsroutinen über Schnittstellen mit der kommerziellen OPTILAYER-Designsoftware

Der Simulation liegen neben prozessspezifischen Schwankungen in Shutterreaktionszeit und Ratenstabilität auch der Rauschpegel in den optischen in-situ Spektren sowie prozessbedingte Schwankungen in den optischen Konstanten zugrunde, die im Rahmen eines Multioszillatormodells erfasst werden können. Sämtliche als fehlerbehaftet betrachtete Größen werden dabei als gaußverteilt angenommen, wobei als Eingangsgrößen der jeweilige Mittelwert und die Standardabweichungen fungieren. Durch Verfälschung der Mittelwerte lassen sich die Auswirkungen systematischer Fehler auf den Beschichtungserfolg simulieren, wogegen die jeweils zugeordnete Standardabweichung den Einfluss zufälliger Fehler in der Simulation zugänglich macht. Statistische »Ausreißer« werden durch Apodisation der Verteilungsfunktion in der Simulation vermieden.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des TACo-Projekts (Förderkennzeichen 16IN0408) durchgeführt. Die Autoren danken dem BMWi für die finanzielle Unterstützung.

errors relevant for quartz monitoring. In the case of optical broadband monitoring, typical in-situ optical measurement errors are implemented into the simulator software to understand their impact on the success of the deposition experiment. Fluctuations in optical constants of the films can be considered in terms of a multioscillator model with randomly distributed parameters. All relevant input parameters are assumed to be statistically distributed according to a Gaussian distribution law, defined by a statistical expectation value and a standard deviation. An intended falsification of the expectation values allows one to simulate the impact of systematic errors on the deposition success. The effect of stochastic errors becomes numerically accessible through the corresponding standard deviations. A suitable apodization of the distribution function prevents unwanted statistical outliers.

The authors gratefully acknowledge financial support by the BMWi in the frame of the TACo-project (grant 16IN0408).

## AUTHORS

*Steffen Wilbrandt*

*Karen Friedrich<sup>1</sup>*

*Olaf Stenzel*

*Norbert Kaiser*

<sup>1</sup>*Technische Universität Chemnitz*

## CONTACT

*Dr. Steffen Wilbrandt*

*Phone +49 3641 807-272*

*steffen.wilbrandt@iof.fraunhofer.de*

<sup>1</sup> *In-situ Prozessüberwachung bei Plasma-Ionen-gestützten Beschichtungsprozessen. / Advanced in-situ monitoring for plasma ion assisted deposition processes.*



## GRUNDLAGEN

Für Lösungen mit Licht ...  
... neue Materialien erforschen und  
neue Phänomene entdecken.

## FUNDAMENTALS

Investigate new materials and discover  
new phenomena ...  
... for solutions with light.



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.

Metamaterialien, künstlich hergestellte optische Materialien mit besonderen optischen Eigenschaften wie etwa einem negativen Brechungsindex bieten die Chance, die optische Abbildung zu perfektionieren und fundamentale Grenzen in der Optik zu überschreiten.

Ultrakurze Laserpulse mit sehr hohen Pulsspitzenleistungen und Pulsdauern von weniger als einer Nanosekunde eröffnen neue Anwendungsgebiete für den Laser. Dafür müssen zum Teil völlig neue Ansätze zur Erzeugung der optischen Pulse erforscht werden. Gleichzeitig erfordert die kontinuierliche Performancesteigerung in der Hochleistungslasertechnik monolithische optische Komponenten, die den enormen thermischen Belastungen und der extremen Photonendichte standhalten können.

Die Erhöhung der Oberflächengenauigkeiten von Systemkomponenten wie zum Beispiel Spiegeln stellt gesteigerte Anforderungen an deren Prüfung, die nur mit Hilfe speziell entwickelter diffraktiver optischer Elemente – Computer generierter Hologramme – gelöst werden können. Dadurch erst wird die Prüfung von Oberflächen bis in den Sub-Nanometer-Bereich möglich.

Die enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität sichert den wissenschaftlichen Vorlauf und schafft die Voraussetzung für zukünftige Lösungen mit Licht.

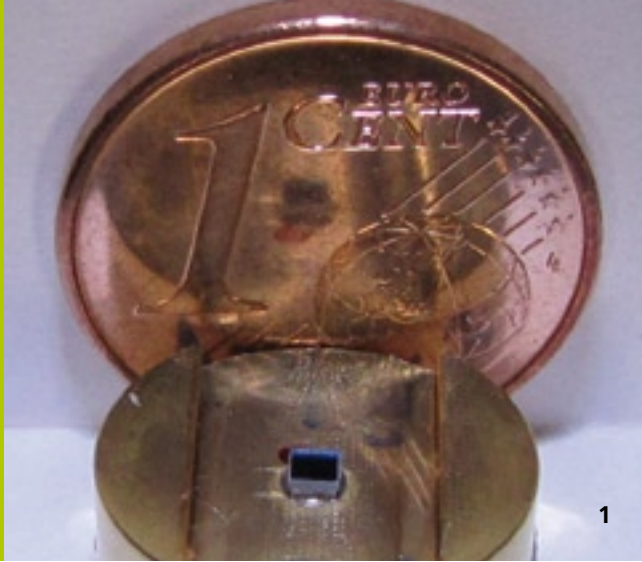
Basic research in the field of photonics does not just inspire the imagination but also pushes back the boundaries of the possible and in the long term is the basis for successful innovation.

Metamaterials, artificially manufactured optical materials with special optical qualities such as a negative refractive index, offer the opportunity to perfect optical imaging and exceed the fundamental limits in optics.

Ultra-short laser pulses with very high peak pulse outputs and pulse lengths of less than one nanosecond open up new application areas for the laser. In part, this requires the investigation of completely new approaches to generate the optical pulse. At the same time, the continuous performance increase in high-performance laser technology requires monolithic optical components which can withstand enormous thermal loads and the extreme density of photons.

The increase in surface accuracy of system components such as mirrors makes increased demands on their testing which can only be resolved with the help of specially developed diffractive optical elements, computer-generated holograms. Only with these will it be possible to test surfaces into the sub-nanometer range.

The close cooperation with the Institute of Applied Physics at the Friedrich Schiller University ensures the scientific lead work and creates the precondition for future solutions with light.



## JITTER-REDUKTION IN PASSIV GÜTEGESCHALTETEN MIKROCHIP-LASERN

### TIMING-JITTER REDUCTION IN PASSIVELY Q-SWITCHED MICROCHIP LASERS

Passive Güteschaltung ist ein einfacher und kompakter Ansatz zur Erzeugung optischer Pulse mit hohen Pulsspitzenleistungen und Pulsdauern von Nanosekunden bis Sub-Nanosekunden. Dioden-gepumpte und passiv gütegeschaltete Mikrochip-Laser basierend auf verschiedenen Laserkristallen und sättigbaren Halbleiterspiegeln als Absorber (SESAM) wurden in der Vergangenheit als ein vielversprechendes Konzept zur Erzeugung der kurzen und ultrakurzen Pulse vorgestellt. Diese Laser sind wegen ihrer Einfachheit für ein breites Anwendungsspektrum wie z. B. Frequenzvervielfachung, Mikromaterialbearbeitung und LIDAR gut geeignet. Der große Nachteil passiv gütegeschalteter Laser ist ein starker Zeitjitter, welcher hauptsächlich aus der Resonatordynamik, Umgebungsinstabilitäten und dem statistischen Charakter der spontanen Emission im Verstärkungsmedium entsteht.

Unsere monolithisch geklebten, passiv gütegeschalteten Mikrochiplaser (Abb. 1) basieren auf  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  und SESAM. Sie erzeugen Pulsdauern kleiner 200 ps mit Pulsenergien größer 150 nJ bei Pulswiederholraten im Bereich von 100 kHz bis wenigen MHz. Jedoch werden diese guten Ausgangsparameter durch den relativ starken Zeitjitter, in der Regel 1 % bezogen auf die Impulsfolgeperiode (Abb. 2, rotes Histogramm), entwertet.

1 *Geklebter Mikrochip-Laser.*

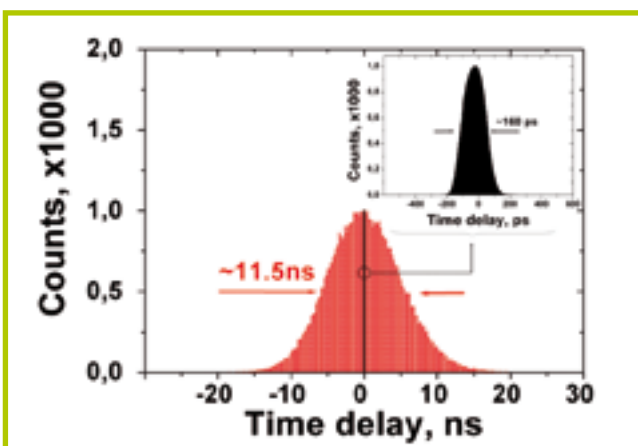
Passive Q-switching is a simple and compact approach to generate optical pulses with high peak powers and pulse duration of nanoseconds and even sub-nanoseconds, offering low cost and low weight per unit. Diode pumped passively Q-switched microchip lasers based on different laser crystals and semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM) have been demonstrated in the past as a promising concept for the generation of short and ultra-short pulses. These passively Q-switched lasers are suitable for a wide range of applications such as frequency conversion, micromachining and LIDAR. Nonetheless, the major drawback of passively Q-switched lasers is their inherently large timing jitter, which mainly originates from cavity dynamics, environmental instabilities and spontaneous noise of the gain.

Our monolithically bonded, passively Q-switched microchip lasers (Fig. 1) based on combination of  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  and SESAM provide sub-200 ps pulse durations, pulse energies of > 150 nJ at repetition rates from 100 kHz to a few MHz. Despite the good parameters, these laser sources still suffer from relatively strong pulse-to-pulse jitter, which is usually 1 % of the pulse repetition time (Fig. 2, red histogram).

1 *Bonded microchip laser.*

Um dieses Problem zu überwinden wurde nun eine einfache und kostengünstige Methode basierend auf einer Eigen-Rückkopplung entwickelt. Unter Verwendung einer optischen Faser als Verzögerungsstrecke wird ein kleiner Betrag der Photonen dem vorherigen Laserimpuls entnommen und dem Laser kurz vor der Initialisierung des darauffolgenden Impulses zugeführt. Dadurch wird die statistische Initialisierung der optischen Pulse im Laserresonator durch einen deterministischen Prozess ersetzt und somit der zeitliche Jitter verringert. Die Umsetzung dieses Prinzips reduzierte den Zeitjitter in einem Mikrochip-Laser um einen Faktor von mehr als zwei Größenordnungen (Abb. 2, schwarzes Histogramm). Nun werden auch Anwendungen ermöglicht, welche hohe Anforderungen an die zeitliche Stabilität stellen.

In order to overcome the problems of the timing jitter, we developed a low-cost and straightforward method based on self-injection seeding. Using a fiber delay line and injecting a small amount of the photons from the foregoing optical pulse back to the laser resonator, the statistically distributed onset of pulse formation is replaced by a deterministic event. Implementing self-injection seeding, the timing jitter is decreased by a factor of more than 200 compared to normal operation of passively Q-switched laser and reaches a value smaller than the pulse duration (Fig. 2, black histogram). This simple approach will allow wider accessibility of passively Q-switched microchip lasers to applications which require low pulse-to-pulse jitter.



2 Verringerung des zeitlichen Jitters durch Eigen-Rückkopplung. Rotes Histogramm: typischer Zeitjitter eines Mikrochip-Lasers bei ~330 kHz, schwarzes Histogramm: Zeitjitter mit Anwendung der Eigen-Rückkopplung. / Reduction of the timing-jitter utilizing the self-injection seeding. Red histogram: typical timing jitter of the microchip laser at ~330 kHz, black histogram: timing jitter applying the self-injection seeding.

## AUTHORS

Alexander Steinmetz<sup>1</sup>  
Dirk Nodop<sup>1</sup>  
Jens Limpert<sup>1,2</sup>

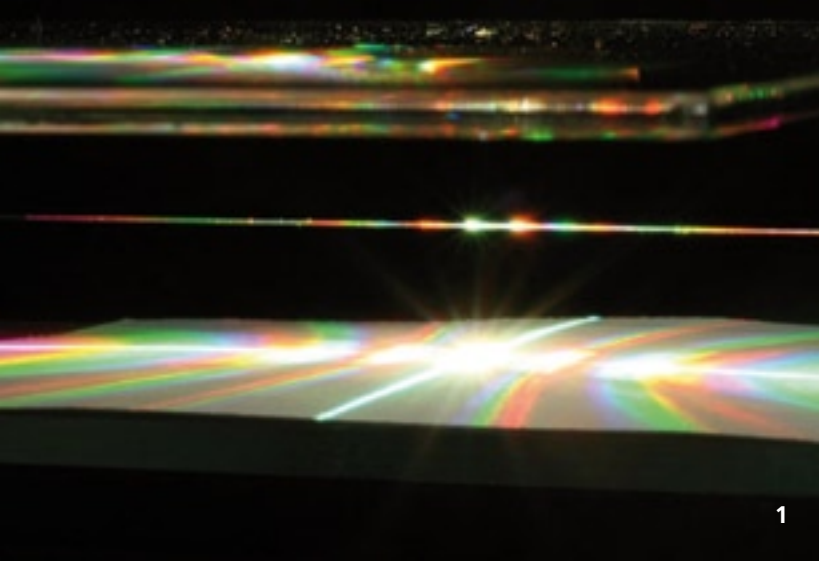
<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>2</sup>Fraunhofer IOF

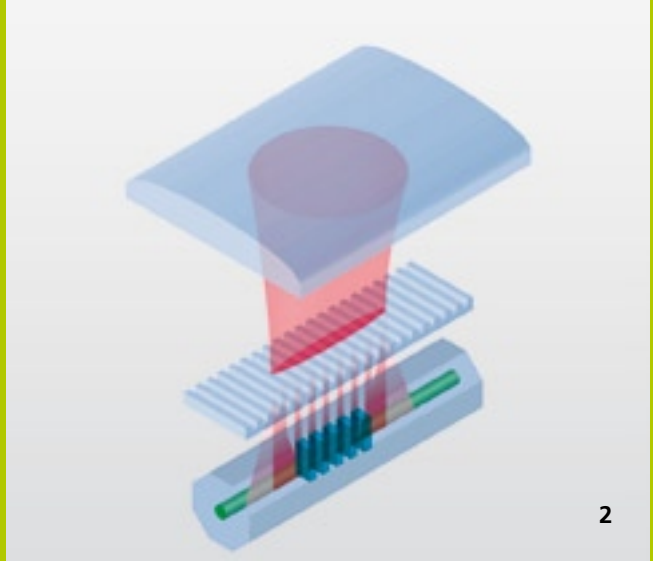
## CONTACT

Dr. Jens Limpert  
Phone: +49 3641 947 811  
jens.limpert@iof.fraunhofer.de





1



2

# INTEGRIERTE BRAGG-REFLEKTOREN FÜR HOCHLEISTUNGS-FASERLASER

## INTEGRATED BRAGG REFLECTORS FOR HIGH-POWER FIBER LASERS

Die Anforderungen an optische Komponenten für industrielle Faserlaser im Kilowatt-Bereich sind enorm: Sie müssen einer hohen Temperatur und Photonendichte standhalten und sollen außerdem verlustarm und unempfindlich gegenüber Erschütterungen und anderen Umwelteinflüssen sein. Daher gewinnen immer mehr monolithische Faserlaserkonzepte an Bedeutung. Faser-Bragg-Gitter (FBG) bieten eine Möglichkeit, schmalbandige Reflektoren direkt in der Faser zu realisieren. Sie bestehen aus tausenden streifenförmigen Brechzahländerungen im Kern der Faser, senkrecht zu deren Achse. Typischerweise sind diese Streifen weniger als ein Mikrometer dick. FBG für den Telekommunikationsbereich werden konventionell in photosensitivem Material mittels UV-Laserbelichtung hergestellt. Diese Techniken erreichen jedoch ihre Grenzen bei aktiven Großkernfasern, die in immer mehr Hochleistungslasern verbaut werden. Zum einen erfordert es viele aufwendige Prozessschritte, FBG direkt in selten-erd-dotieren Fasern zu belichten. Zum anderen ist es schwierig, auf konventionelle Weise großflächige, homogene Brechzahländerungen zu erreichen. Hinzu kommt, dass konventionelle FBG ausbleichen können, sowohl bei hohen Photonendichten als auch bei Temperaturen über 200 °C.

Requirements for optical components used in industrial fiber lasers in the kilowatt range are enormous: they have to withstand high temperatures and photon intensities and should yield low loss as well as being insensitive to vibrations and other environmental impacts. Therefore, monolithic fiber laser concepts are gaining in importance. Fiber Bragg gratings (FBG) are an option for the realization of narrow band reflectors directly within the fiber. They consist of thousands of lamellar refractive index changes within the fiber core, perpendicular to the fiber axis. Typically, these slats are less than one micron thick. FBGs for the telecommunication sector are conventionally realized in photosensitive fibers by UV-laser exposure. However, these techniques reach their limits in active large mode area (LMA) fibers, which are used in more and more high power lasers. Many cumbersome process steps are necessary in order to inscribe FBGs directly into rare earth doped fibers using the conventional approach. In addition, it is very demanding to obtain homogeneous refractive index changes. Moreover, conventional FBGs can bleach when subjected to high photon intensities as well as temperatures above 200 °C.

1 *FBG-Einschreibung mit Hilfe einer Phasenmaske.*

2 *Schematischer Aufbau und Prozedur zum Einschreiben der FBGs.*

1 *FBG inscription using a phase mask.*

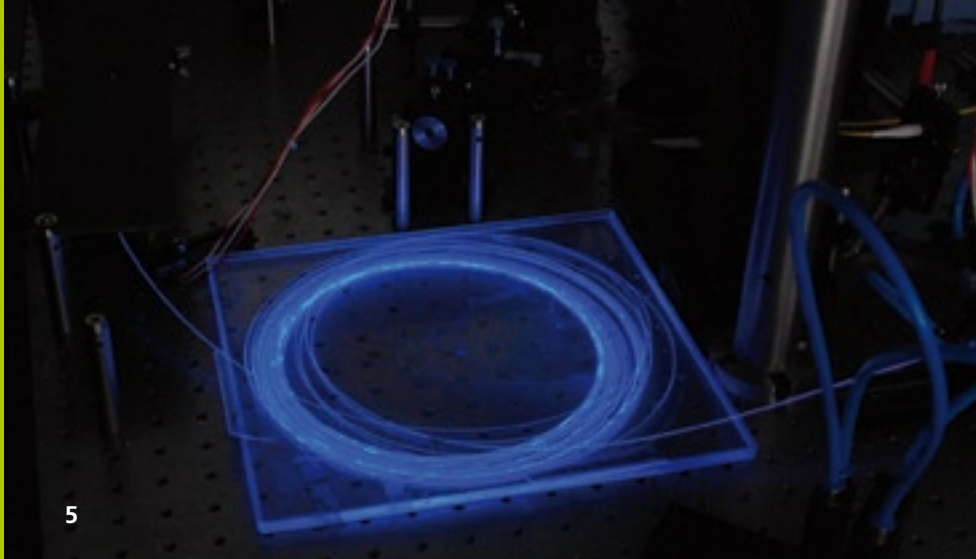
2 *Schematic of setup and procedure to inscribe the FBGs.*

Die obengenannten Limitierungen können überwunden werden, wenn zur Einschreibung der FBG ein Ultrakurz-puls-laser verwendet wird. Hier wird die Brechzahländerung nicht durch photosensitives Material gesteuert, sondern das Glas punktuell aufgeschmolzen. Dies ist durch nichtlineare Absorption aufgrund der hohen Lichtintensitäten im Fokus des Ultrakurz-puls-lasers möglich. Die Pulsdauer muss dafür allerdings im Femtosekundenbereich liegen. Femtosekunden-puls-geschriebene FBG zeichnen sich durch hervorragende Eigenschaften aus: Sie können direkt ohne Vorbehandlung der Faser in selten-erd-dotierten Fasern eingeschrieben werden /1/ und sie sind unempfindlich gegenüber Temperaturen bis zu 1000 °C.

Mittels der Technik des Phasenmasken-Scanning /2/ ist es möglich, großflächige FBG in Large Mode Area (LMA) Fasern einzuschreiben. Hierzu wird der Laserstrahl eines nachverstärkten Ultrakurz-puls-Lasersystems durch eine Zylinderoptik auf den Faserkern fokussiert. Die streifenförmige Änderung der Brechzahl wird durch ein Transmissionsgitter aus geätztem Quarzglas – der Phasenmaske – zwischen Faser und Optik erreicht (Abb. 1). Faser und Phasenmaske werden starr zueinander fixiert und unter dem Laserstrahl bewegt, um großflächige Strukturen einzuschreiben (Abb. 2). Auf diese Weise konnten Gitter mit Reflektivitäten von über 95 % bei einer Wellenlänge von 1075 nm direkt in selten-erd-dotierten LMA-Fasern realisiert werden (Abb. 3). Die FBG wurden anschließend in einem Faser-Laser-Aufbau charakterisiert (Abb. 4). Die Kavität bestand dabei aus dem FBG an einem Ende und der Fresnelreflexion (ca. 4 %) am anderen Ende. Die verwendete Ytterbium-dotierte Faser (Nufern 20/400) ist bei 1075 nm leicht multimodig. Durch ein spezielles Design des FBG konnte jedoch ein stabiler Faserlaserbetrieb erreicht werden. Auf diese Weise konnten im kontinuierlichen Betrieb 230 W erreicht werden (Abb. 5), wobei die Maximalleistung durch die verwendete Pumpdiode begrenzt war /3/.

These limitations can be overcome if an ultra-short pulse laser is used for inscription. Here, the refractive index change is not limited by photo sensitive materials. Instead, the glass is only locally melted in the focal volume because of nonlinear absorption due to the high light intensities. However, this requires pulse durations within the femtosecond range. Femtosecond-written FBGs are characterized by some outstanding characteristics: they can be inscribed directly in rare-earth doped fibers without the need for pre-processing /1/ and they resist temperatures up to 1000 °C.

Using the so-called phase mask scanning technique /2/, it is possible to inscribe enlarged FBGs even into LMA fibers. Therefore, the laser beam of an amplified ultra-short pulse laser system is focussed into the fiber core with a cylindrical lens. In order to obtain a lamellar refractive index change, a transmission grating (etched fused silica) – the phase mask – is mounted in between fiber and optics (Fig. 1). Fiber and phase mask are locked into position to each other and moved under the laser beam in order to structure larger areas (Fig. 2). In this manner, FBGs with reflectivities above 95 % at a wavelength of 1075 nm could be obtained directly in rare earth doped LMA-fiber (Fig.3). The FBGs were characterized in a fiber laser setup (Fig. 4), where the cavity consists of the FBG on one end and the Fresnel reflection (ca. 4 %) on the other end. Although the Ytterbium fiber (Nufern 20/400) used supports few modes at 1075 nm, stable laser operation could be achieved using a specially designed FBG. This way, a continuous wave output of 230 W could be obtained (Fig. 5), where the maximum power was limited only by the pump diode /3/.

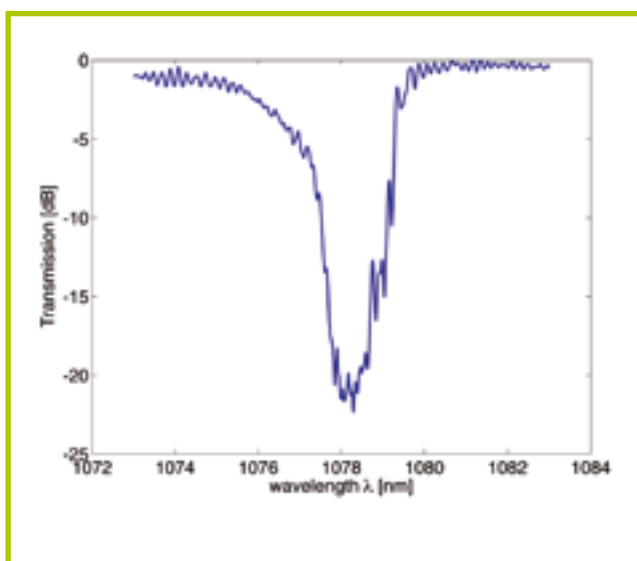


Ein weiteres Ziel unserer Forschungen ist es, diesen hohen Grad an Integration der optischen Komponenten auch bei gepulsten Faserlasern zu erreichen. Bei solchen Faserlasern sind gechirpte FBG nötig, um die Pulse zeitlich zu strecken und zu komprimieren und die Dispersion auszugleichen. Unsere Gruppe gehört zu den ersten weltweit, die solche FBG mit ultrakurzen Pulsen demonstrieren konnte /4,5/.

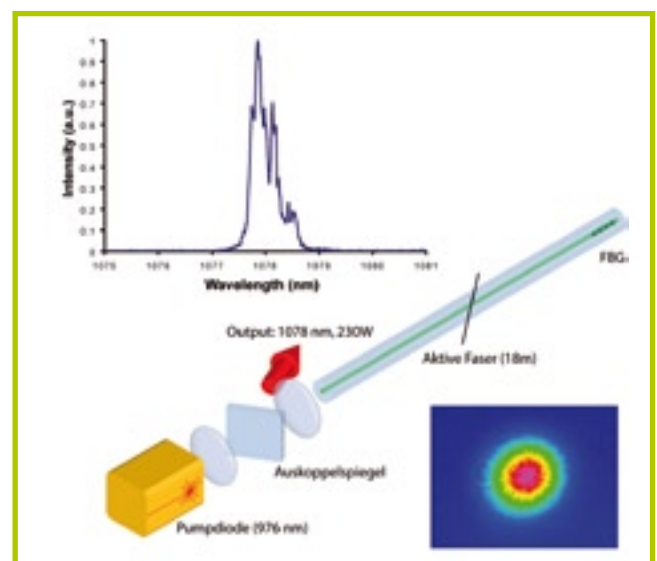
Die vorgestellten Arbeiten werden durch das BMBF im Rahmen der Projekte FABRI (FKZ: 13N9099) und One2FEL (FKZ: 13N9687) gefördert.

A further aim of our research is to achieve a high degree of integration for ultra-short pulsed fiber lasers, too. In those lasers, chirped FBG are needed to stretch and compress pulses as well as for dispersion compensation. Our group is the first worldwide to demonstrate the realization of such FBGs with ultra-short pulses /4,5/.

The present work was funded by the BMBF within the projects FABRI (FKZ: 13N9099) and One2FEL (FKZ: 13N9687).



3 Transmissionsspektrum eines FBG in einer Ytterbium-dotierten LMA-Faser. / Transmission spectrum of a FBG in an Ytterbium doped LMA fiber.



4 Aufbau und Spektrum des monolithischen 230 W Faserlasers. / Setup and spectrum of the monolithic 230 W fiber laser.

## Literatur/References

/1/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortac, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating. *Optics Letters*. Vol. 31. Issue 16. pp. 2390-2392. (2006).

/2/ Thomas, J.; Wikszak, E.; Clausnitzer, T.; Fuchs, U.; Zeitner, U. D.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique. *Applied Physics A*. Vol. 86. Issue 2. pp. 153-157 (2007).

/3/ Stutzki, F.; Jauregui, C.; Voigtländer, C.; Thomas, J.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Passively stabilized 215-W monolithic CW LMA-fiber laser with innovative transversal mode filter. *Photonics West/LASE 2010*. San Francisco. USA. Paper 7580-55.

/4/ Thomas, J.; Voigtländer, C.; Schimpf, D.; Stutzki, F.; Wikszak, E.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Continuously chirped fiber Bragg gratings by femtosecond laser structuring. *Optics Lett.* Vol. 33. Issue 14. pp.1560-1562 (2008).

/5/ Voigtländer, C.; Thomas, J.; Wikszak, E.; Dannberg, P.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Chirped fiber Bragg gratings written with ultra-short pulses and a tunable phase mask. *Opt. Lett.* Vol. 34. (2009).

## AUTHORS

*Jens Thomas*<sup>1</sup>

*Christian Voigtländer*<sup>1</sup>

*Ria Becker*<sup>1</sup>

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

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

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

*Stefan Nolte*<sup>1,2</sup>

*Andreas Tünnermann*<sup>1,2</sup>

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

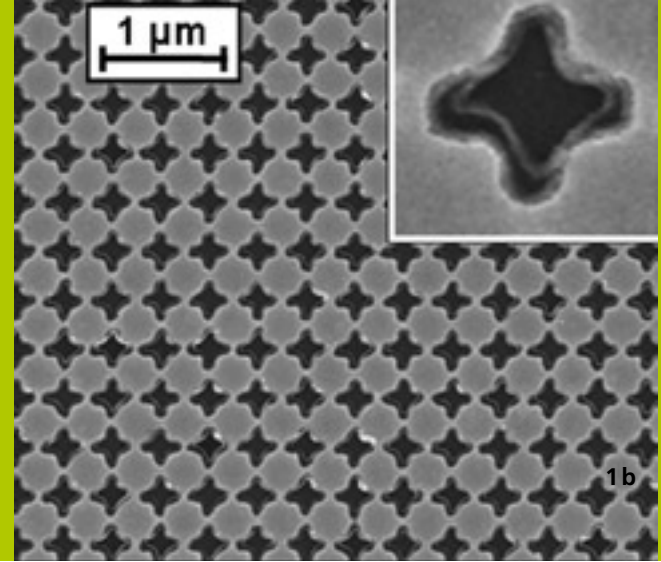
<sup>2</sup>*Fraunhofer IOF*

## CONTACT

*Prof. Dr. Stefan Nolte*

*Phone: +49 3641 947 820*

*stefan.nolte@uni-jena.de*



## POLARISATIONS-UNSENSITIVE OPTISCHE METAMATERIALIEN

## POLARIZATION-INSENSITIVE OPTICAL METAMATERIALS

Optische Metamaterialien sind künstlich nanostrukturierte Medien, in denen die Ausbreitungseigenschaften des Lichts maßgeblich von der ihnen zugrunde liegenden Struktur bestimmt werden. Durch nano-skaliert präzise Umsetzung neuer Designs kann somit das bestehende Spektrum optischer Elemente umfassend erweitert werden /1,2/. Besondere Aufmerksamkeit erfuhren dabei die so genannten Negativ-Index-Materialien /3/. Eine wesentliche Einschränkung existierender Demonstratoren ist jedoch die starke Abhängigkeit vom Polarisationszustand der wechselwirkenden Strahlung. Nur für feste lineare Polarisation und eine diesbezügliche Ausrichtung des Metamaterials konnten die mit einem negativen Index korrelierten Eigenschaften nachgewiesen werden /4/. Dies ist insbesondere der Implementierung von Metamaterialien in Abbildungssysteme abträglich /5/. Für zukünftige Applikationen wird eine polarisations-unsensitive spektrale Antwort gefordert.

Mittels Elektronenstrahl-Lithographie wurde das neue Metamaterial-Design »Schweizer Kreuz« realisiert (Abb. 1a und 1b), welches bei senkrechtem Lichteinfall für alle Polarisierungen die gleiche optische Antwort aufweist.

Optical metamaterials are artificially nanostructured media in which the propagation properties of light are decisively dominated by the structures that comprise them. Hence the existing spectrum of optical elements can be considerably enlarged by precise implementation of novel designs on the nano-scale /1,2/. A particular focus was put on the so-called negative-index materials. However, though there are demonstrators presently existent, one intrinsic constraint was the strong dependence on the state of polarization of the interacting irradiation. The properties that are commonly correlated to a negative refractive index could only be verified for one fixed linear polarization state and an alignment of the metamaterial referring to it /4/. This is particularly detrimental for a potential implementation of metamaterials in imaging systems /5/. Accordingly, a polarization-insensitive spectral response is urgently required for future applications.

By means of electron-beam lithography, the novel metamaterial design termed "Swiss cross" was realized (Fig. 1a and 1b). It features the same spectral response for any polarization state at normal incidence.

**1a** Einheitszelle des »Schweizer Kreuzes«.

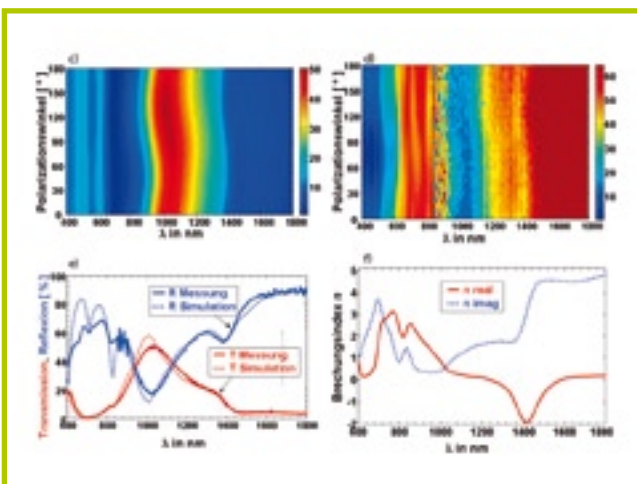
**1b** REM-Bild des hergestellten Metamaterials, die Vergrößerung zeigt eine Einheitszelle.

**1a** Unit cell of the "Swiss cross".

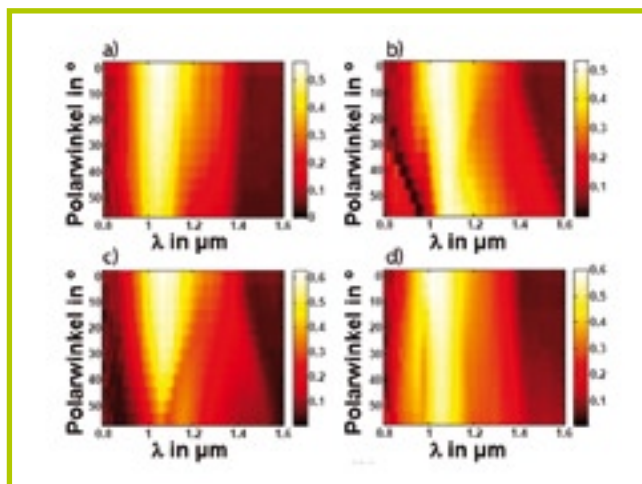
**1b** SEM micrograph of the fabricated metamaterial, Inset: magnification of a unit cell.

Die Polarisationsunabhängigkeit basiert auf der Symmetrie der Einheitszelle und wurde experimentell bis auf geringfügige herstellungsbedingte Abweichungen durch spektroskopische Messungen bestätigt (Abb. 1c und 1d). Dabei konnte eine exzellente Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie nachgewiesen werden (Abb. 1e). Insbesondere weist das »Schweizer Kreuz« einen effektiven negativen Brechungsindex von  $n = -1,9$  bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 1400$  nm auf (Abb. 1f). Die Universalität dieser Eigenschaft für alle Polarisationszustände bei senkrechtem Einfall ist ein Novum für Metamaterialien im optischen Spektralbereich /6/.

The independency of polarization is based on symmetry considerations of the unit cell and was experimentally proved by spectroscopic measurements within the limits of minor manufacturing deviations from an ideal sample (Fig. 1c and 1d). Excellent agreement between experiments and theory was found (Fig. 1e). In particular, the 'Swiss cross' shows a negative index of refraction of  $n = -1.9$  at a wavelength of  $\lambda = 1400$  nm (Fig. 1f). The universality of this property for all states of polarization at normal incidence constitutes a novelty in the optical spectral domain /6/.



1 c) Transmission und d) Reflexion in Abhängigkeit der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Polarisationswinkel. e) Vergleich von gemessenen und simulierten Transmissions- und Reflexionsspektren für senkrechten Einfall. f) Aus den numerischen Daten errechneter Real- und Imaginärteil des Brechungsindexes. / c) Transmission and d) reflection in dependence of wavelength  $\lambda$  and polarization angle. e) Comparison of measured and simulated transmission spectra for normal incidence. f) Real and imaginary part of the refractive index retrieved from the calculated data.



2 Gemessene Transmissionspektren des »Schweizer Kreuzes« in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Polarisationswinkel  $\theta$ . Bezüglich Polarisation und Azimutwinkel  $\phi$  werden vier Fälle unterschieden: a) TE-Polarisation und  $\phi = 0^\circ$ ; b) TM-Polarisation und  $\phi = 0^\circ$ ; c) TE-Polarisation und  $\phi = 45^\circ$ ; d) TM-Polarisation und  $\phi = 45^\circ$ . / Measured transmission spectra of the "Swiss cross" in dependency of wavelength  $\lambda$  and polar angle  $\theta$ . 4 cases concerning polarization and azimuth angle  $\phi$  have to be distinguished: a) TE-polarization and  $\phi = 0^\circ$ ; b) TM-polarization and  $\phi = 0^\circ$ ; c) TE-polarization and  $\phi = 45^\circ$ ; d) TM-polarization and  $\phi = 45^\circ$ .

An diesem Metamaterial wurde erstmalig die Abhängigkeit eines negativen Brechungsindex vom Einfallswinkel des Lichts experimentell und theoretisch untersucht /7/. Das Winkelspektrum ist für Abbildungssysteme auf der Basis optischer Metamaterialien von hoher Relevanz. Im vorliegenden Fall wurden der Azimutwinkel  $\phi$  und die Polarisation des einfallenden Lichts festgehalten und der Polarwinkel  $\theta$  und die Wellenlänge  $\lambda$  als freie Parameter variiert. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Transmissionsmessungen für vier Winkel- und Polarisationskonfigurationen des »Schweizer Kreuzes«.

Aus diesen Ergebnissen können am Beispiel dieses optischen Metamaterials erstmalig Schlüsse über die Winkelabhängigkeit der zugewiesenen effektiven Materialeigenschaften gezogen werden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch den Realteil des effektiven Brechungsindex in Abhängigkeit von Polarwinkel  $\theta$  und Wellenlänge  $\lambda$  für einige ausgewählte Konfigurationen /8/. Diese Abhängigkeiten des Index suggerieren dessen Verständnis als einen »Wellen-Parameter«, der die Lichtpropagation in Metamaterialien modellhaft beschreibt /9/. Er kann somit nicht als eine explizit dem Metamaterial zugeordnete Eigenschaft verstanden werden, im Gegensatz zu seiner Interpretation für klassische optische Medien. Die Erforschung der Grundlagen optischer Metamaterialien wird daher auch in den kommenden Jahren noch spannende Fragestellungen aufwerfen.

For the first time, the dependence of a negative index on the angle of incidence of the incoming light could be examined both experimentally and theoretically on the example of this metamaterial /7/. Generally, the angular spectral response is highly relevant for imaging systems on the basis of optical metamaterials. In the case under consideration, the azimuth angle  $\phi$  and the polarization of the incoming light were fixed while the polar angle  $\theta$  and the wavelength  $\lambda$  were varied as free parameters. Figure 2 exemplarily shows the transmission measurements of the "Swiss cross" for four configurations of angles and polarization states.

Basing on these results and for the first time, it was possible to draw conclusions concerning the angular dependency of the effective properties that are commonly ascribed to optical metamaterials. Figure 3 depicts exemplarily the real part of the effective index of refraction in dependency on the polar angle  $\theta$  and the wavelength  $\lambda$  for chosen configurations /8/. This dependency of the index suggests that it should be considered a "wave-parameter" which may model the light propagation in optical metamaterials. Contrary to its interpretation for classical optical media, it may not be understood as a property explicitly linked to the metamaterial itself. In light of these findings, it becomes clear that the exploration of the fundamentals of optical metamaterials will give rise to further exciting questions in the years to come.

## Literatur/References

/1/ Pendry, J.; et al.: Controlling Electromagnetic Fields, Science 312, 1780 (2006).

/2/ Leonhardt, U.: Optical Conformal Mapping, Science 312, 1777 (2006).

/3/ Shalaev, V.: Optical negative-index metamaterials, Nat. Phot. 1, 41 (2007).

/4/ Dolling, G.; et al.: Simultaneous Negative Phase and Group Velocity of Light in a Metamaterial, Science 312, 892 (2006).

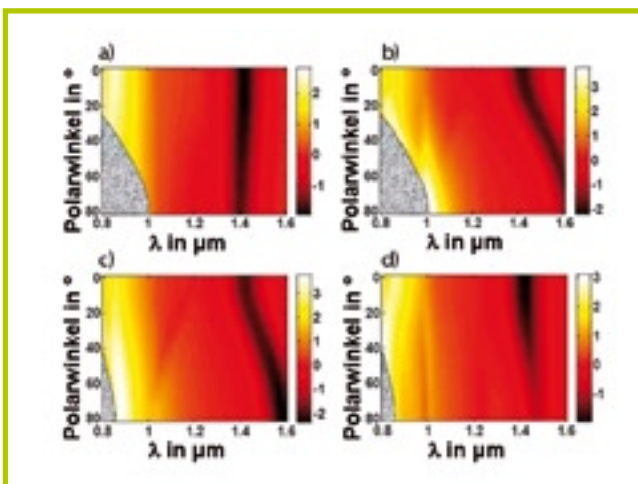
/5/ Pendry, J.: Negative Refraction Makes a Perfect Lens, Phys. Rev. Lett. 85, 3966 (2000).

/6/ Helgert, C.; et al.: Polarization independent negative-index metamaterial in the near-infrared, Opt. Lett. 34, 704 (2009).

/7/ Menzel, C.; et al.: Retrieving effective parameters for metamaterials at oblique incidence, Phys. Rev. B 77, 195328 (2008).

/8/ Menzel, C.; et al.: Angular resolved effective optical properties of a Swiss cross metamaterial, Appl. Phys. Lett. 95, 131104 (2009).

/9/ Rockstuhl, C.; et al.: Light propagation in a fishnet metamaterial, Phys. Rev. B 78, 155102 (2008).



3 Aus den numerischen Daten errechneter Realteil des effektiven Brechungsindexes für vier Fälle wie in Abb. 2. Die schattierten Regionen indizieren Bereiche, in denen höhere Beugungsordnungen propagieren. / Real part of the effective refractive index retrieved from numerical data for the 4 cases as in Fig. 2. The shaded areas indicate regions in which non-zero diffraction orders propagate.

## AUTHORS

Christian Helgert<sup>1</sup>

Christoph Menzel<sup>2</sup>

Carsten Rockstuhl<sup>2</sup>

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

Falk Lederer<sup>2</sup>

Thomas Pertsch<sup>1</sup>

Andreas Tünnermann<sup>1,3</sup>

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

Friedrich-Schiller-Universität Jena

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

-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





## COMPUTERGENERIERTE HOLOGRAMME BASIEREND AUF NANOSTRUKTUREN

### COMPUTER GENERATED HOLOGRAMS BASED ON NANOSTRUCTURES

Diffraktive optische Elemente wie computergenerierte Hologramme (CGHs) besitzen die Fähigkeit aus einer bekannten einfallenden Lichtwelle eine vorgegebene optische Feldverteilung zu generieren. Dadurch ergibt sich ein vielseitiger Einsatz dieser Elemente in der modernen Optik, beispielsweise zur interferometrischen Prüfung von hochgenauen Oberflächen bis in den sub-nm-Bereich oder für verschiedene Aspekte der Strahlformung und Strahlteilung.

Durch die Oberflächenstrukturierung eines konventionellen diffraktiven Elements entsteht eine lokale Phasenverzögerung der Welle, die proportional zur Höhe der im dielektrischen Material erzeugten Struktur ist. Da die Phase einer Welle im Bereich zwischen Null und der Wellenlänge definiert ist, wird die größte notwendige Höhenstufe durch eine Phasenverzögerung um die Lichtwellenlänge gegeben. Typische diffraktive Elemente besitzen daher eine lokal periodische Struktur, deren maximale Höhe im Bereich der Wellenlänge liegt.

Die hochentwickelte Herstellungstechnologie am Fraunhofer IOF und am Institut für Angewandte Physik (IAP), deren Kernstück die Elektronenstrahlolithographieanlage Vistec SB350 OS bildet, ermöglicht eine präzise Fertigung binärer, also auf zwei Höhenstufen basierender, Strukturen bis in den nm-Bereich /1/.

Diffraction optical elements like computer generated holograms (CGHs) have the ability to transform a known incident wave-front in a specific optical field distribution. This offers many applications in modern optics like interferometric testing of high-precision optical surfaces in the nanoscale range or for various tasks of beam shaping and beam splitting.

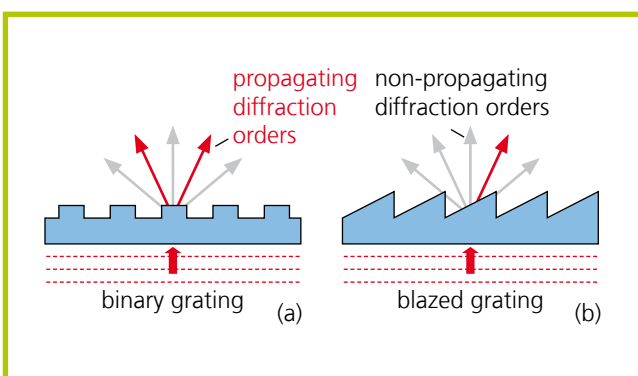
The generated surface relief of a conventional diffractive element creates a local phase delay which is proportional to the height profile of the dielectric optical element. Since the phase of a light wave is defined between zero and the wavelength, the maximum required structural height depends on the phase delay given by the wavelength. This limits the structural height of such elements due to a local periodicity of the surface relief.

Based on modern micro-structuring technology at the Fraunhofer IOF and at the Institute of Applied Physics (IAP), which includes an electron-beam lithography system SB350 OS (Vistec) as a central part, a precise fabrication of binary (with two height levels) nanostructures is possible /1/.

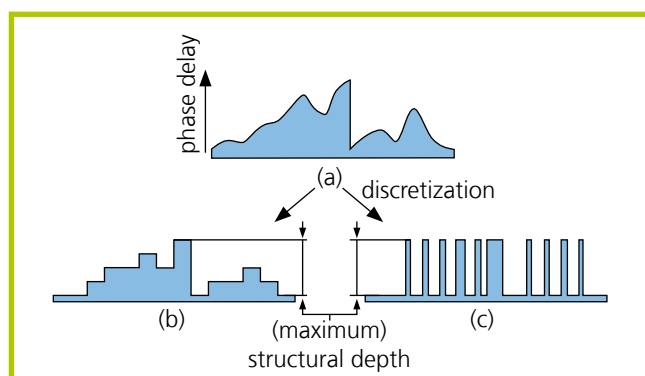
<sup>1</sup> *Transmissions-CGH basierend auf Subwellenlängenstrukturen. / Transmission CGH based on subwavelength structures.*

Allerdings ist die theoretische Effizienz binärer Phasenstrukturen limitiert. Wie bei binären Beugungsgittern (Abb. 2a), bei denen es aufgrund ihrer symmetrischen Form zu spiegelgleich propagierenden Beugungsordnungen kommt, treten bei den komplexeren CGH-Strukturen unerwünschte Spiegelbilder auf (Abb. 5a). Um die Effizienz in einer Bildordnung zu konzentrieren, muss das Phaselement eine asymmetrische Struktur mit möglichst vielen, idealerweise kontinuierlich verlaufenden, Höhen- bzw. Phasenstufen besitzen, wie das in Abb. 2b schematisch für ein so genanntes Blaze-Gitter gezeigt ist. Dieser Ansatz lässt sich analog auf CGH-Strukturen übertragen. Durch komplexe Simulationen wird eine quasi kontinuierliche Phasenfunktion des CGH erzeugt (Abb. 3a). Diese Funktion kann bisher in einem aufwendigen technologischen Prozess mit einer geringen Anzahl von Höhenstufen realisiert werden (Abb. 3b).

However, the diffraction efficiency of conventional binary phase-only diffractive elements is theoretically limited. Similar to binary diffraction gratings (Fig. 2a), which create symmetric diffraction orders due to its symmetric shape, so-called twin-images occur by more complex CGH structures (Fig. 5a). To focus the efficiency of the incident light wave in one diffraction order, an asymmetric structure with an increasing number of height or phase levels is necessary. That implies in the best case an almost continuously shaped structure as shown schematically in Fig. 2b for a so-called blazed grating. This approach can be applied by analogy on CGH phase structures. The quasi-continuous phase function of the CGH (Fig. 3a) is calculated by computer. Up to now, this phase function was converted in a small number of height levels (Fig. 3b) by an expensive and time-consuming fabrication process.

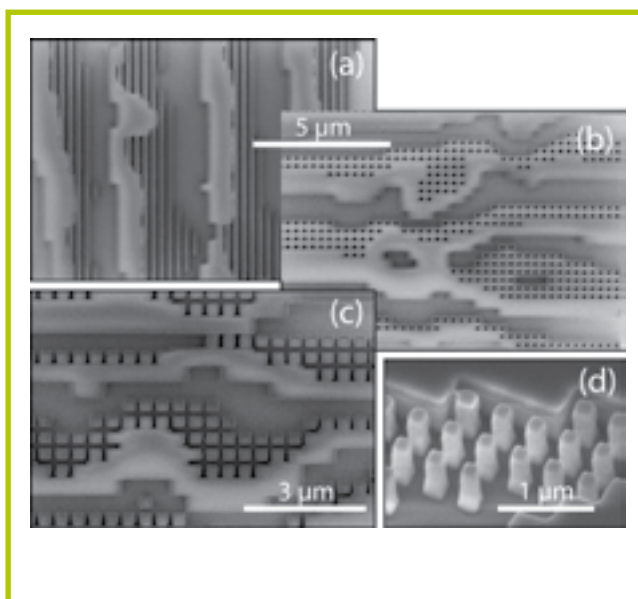


**2** *Beugung des Lichts an einem symmetrischen binären Gitter mit spiegelgleichen Beugungsordnungen (a) und an einem Blaze-Gitter mit asymmetrischem Beugungsverhalten (b). / Light diffraction at a symmetric binary grating with symmetric diffraction orders (a) and at a blazed grating with an asymmetric diffraction behavior (b).*



**3** *Diskretisierung einer berechneten Phasenfunktion (a) in konventionelle Höhenstufen (b) und mittels binärer Subwellenlängenstrukturen (c). / Quantization of a continuous phase function (a) in multi-height-levels (b) and in binary sub-wavelength structures (c).*

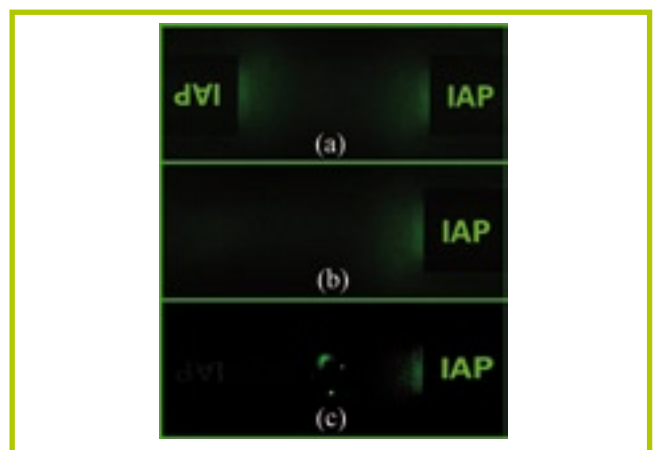
Mit dem vorgestellten Ansatz lassen sich die Vorzüge der binären Technologie mit der Möglichkeit der Realisierung nahezu kontinuierlicher Phasenverläufe kombinieren. Folglich kann der Technologieprozess, unabhängig von der Anzahl der Phasenstufen, auf einen Belichtungs- und einen Ätzschritt reduziert werden. Der Einsatz so genannter Subwellenlängenstrukturen (SWSs) zur Erzeugung eines graduellen Phasenverlaufes wurde bereits bei analytisch beschreibbaren diffraktiven optischen Elementen wie Blaze-Gittern /2,3/ erfolgreich untersucht. Dieser Ansatz ist für die Realisierung von nahezu statistischen CGH-Strukturen weiterentwickelt worden. Durch eine Variation der lateralen Ausdehnung der SWSs lässt sich eine beliebige Phasenverteilung generieren (Abb. 3c). Je nach Anwendungsfall ist die Nutzung unterschiedlicher Strukturen, wie Säulen, Löcher oder Stege, denkbar (Abb. 4).



4 Rasterelektronenmikroskopaufnahmen verschiedener binärer Subwellenlängenstrukturen. / Scanning-electron micrograph of the different subwavelength structures.

The present approach combines the advantages of a binary fabrication process with the possibility of creating almost continuously shaped phase modulations. The fabrication process is consequently reduced to one exposure and one etching step, completely independent of the number of phase levels. Using so-called subwavelength structures (SWSs) to realize a gradual phase distribution has already been demonstrated for analytical phase functions like those of blazed gratings /2,3/. This approach has been further developed for almost statistic CGH structures.

By changing the lateral expansion of the SWS, a variable phase distribution can be generated (Fig. 3c). Depending on the application, different structures like pillars, holes and ridges are available (Fig. 4).



5 Errechnete Fernfeldverteilung eines binären CGH, gekennzeichnet durch das Auftreten eines Spiegelbildes (a). Berechnete (b) und gemessene (c) Feldverteilung eines reflektiven CGH basierend auf dem vorgestellten Ansatz. / Calculated far-field distribution of a conventional binary CGH denoted by twin-image generation (a). Calculated (b) and measured (c) field distribution of a reflective CGH based on subwavelength structures.

Erste diffraktive Elemente in Reflexion (Abb. 4a-c) und Transmission (Abb. 1, 4d) konnten bereits erfolgreich hergestellt werden. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die generierte optische Fernfeldverteilung eines reflektiven CGH für die Designwellenlänge 532 nm. Die unerwünschte Spiegelverteilung wie auch die 0. Ordnung konnten jeweils bis auf 1 % unterdrückt werden.

Die Autoren danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten (FKZ 13N9712 und 13N9433).

Based on the presented approach, first diffractive reflection (Fig. 4a-c) and transmission (Fig. 1, 4d) elements are successfully fabricated. For demonstration, a generated optical far-field distribution for a reflective CGH designed for 532 nm is shown in Fig. 5. The twin-image and the zeroth-order generation could be both reduced to 1 %.

The authors acknowledge the financial support for this work from the BMBF (project FKZ 13N9712 and 13N9433).

#### Literatur/References

/1/ Zeitner, U. D.; Kley, E.-B.: Lithographie der nächsten Generation für Mikrooptik, IOF Jahresbericht 2006, S. 38.

/2/ Farn, M. W.: Binary gratings with increased efficiency, Appl. Opt. 31, 4453-4458 (1992).

/3/ Kley, E.-B.; Freese, W.; Zeitner, U. D.; Michaelis, D.; Kämpfe, T.; Erdmann, M., Tünnermann, A.: Large-Scale Application of Binary Subwavelength Structures, Proc. IEEE/LEOS ThA4, Aug. 2009.

## AUTHORS

*Wiebke Freese<sup>1</sup>*

*Thomas Kämpfe<sup>1</sup>*

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

*Uwe Detlef Zeitner*

*Dirk Michaelis*

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

## CONTACT

*Dr. Ernst-Bernhard Kley*

*Phone +49 3641 947-830*

*ernst-bernhard.kley@uni-jena.de*

# DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

## THE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit mehr als 80 Forschungseinrichtungen, davon 59 Institute. 17 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,6 Milliarden Euro. Davon fallen 1,3 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Nur ein Drittel wird 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.

Niederlassungen in Europa, in den USA und in Asien 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 59 Fraunhofer Institutes. The majority of the 17,000 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of €1.6 billion. Of this sum, more than €1.3 billion is generated through contract research. Two thirds of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. Only one third is contributed by the German federal and Länder governments in the form of base funding, enabling the institutes to work ahead on solutions to problems that will not become acutely relevant to industry and society until five or ten years from now.

Affiliated research centers and representative offices in Europe, the USA and Asia provide contact with the regions of greatest importance to present and future scientific progress and economic development.

# DAS FRAUNHOFER IOF IN NETZWERKEN

## THE FRAUNHOFER IOF IN NETWORKS

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. Studentinnen und Studenten 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), der als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich war.

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

- Schicht- und Oberflächentechnologie
- Strahlquellen
- Mikro- und Nanotechnologie
- Materialbearbeitung
- Opto-mechanische Präzisionssysteme
- Optische Messsysteme

### Kontakt

Verbundvorsitzender  
Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
Fraunhofer IOF  
Albert-Einstein-Straße 7  
07745 Jena  
Tel.: +49 3641 807-201

Verbundassistentin  
Susan Oxfart  
Tel.: +49 3641 807-207

### 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 technologies
- Beam sources
- Micro- and nanotechnology
- Materials treating
- Opto-mechanical precision systems
- Optical measuring systems

### Contact

Group Chairman  
Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
Fraunhofer IOF  
Albert-Einstein-Straße 7  
07745 Jena  
Phone: +49 3641 807-201

Group Assistant  
Susan Oxfart  
Phone: +49 3641 807-207



### **Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena**

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, Dresden**

Die Kernkompetenzen des Fraunhofer FEP sind Elektronenstrahltechnologie, Puls-Magnetron-Sputtern und Plasmaaktivierte Hochratebedampfung. 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, Jena**

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, Dresden**

Electron beam technology, pulse magnetron sputtering and plasma activated high-rate deposition 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 larger areas at high productivity.

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





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

Das Fraunhofer ILT zählt weltweit zu den bedeutendsten Auftragsforschungs- und Entwicklungsinstituten im Bereich Laserentwicklung und Laseranwendung. Die Kernkompetenzen umfassen die Entwicklung neuer Laserstrahlquellen und -komponenten, Lasermess- und Prüftechnik sowie Laserfertigungstechnik. Hierzu zählen beispielsweise das Schneiden, Abtragen, Bohren, Schweißen und Löten sowie das Oberflächenvergüten, die Mikrofertigung und das Rapid Prototyping. Übergreifend befasst sich das Fraunhofer ILT mit Laseranlagentechnik, Prozessüberwachung und -regelung, Modellierung sowie der gesamten Systemtechnik. Unser Leistungsspektrum reicht von Machbarkeitsstudien über Verfahrensqualifizierungen bis hin zur kundenspezifischen Integration von Laserprozessen in die jeweilige Fertigungslinie.

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

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

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, Aachen**

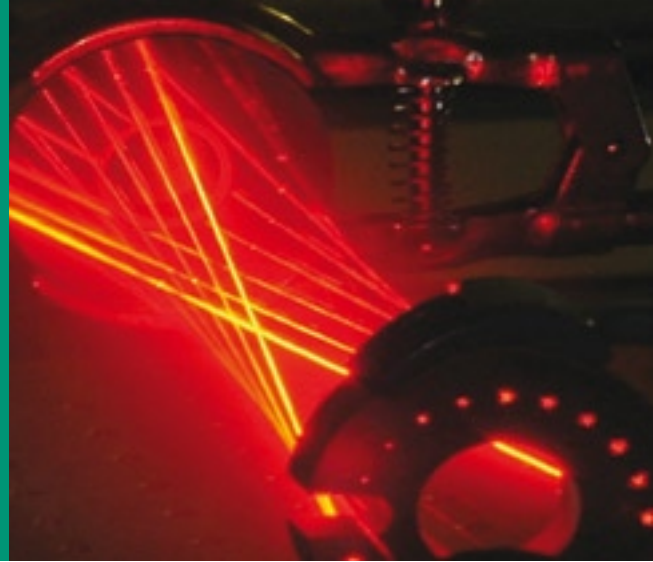
The Fraunhofer ILT is worldwide one of the most important development and contract research institutes of its specific field. The activities cover a wide range of areas such as the development of new laser beam sources and components, precise laser based metrology, testing technology and industrial laser processes. This includes laser cutting, caving, drilling, welding and soldering as well as surface treatment, micro processing and rapid prototyping. Furthermore, the Fraunhofer ILT is engaged in laser plant technology, process control, modeling as well as in the entire system technology. We offer feasibility studies, process qualification and laser integration in customer specific manufacturing lines.

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

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

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, Freiburg**

Fraunhofer IPM entwickelt und realisiert optische Sensor- und Belichtungssysteme. Bei den vorwiegend Laser-basierten 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, Dresden**

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS ist in den Geschäftsfeldern Fügen, Trennen und Oberflächen-technik tätig. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten basieren auf einem ausgeprägten werkstoff- und nanotechnischen Know-how und umfassenden Möglichkeiten der Werkstoffcharakterisierung. Die Besonderheit des Fraunhofer IWS liegt in der Kombination dieses Know-hows mit weitreichenden Erfahrungen in der Entwicklung von Technologien und Systemtechnik im Bereich der Schicht- und Lasertechnik.

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

### **Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM, Freiburg**

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, Dresden**

The business areas joining, cutting and surface technology are the main foci of the Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS. The research and development activities base on a distinctive know-how in the field of material engineering and nanotechnology and include the possibility of material characterization. The IWS's special feature is its expertise in combining its know-how with its extensive experience in developing system technologies within the field of film- and laser technology.

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

# FRAUNHOFER IOF IN DER OPTIKREGION JENA

## FRAUNHOFER IOF IN THE JENA OPTICS REGION

Als einer der erfolgreichsten Optikstandorte in Europa gehört die Region Jena zu den maßgeblichen Akteuren der deutschen Optikszenen. Mehr als 13 500 Beschäftigte erwirtschaften einen Umsatz von über 2 Mrd Euro jährlich auf dem Gebiet der Optischen Technologien. Das Umsatzwachstum im Cluster betrug in den vergangenen Jahren durchschnittlich 10 %.

Die erfolgreiche interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wirtschaft und Wissenschaft in der 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 zählen führende Unternehmen wie die Töchter der Carl Zeiss AG und der Schott AG sowie die Jenoptik AG. Hinzu kommen wachstumsorientierte KMU sowie Hochschulen und Forschungseinrichtungen, u. a. die FSU Jena und das Fraunhofer IOF.

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.

In den Jahren 2007/2008 erfolgte unter wesentlichen Aktivitäten des IOF mit der Strategie **CoOPTICS – Cooperate in Optics** eine inhaltliche Neuausrichtung und Fokussierung des Clusters auf Wachstumsmärkte.

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 13,500 employees currently generate sales of over 2 billion euros every year in optical technologies. The cluster has experienced an average growth in sales of 10 % 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.

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.

On the basis of a continuously updated strategy process, one of the IOF's key activities within the **CoOPTICS – Cooperate in Optics** strategy in 2007/2008 was the substantive realignment and focus of the cluster toward growth markets.

## DAS FRAUNHOFER IOF IN VERBÄNDEN

## THE FRAUNHOFER IOF IN ALLIANCES

- ALROUND e. V.
- AMA - Fachverband für Sensorik e. V.
- Ausbildungsverbund der IHK Ostthüringen
- Beutenberg Campus e. V.
- Deutsche Gesellschaft für Angewandte Optik e. V. – DGaO
- Deutsches Institut für Normung
- Europäische Forschungsgemeinschaft dünner Schichten e. V. - EFDS
- European Optical Society – EOS
- European Photonics Industry Consortium - EPIC
- FasiMIT – Aus- und Weiterbildungsnetzwerk zur Fachkräftesicherung in der Mikrosystemtechnik in Thüringen
- Fraunhofer-Allianz Vision
- Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces
- Industrieverband SPECTARIS
- Kompetenzzentrum Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e.V. – CCUPOB
- medways e. V.
- micromold.net –Netzwerk für Hochpräzision in Formenbau und Spritztechnik
- Mikro- und Nanotechnik Thüringen e.V. – MNT
- NEMO VisQuaNet
- OptoNet e. V.
- Polymermat e. V.
- SolarInput e. V.
- Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e. V. – WLT

# NAMEN, DATEN, EREIGNISSE

## NAMES, DATES, ACTIVITIES

### Gäste / Guests

**Dr. Norbert Böwering**  
Cymer Inc., San Diego,  
CA, USA

**Prof. Akira Endo**  
Tokyo, Japan  
Carl-Zeiss Gastprofessor  
an der Friedrich-Schiller-  
Universität Jena

**Dr. Shannon Hill**  
NIST, Gaithersburg, MD, USA

**Päivi Marttila**  
VISTAPOINT Technologies,  
Espoo, Finland

**Steven D. Oliver**  
SO-Semi Technologies,  
San Jose, USA

**Dr. Pham Hong Tuan,  
Nguyen Tuan Vu**  
Center for Optoelectronics  
(NACENTECH-National  
Center for Technology  
progress), Hanoi, Vietnam

**James J. Repko**  
AJI Co., Ltd, San Jose, USA

**Prof. Dr. Philip Russel**  
Max-Planck-Institut für die  
Physik des Lichts, Germany

**Ruben Tibben**  
Anteryon, Eindhoven,  
Netherlands

**Mike Walters**  
VISTAPOINT Technologies,  
San Jose, USA

**Ph.D. Shigeru Yamaki**  
SHOWA DENKO K.K.,  
Kanagawa, Japan

**Kunio Yoshida**  
AJI Co., Ltd, Kanagawa, Japan

### Internationale Kooperationen / International Cooperations

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

**France**  
Centre national de la recherche  
scientifique (CNRS), Paris,  
Michel Retourna  
EADS Astrium, Jean-Jacques  
Arnoux

**Indonesia**  
Institute for Technology  
Bandung, Prof. Aleksander  
Iskander

**Ireland**  
Trinity College Dublin,  
Prof. Werner Blau

**Israel**  
Technion, Haifa,  
Prof. Abraham Marmor

**Italy**  
ENEA, Rom,  
Dr. Angela Piegari  
University 'La Sapienza', Rom,  
Prof. Francesco Michelotti

**Japan**  
Gigaphoton Inc., Tokyo,  
Junichi Fujimoto  
Tohoku University, Sendai,  
Prof. Toshikuno Kaino

**Norway**  
SINTEF, Trondheim, Aage  
Jostein Thunem

**Poland**  
Warsaw University of Techno-  
logy, Wojciech Swieszkowski,  
PhD  
Politechnika Warszawska,  
Prof. Andrzej Jakubiak

**Portugal**  
University Aveiro,  
Prof. Nikolai Sobolew  
Universidade de Coimbra,  
Prof. Maria Helena  
Mendes Gil

**Russia**  
Moscow State University,  
Prof. Alexander Tikhonravov

**Scotland**  
MED, Edinburgh,  
Prof. Ian Underwood

**Switzerland**  
IMT University Neuchâtel,  
Prof. Hans-Peter Herzig  
EMPA Swiss Federal Laborato-  
ries for Materials Testing and  
Research, Dübendorf,  
Dr. Ir. Arie Bruinink  
Centre Suisse d'Electronique  
et de Microtechnique SA  
(CSEM), Neuchâtel, Georges  
Kotrosios  
Eidgenössische Technische  
Hochschule Zürich, Daniel  
Gisler

**Ukraine**  
National Technical Univer-  
sity »Kharkov Polytechnic  
Institute«, Prof. Valery V.  
Kondratenko

**USA**  
University of Michigan,  
College of Engineering,  
Prof. Jerzy Kanicki  
CREOL, Orlando (Florida),  
Prof. James Harvey  
University of Wisconsin-  
Madison/Computational  
Mechanics Center, Madison,  
Prof. Roxann L. Engelstad

### Messebeteiligungen 2009 / Fairs Participations 2009

**Photonics West,**  
27.–29.1.2009, San Jose, USA

**34. Internationale Dental-  
Schau IDS**  
24.–28.3.2009, Köln,  
Germany

**4. Beatmungssymposium  
der DPG**  
23.–25.4.2009, Heidelberg,  
Germany

**Kriminaltechnisches  
Symposium**  
28.–29.4.2009, Kiel,  
Germany

**Control**  
5.–8.5.2009, Stuttgart,  
Germany

**SENSOR+TEST**  
26.–28.5.2009, Nürnberg,  
Germany

**Society for Information Display SID**

31.5. - 5.6.2009, San Antonio, USA

**LASER.World of Photonics**

15. - 18.6.2009, München, Germany

**International Paris Air Show**

15. - 21.6.2009, Le Bourget, France

**Ideen-Expo Hannover**

5. - 12.9.2009, Hannover, Germany

**DAGM 2009**

9. - 11.9.2009, Jena, Germany

**Fraunhofer VISION Technologietag**

8. - 9.10.2009, Kaiserslautern, Germany

**V2009**

20. - 22.10.2009, Dresden, Germany

**VISION**

3. - 5.11.2009, Stuttgart, Germany

**Euromold**

2. - 5.12.2009, Frankfurt/Main, Germany

**Preise 2009 / Awards 2009**

**Elected SPIE Fellow**

Prof. Dr. Norbert Kaiser

**Leopoldina Fellowship, Minerva Fellowship**

Dr. Alexander Szameit

**HEPTAGON - Sven Bühling Forschungsförderpreis 2009**

Matthias Heinrich

**Dissertationspreis der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen der DFG**

Dr. Alexander Szameit

**STIFT - Preis für hervorragende anwendungsorientierte Promotionsarbeiten**

Dr. Fabian Röser

**Beste Masterarbeit 2009, Bereich SciTech, Fachhochschule Jena**

Anika Brahm

**Beste Diplomarbeit in der Elektrotechnik, TU Berlin**

Oliver Pabst

**Doktorandenstipendium, DAAD**

Jens Thomas

**Doktorandenstipendium, Carl-Zeiss-Stiftung**

Enrico Seise

**Promotionsstipendium, Graduiertenschule Photonics, FSU Jena**

Robert Keil

**Excellent Award by the Korean Ministry of Education, Science and Technology**

Dr. Gunther Notni

**Research students' innovation award, 5th Macquarie University Innovation Awards**

Nemanja Jovanovic, Graham Marshall, Alexander Fuerbach, Michael Steel, Michael Withford, Jens Thomas, Stefan Nolte, Andreas Tünnermann

**Best Poster Prize, EUVL 2009 Symposium**

Dr. Torsten Feigl

**Best Student Poster Paper Award ASSP**

Christian Wirth

**Best student oral presentation award, Photonics West 2009**

Matthias Heinrich

**Best Student Oral Presentation Award, UFO 2009**

Tino Eidam

**Best Student Oral Presentation Award, LASE 2009**

Oliver Schmidt

**OSA Travel Grant, ASSP 2009**

Jan Rothhardt

**Aus- und Weiterbildung / Education and further training**

Die umfangreichen Aktivitäten des Fraunhofer IOF auf dem Gebiet der Aus- und Weiterbildung erstrecken sich von der Ausbildung von Physikkolaboranten 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

Dipl.-Ing. (FH) Nils Heidler  
**Design of Precision Devices**  
Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Norbert Kaiser  
**Beschichtungstechnik**  
Fachhochschule Jena

**Nanooptik**  
Fachhochschule Jena

**Thin Film Optics**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
Grundlagen der Laserphysik  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena

Experimentelle Methoden  
der Atom- und Molekül-  
physik  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena

Angewandte Photonik  
Seminar für Doktoranden FSU  
Jena, Fraunhofer IOF

Dr. Uwe Detlef Zeitner, Prof.  
Dr. Frank Wyrowski

Optical Modeling and  
Design I

Optical Modeling and  
Design II

Friedrich-Schiller-Universität  
Jena

**Konferenzen – Workshops –  
Veranstaltungen /  
Conferences – Workshops –  
Events**

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

4.–5. März 2009, Regensburg

Workshop »Optische  
Systeme und Sensoren  
für den Zukunftsmarkt  
Gesundheit«

2. April 2009, Jena

17. International  
Workshop on "Optical  
Waveguide Theory and  
Numerical Modeling"

17.–18. April 2009, Jena

Fraunhofer Technologie-  
zirkel – »Innovation mit  
Lichtgeschwindigkeit«

Referent: Prof. Dr. Andreas  
Tünnermann, Fraunhofer IOF  
7.–8. Mai 2009, Fraunhofer  
ILT, Aachen

Alumni-Treffen 2009 –  
Workshop »THz-  
Bildgebung«

5. Juni 2009, Fraunhofer IOF,  
Jena

4th EOS Topical Meeting  
on Advanced Imaging  
Techniques

10.–12. Juni 2009, Jena

Zukunftskonferenz  
Medizintechnik

24.–25. Juni 2009, Jena

DAGM 2009 –  
31. Annual Symposium of  
the German Association  
for Pattern Recognition

9.–11. September 2009, Jena

The International confe-  
rence on optical thin film  
and coating technology

Conference Co-chair:  
Prof. Dr. Norbert Kaiser,  
Fraunhofer IOF  
11.–16. Oktober 2009,  
Xi'an, China

V2009 – Industrieausstel-  
lung & Workshop

»Vakuumbeschichtung und  
Plasmaoberflächentechnik«  
20.–22. Oktober 2009,  
Dresden

Noble Gespräche – »Photo-  
nische Kristallfasern«

Referent: Prof. Philip Russell  
29. Oktober 2009, Jena

Lange Nacht der Wissen-  
schaften

13. November 2009, Jena

**Diplomarbeiten /  
Diploma Theses**

Adrian Azarian  
Investigation of CO<sub>2</sub> laser  
melting of optical  
microresonator structures  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 11/09

Martin Baumgartl  
Experimentelle und  
numerische Analyse der  
Pulsdynamik in moden-  
gekoppelten Faserlasern  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 02/09

Johannes Bidinger  
Grundlagen der Laser-  
Thrombolyse mit Femto-  
sekundenpulsen  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 08/09

Ulrike Blumröder  
Optische Charakteri-  
sierung stochastischer  
Oberflächenstrukturen  
auf Kunststoff für  
Photovoltaikanwendungen  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 09/09

Michael Damm  
Entwicklung eines auto-  
matisierten Messplatzes  
zur Bestimmung ultra-  
kurzimpulsinduzierter  
Zerstörschwellen optischer  
Komponenten  
Fachhochschule Jena, 05/09

Jens Dreiling  
Untersuchungen zum Ein-  
satz der CMP-Technologie  
zur Herstellung mikro-  
optischer Elemente  
Fachhochschule Jena, 09/09

Jens Dunkel  
Untersuchungen zur  
Verbesserung der Effizienz  
lithografisch hergestellter  
Multilevelelemente für  
Laseranwendungen  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 04/09

Karen Friedrich  
Begründung und Optimie-  
rung eines Dünnschicht-  
modells zur Prognose  
optischer Eigenschaften  
oxidischer Beschichtungen  
durch in-situ Überwachung  
des Aufdampfprozesses  
TU Chemnitz, 10/09

Christine Fuchs  
Untersuchungen zum  
Zusammenhang zwischen  
Hydrophobie und  
erreichbarer Oleophobie  
bei mikro-strukturierten  
Polymeroberflächen mit  
Top-Coating  
Fachhochschule Jena, 02/09

Thomas Gottschall  
Erzeugung von  
ultrakurzen, intensiven,  
durchstimmbaren Laser-  
pulsen im nahen Infrarot  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 12/09

Christian Hagemann  
Theoretische und experi-  
mentelle Untersuchungen  
an Pumpkopplern für  
Hochleistungsfaselaser  
Universität Hamburg, 11/09

René Heilmann  
Charakterisierung  
mikrolinsenbeleuchteter  
Antennenarrays zur Erzeu-  
gung ultrakurzer THz-Pulse  
hoher mittlerer Leistung  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 10/09

Christian Henkel  
Entwicklung und  
Charakterisierung eines  
Verfahrens zur Justierung  
von Mikrolinsenarrays zu  
CCD-Sensoren  
Fachhochschule Jena, 01/09

Martin Kahle  
Untersuchung der  
Laserablation dünner  
metallischer Schichten  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 03/09

Robert Keiner  
Bearbeitung optischer  
Schichtsysteme mittels  
Femtosekundenlaser  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 05/09

Robert Keil  
Optisches Schalten in  
zweidimensionalen  
Wellenleiterarrays  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 06/09

Peter Lutzke  
Untersuchung der Mess-  
genauigkeit bei der opti-  
schen 3D-Vermessung von  
transluzenten Materialien  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 11/09

André Oswald  
Untersuchungen zur zwei-  
dimensionalen Anordnung  
von Lichtleitfasern mit dem  
Ziel der Formwandlung  
Fachhochschule Jena, 09/09

Roberto Peach  
**Integration einer hoch-  
drehenden Spindel für die  
Fräsbearbeitung in eine  
Ultrapräzisionsmaschine  
und messtechnische  
Charakterisierung des hy-  
briden Dreh-Fräsprozesses**  
Fachhochschule Jena, 07/09

Stephan Rhein  
**Kompakte Faserverstärker  
hoher Leistung für  
sub-ns-Pulsquellen**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 10/09

Daniel Richter  
**Realisierung von Volumen-  
Bragg-Gittern mit Hilfe  
ultrakurzer Pulse**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 11/09

Stefan Ringleb  
**Elektrooptische Amplitu-  
denmodulation in ultra-  
kurzpuls-laserinduzierten  
Volumenwellenleitern in  
Lithiumniobat**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 04/09

Stephan Roth  
**Untersuchungen optischer  
Effekte in organischen  
LEDs mit anisotropen  
Emittiermaterialien**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 12/09

Ingo Scheidig  
**Montage mikrooptischer  
Systeme mittels Solder  
Bumping**  
Fachhochschule Jena, 03/09

Marcel Sieler  
**Design und Realisierung  
eines mikrooptischen  
Array-Projektors**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 05/09

Christian Semmler  
**Untersuchung zum  
Reibungsverhalten elektro-  
statischer Chucks auf  
Substraten**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 03/09

Klemens Stollberg  
**Gabor-Superlinse – Minia-  
turisierte Abbildungsoptik  
nach dem Vorbild natürli-  
cher Superpositionsaugen**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 02/09

Fabian Stutzki  
**Stabilitätsuntersuchungen  
an monolithischen  
LMA-CW-Faserlasern**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 12/09

Mario Thiele  
**Untersuchungen mit dem  
Rasterelektronenmikros-  
kop zur Optimierung von  
Strukturbreitenmessung  
und Strukturierungs-  
technologie**  
Fachhochschule Jena, 01/09

Robert Trettin  
**Frequenzkonversion  
mittels stimulierter Raman-  
Streuung in passiven  
Single-Mode-Fasern**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 10/09

Marcus Trost  
**Messung und Modellie-  
rung des Reflexions- und  
Streuverhaltens von  
Spiegeln und Substraten  
für 13,5 nm**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 03/09

Sven Scharnowski  
**Photoleitende Antennen  
zur Mehrkanaldetektion  
ultrakurzer Terahertzpulse**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 04/09

Mirko Schreyer  
**Evaluation einer Time-of-  
Flight (PMD) 3D-Kamera  
für den Einsatz bei der  
automatischen, roboter-  
geführten 3D-Vermessung**  
Fachhochschule Jena, 12/09

Julia Schröder  
**Grundlegende Unter-  
suchungen zur optischen  
Detektion von Ultraschall  
mittels miniaturisierbarer  
Zweistrahlinterferometer**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 02/09

Jens Siepmann  
**Synchrone Messung von  
Form und Farbe**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 09/09

Lars Weichhardt  
**Untersuchungen zur  
Regelung für ein adaptiv  
optisches System**  
Fachhochschule Jena, 12/09

Georgios Wenetiadis  
**Entwicklung und  
Charakterisierung eines  
Fasergreifers zur präzisen  
Positionierung von mindes-  
tens 10 optischen Fasern  
für einen anschließenden  
Spleißprozess**  
Fachhochschule Jena, 11/09

Peter Zeil  
**Realisierung und  
Charakterisierung von  
Bragg-Wellenleitern**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 09/09

#### **Bachelorarbeiten / Bachelor Theses**

Julian Pulsack  
**Entwicklung eines Mess-  
und Analyseverfahrens für  
die Charakterisierung von  
Solarzellen**  
Fachhochschule Jena, 09/09

Roman Loose  
**Untersuchung ultrapräziser  
Schleifbearbeitung von  
Wolframcarbid mit Dia-  
mantschleifwerkzeugen**  
Fachhochschule Jena, 07/09

Andreas Müller  
**Konzeption, Aufbau und  
Test eines automatisierten  
Goniometermessplatzes  
mit LabVIEW-Steuerung**  
Fachhochschule Jena, 08/09

Marc Siebecker  
**Entwicklung einer  
Montagevorrichtung für  
GRIN-Linsen**  
Fachhochschule Jena, 09/09

Cornelia Stiehl  
**Präzisionsmontage eines  
Laserresonatorspiegels  
mittels Solder Bumping**  
Fachhochschule Jena, 07/09

Frank Tänzer  
**Untersuchungen zur Ein-  
kopplung von Laserstrah-  
lung in Lichtwellenleiter**  
Fachhochschule Jena, 09/09

#### **Masterarbeiten / Master Theses**

Anika Brahm  
**Aufbau und Charakterisie-  
rung eines Messsystems für  
die Tomographie mittels  
ultrakurzer Terahertz-Pulse**  
Fachhochschule Jena, 01/09

Matthias Hauptvogel  
**Entwicklung und Bewer-  
tung von Methoden zur  
Reduzierung der Messzeit  
von Streulichtmessaord-  
nungen**  
Fachhochschule Jena, 02/09

Johannes Jobst  
**Optical characterisation  
of a thin film Interference  
Filter produced by Ion-  
Assisted Deposition for  
Solar Beam**  
Fachhochschule Jena, 08/09

Hagen Pauer  
**Thermisch stabiler 5 sr  
EUV-Kollektor**  
Fachhochschule Jena, 05/09

Marco Perske  
**Untersuchung thermisch  
stabiler MoN/Si-Schicht-  
systeme für EUV-Kollektor-  
spiegel**  
Fachhochschule Jena, 04/09

Lourdes Patricia R. Ramirez  
**Ultrafast laser induced  
nanostructures in fused  
silica**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 08/09

#### **Dissertationen / Dissertations**

Dr. rer. nat. Martin Bischoff  
**Plasmagestützte Beschich-  
tung von Metallfluoriden  
für den tiefen ultra-  
violetten Spektralbereich**  
Friedrich-Schiller-Universität  
Jena, 10/09







- Edgar, M.P.; Barr, B.W.; Nelson, J.; Plissi, M.V.; Strain, K.A.; Burmeister, O.; Britzger, M.; Danzmann, K.; Schnabel, R.; Clausnitzer, T.; Brückner, F.; Kley, E.B.; Tünnermann, A. **Experimental demonstration of a suspended diffractively coupled optical cavity** Optics Letters 34 (2009) 20 p. 3184-3186, ISSN 0167-9317
- Eidam, T.; Hädrich, S.; Röser, F.; Seise, E.; Gottschall, T.; Rothhardt, J.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A. **A 325-W-Average-Power Fiber CPA System Delivering Sub-400 fs Pulses** IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 15 (2009) 1 p. 187-190, ISSN 1077-260X
- Filatova, E.; Taracheva, E.; Shevchenko, G.; Sokolov, A.; Kozhevnikov, I.; Yulin, S.; Schäfers, F.; Braun, W. **Atomic ordering in TiO<sub>2</sub> thin films studied by X-ray reflection spectroscopy** Physica status solidi B-Basic solid state physics 246 (2009) 7 p. 1454-1458, ISSN 0370-1972
- Flämmich, M.; Danz, N.; Michaelis, D.; Bräuer, A.; Gather, M.C.; Kremer, J.H.-W.M.; Meerholz, K. **Dispersion-model-free determination of optical constants: application to materials for organic thin film devices** Applied Optics 48 (2009) 8 p. 1507-1513, ISSN 1539-4522
- Flemming, M.; Coriand, L.; Duparré, A. **Ultra-hydrophobicity Through Stochastic Surface Roughness** Journal of adhesion science and technology 23 (2009) 3 p. 381-400, ISSN 0169-4243
- Gather, M.C.; Flämmich, M.; Danz, N.; Michaelis, D.; Meerholz, K. **Measuring the profile of the emission zone in polymeric organic light-emitting diodes** Applied Physics Letters 94 (2009) 26 Art. 263301, ISSN 0003-6951
- Gischkat, T.; Hartung, H.; Schrepel, F.; Kley, E.B.; Tünnermann, A.; Wesch, W. **Patterning of LiNbO<sub>3</sub> by means of ion irradiation using the electronic energy deposition and wet etching** Microelectronic engineering 86 (2009) 4-6 p. 910-912, ISSN 0167-9317
- Großmann, C.; Vogel, U.; Riehemann, S.; Richter, B.; Herold, R.; Notni, G. **Ultra Small OLED Pico Projector** Optik & Photonik 4 (2009) 2 p. 34-36, ISSN 1863-1460
- Groves, R.M.; Pradarutti, B.; Kouloumpi, E.; Osten, W.; Notni, G. **2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging** NDT & E international 130: independent nondestructive testing and evaluation 42 (2009) 6, p. 543-549, ISSN 0963-8695
- Ha, W.; Lee, S.; Jung, Y.; Kim, J.K.; Oh, K. **Acousto-optic control of speckle contrast in multimode fibers with a cylindrical piezoelectric transducer oscillating in the radial direction** Optics Express 17 (2009) 20 p.17536-17546, ISSN 1094-4087
- Hädrich, S.; Rothhardt, J.; Eidam, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A. **High energy ultrashort pulses via hollow fiber compression of a fiber chirped pulse amplification system** Optics Express 17 (2009) 5 p. 3913-3922, ISSN 1094-4087
- Heinrich, M.; Kartashov, Y.V.; Szameit, A.; Dreisow, F.; Keil, R.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Vysloukh, V. A.; Torner, L. **Observation of two-dimensional coherent surface vector lattice solitons** Optics Letters 34 (2009) 11 p. 1624-1626, ISSN 0167-9317
- 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 103 (2009) 11 Art. 113903, ISSN 0031-9007
- Heinrich, M.; Kartashov, Y.V.; Ramirez, L.P.R.; Szameit, A.; Dreisow, F.; Keil, R.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Vysloukh, V.A.; Torner, L. **Observation of two-dimensional superlattice solitons** Optics Letters 34 (2009) 23 p. 3701-3703, ISSN 0146-9592
- Helgert, C.; Menzel, C.; Rockstuhl, C.; Pshenay-Severin, E.; Kley, E.-B.; Chipouline, A.; Tünnermann, A.; Lederer, F.; Pertsch, T. **Polarization-independent negative-index metamaterial in the near infrared** Optics Letters 34 (2009) 5 p. 704-706, ISSN 0146-9592
- Helgert, C.; Rockstuhl, C.; Etrich, C.; Menzel, C.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Lederer, F.; Pertsch, T. **Effective properties of amorphous metamaterials** Physical Review B 79 (2009) 23 Art. 233107, ISSN 1098-0121
- Hintersehr, J.; Kühmstedt, P. **Intraorale 3D-Datenerfassung** Quintessenz Zahntechnik 35 (2009) 4 S. 446-451, ISSN 0340-4641
- Huber, G.; Limpert, J.; Tünnermann, A. **Solid-state lasers: status and perspectives** Applied Physics B: Laser and Optics 97 (2009) 2 p. 249, ISSN 0946-2171
- Huber, G.; Limpert, J.; Tünnermann, A. **Special issue: Solid-state lasers: status and perspectives** Applied Physics B: Laser and Optics 93 (2008) 2-3 p. 267-268, ISSN 0946-2171
- Jansen, F.; Nodop, D.; Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A. **Modeling the inhibition of stimulated Raman scattering in passive and active fibers by lumped spectral filters in high power fiber laser systems** Optics Express 17 (2009) 18 p. 16255-16265, ISSN 1094-4087
- Jauregui, C.; Limpert, J.; Tünnermann, A. **Derivation of Raman threshold formulas for CW double-clad fiber amplifiers** Optics Express 17 (2009) 10 p. 8476-8490, ISSN 1094-4087
- Jovanovic, N.; Thomas, J.; Williams, R.J.; Steel, M.J.; Marshall, G.; Fürbach, A.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Withford, M.J. **Polarization-dependent effects in point-by-point fiber Bragg gratings enable simple, linearly polarized fiber lasers** Optics Express 17 (2009) 8 p. 6082-6095, ISSN 1094-4087

- Jung, H.; Shin, W.; Kim, J.K.; Park, S.-H.; Ko, D.-K.; Lee, J.; Oh, K.  
**Bending and strain sensitivities in a helicoidal long-period fiber grating**  
IEEE Photonics Technology Letters 21 (2009) 17 p. 1232-1234, ISSN 1041-1135
- Kim, J.K.; Kim, J.; Jung, Y.; Ha, W.; Jeong, Y.S.; Lee, S.; Tünnermann, A.; Oh, K.  
**Compact all-fiber Bessel beam generator based on hollow optical fiber combined with a hybrid polymer fiber lens**  
Optics Letters 34 (2009) 19 p. 2973-2975, ISSN 0146-9592
- Kim, J.K.; Kim, J.; Oh, K.; Sohn, I.B.; Shin, W.; Choi, H.Y.; Lee, B.  
**Fabrication of Micro Fresnel Zone Plate Lens on a Mode-Expanded Hybrid Optical Fiber Using a Femtosecond Laser Ablation System**  
IEEE Photonics Technology Letters 21 (2009) 1 p. 21-23, ISSN 1041-1135
- Limpert, J.; Röser, F.; Schimpf, D.N.; Seise, E.; Eidam, T.; Hädrich, S.; Rothhardt, J.; Misas, C.J.; Tünnermann, A.  
**High repetition rate gigawatt peak power fiber laser-systems: Challenges, design, and experiment**  
IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 15 (2009) 1 p. 159-169, ISSN 1077-260X
- Matthäus, G.; Nolte, S.; Hohmuth, R.; Voitsch, M.; Richter, W.; Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Large-area microlens emitters for powerful THz emission**  
Applied Physics B: Laser and Optics 96 (2009) 2-3 p. 233-235, ISSN 0946-2171
- Michelotti, F.; Dominici, L.; Descrovi, E.; Danz, N.; Menchini, F.  
**Thickness dependence of surface plasmon polariton dispersion in transparent conducting oxide films at 1.55  $\mu\text{m}$**   
Optics Letters 34 (2009) 6 p. 839-841, ISSN 0146-9592
- Nodop, D.; Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Wavelength-independent all-optical synchronization of a Q-switched 100-ps microchip laser to a femtosecond laser reference source**  
Applied Physics B: Laser and Optics 94 (2009) 3 p. 399-401, ISSN 0946-2171
- Nodop, D.; Jauregui, C.; Schimpf, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Efficient high-power generation of visible and mid-infrared light by degenerate four-wave-mixing in a large-mode-area photonic-crystal fiber**  
Optics Letters 34 (2009) 22 p. 3499-3501, ISSN 0146-9592
- Orta, B.; Baumgartl, M.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Approaching microjoule-level pulse energy with mode-locked femtosecond fiber lasers**  
Optics Letters 34 (2009) 10 p. 1585-1587, ISSN 0146-9592
- Pshenay-Severin, E.; Hübner, U.; Menzel, C.; Helgert, C.; Chipouline, A.; Rockstuhl, C.; Tünnermann, A.; Lederer, F.; Pertsch, T.  
**Double-element metamaterial with negative index at near-infrared wavelengths**  
Optics Letters 34 (2009) 11 p. 1678-1680, ISSN 0146-9592
- Richter, M.; Amusia, M.Y.; Bobashev, S.V.; Feigl, T.; Juranic, P.N.; Martins, M.; Sorokin, A.A.; Tiedtke, K.  
**Extreme ultraviolet laser excites atomic giant resonance**  
Physical Review Letters 102 (2009) 16 Art. 163002, ISSN 0031-9007
- Riehemann, S.; Lippmann, U.; Palme, M.; Grossman, C.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Microdisplay-based industrial 3D and microstructure measurement systems**  
Journal of the Society for Information Display 17 (2009) 7 p. 597-602, ISSN 1071-0922
- Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Gottschall, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Rothhardt, M.; Becker, M.; Brückner, S.; Bartelt, H.  
**Generation of flattop pump pulses for OPCPA by coherent pulse stacking with fiber Bragg gratings**  
Optics Express 17 (2009) 18 p. 16332-16341, ISSN 1094-4087
- Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**80 kHz repetition rate high power fiber amplifier flattop pulse pumped OPCPA based on BIB3O6**  
Optics Express 17 (2009) 2 p. 2508-2517, ISSN 1094-4087
- Scheidung, S.; Gebhardt, A.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Micro Lens Array Milling on Large Substrates**  
Optik & Photonik, 4 (2009) 4 S. 41-45, ISSN 1863-1460
- Schimpf, D.N.; Eidam, T.; Seise, E.; Hädrich, S.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Circular versus linear polarization in laser-amplifiers with Kerr-nonlinearity**  
Optics Express 17 (2009) 21 p. 18774-18781, ISSN 1094-4087
- Schimpf, D.N.; Seise, E.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Self-phase modulation compensated by positive dispersion in chirped-pulse systems**  
Optics Express 17 (2009) 7 p. 4997-5007, ISSN 1094-4087
- Schmidt, C.; Chipouline, A.; Käsebieber, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.; Shuvayev, V.; Deych, L.I.  
**Observation of optical coupling in microdisk resonators**  
Physical Review A 80 (2009) 4 Art. 043841, ISSN 1050-2947.
- Schmidt, O.; Andersen, T.V.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**187 W, 3.7 mJ from spectrally combined pulsed 2 ns fiber amplifiers**  
Optics Letters 34 (2009) 3 p. 226-228, ISSN 0146-9592
- Schmidt, O.; Wirth, C.; Tsybin, I.; Schreiber, T.; Eberhardt, R.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Average power of 1.1 kW from spectrally combined, fiber-amplified, nanosecond-pulsed sources**  
Optics Letters 34 (2009) 10 p. 1567-1569, ISSN 0146-9592
- Schreiber, P.  
**Laserdioden können durch LED-basierte Systeme ersetzt werden**  
MESSTEC & Automation 17 (2009) 11-12 S. 56-57, ISSN 1439-7643
- Schreiber, P.; Höfer, B.; Bräuer, A.; Scholles, M.  
**Laser display with single-mirror MEMS scanner**  
Journal of the Society for Information Display 17 (2009) 7 p. 591-595, ISSN 1071-0922

- Schreiber, T.; Wirth, C.; Schmidt, O.; Andersen, T.V.; Tsybin, I.; Böhme, S.; Peschel, T.; Brückner, F.; Clausnitzer, T.; Röser, F.; Eberhardt, R.; Limpert, J.; Tünnermann, A. **Incoherent Beam Combining of Continuous-Wave and Pulsed Yb-Doped Fiber Amplifiers** IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 15 (2009) 2 p. 354-360, ISSN 1077-260X
- Schrempel, F.; Gischkat, T.; Hartung, H.; Höche, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Wesch, W. **Ultrathin membranes in x-cut lithium niobate** Optics Letters 34 (2009) 9 p. 1426-1428, ISSN 0146-9592
- Schulz, U. **Neue Funktionen für optische Kunststoffe. Optische Funktionalisierung von Kunststoffen durch Plasma-prozesse** mo Metalloberfläche 63 (2009) 1-2 S. 15-18, ISSN 0026-0797
- Schulz, U. **Wideband antireflection coatings by combining interference multilayers with structured top layers** Optics Express 17 (2009) 11 p. 8704-8708, ISSN 1094-4087
- Schulz, U.; Kaiser, N. **Steuerung der Benetzungseigenschaften von transparenten Polymeren durch Antireflexstrukturen und dünne Schichten** Vakuum in Forschung und Praxis 21 (2009) 5 S. 6-8, ISSN 0947-076X
- Setzpfandt, F.; Neshev, D.; Schiek, R.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Pertsch, T. **Competing nonlinearities in quadratic nonlinear waveguide arrays** Optics Letters 34 (2009) 22 p. 3589-3591, ISSN 0146-9592
- Siebenmorgen, J.; Petermann, K.; Huber, G.; Rademaker, K.; Nolte, S.; Tünnermann, A. **Femtosecond laser written stress-induced Nd: Y3A-ISO12 (Nd: YAG) channel waveguide laser** Applied Physics B: Laser and Optics 97 (2009) 2 p. 251-255, ISSN 0946-2171
- Sieler, M.; Schreiber, P. **Ultraflacher Array-Projektor mit statischem Projektionsmotiv** Photonik 41 (2009) 4 S. 16, ISSN 1432-9778
- Steinmetz, A.; Nodop, D.; Limpert, J.; Hohmuth, R.; Richter, W.; Tünnermann, A. **2 MHz repetition rate, 200 ps pulse duration from a monolithic, passively Q-switched microchip laser** Applied Physics B: Laser and Optics 97 (2009) 2 p. 317-320, ISSN 0946-2171
- Stenzel, O. **A model for calculating the effect of nanosized pores on refractive index, thermal shift and mechanical stress in optical coatings** Journal of Physics D: Applied Physics 42 (2009) 5 Art. 055312, ISSN 0022-3727
- Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Friedrich, K.; Kaiser, N. **Realistische Modellierung der NIR/VIS/UV- optischen Konstanten dünner optischer Schichten im Rahmen des Oszillatormodells** Vakuum in Forschung und Praxis 21 (2009) 5 S. 15-23, ISSN 0947-076X
- Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Kaiser, N.; Vinnichenko, M.; Munnik, F.; Kolitsch, A.; Chuvilin, A.; Kaiser, U.; Ebert, J.; Jakobs, S.; Kaless, A.; Wuethrich, S.; Treichel, O.; Wunderlich, B.; Bitzer, M.; Grössl, M. **The correlation between mechanical stress, thermal shift and refractive index in HfO2, Nb2O5, Ta2O5 and SiO2 layers and its relation to the layer porosity** Thin solid films 517 (2009) 21 p. 6058-6068, ISSN 0040-6090
- Stollberg, K.; Brückner, A.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A. **The Gabor superlens as an alternative wafer-level camera approach inspired by superposition compound eyes of nocturnal insects** Virtual Journal of Biomedical Optics 4 (2009) 10 p. 15747, ISSN 1931-1532
- Stollberg, K.; Brückner, A.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A. **The Gabor superlens as an alternative wafer-level camera approach inspired by superposition compound eyes of nocturnal insects** Optics Express 17 (2009) 17 p. 15747-15759, ISSN 1094-4087
- Szameit, A.; Garanovich, I.; Heinrich, M.; Sukhorukov, A.A.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Kivshar, Y.S. **Polychromatic dynamic localization in curved photonic lattices** Nature Physics 5 (2009) 4 p. 271-275, ISSN 1745-2473
- Szameit, A.; Kartashov, Y.V.; Dreisow, F.; Heinrich, M.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Vysloukh, V.A.; Lederer, F.; Torner, L. **Inhibition of Light Tunneling in Waveguide Arrays** Physical Review Letters 102 (2009) 15 Art. 153901, ISSN 0031-9007
- Szameit, A.; Kartashov, Y.V.; Dreisow, F.; Heinrich, M.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Vysloukh, V.A.; Lederer, F.; Torner, L. **Soliton Excitation in Waveguide Arrays with an Effective Intermediate Dimensionality** Physical Review Letters 102 (2009) 6 Art. 063902, ISSN 0031-9007
- Szameit, A.; Kartashov, Y.V.; Heinrich, M.; Dreisow, F.; Keil, R.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Vysloukh, V.A.; Lederer, F.; Torner, L. **Nonlinearity-induced broadening of resonances in dynamically modulated couplers** Optics Letters 34 (2009) 18 p. 2700-2702, ISSN 0146-9592
- Szameit, A.; Kartashov, Y.V.; Heinrich, M.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.; Vysloukh, V.A.; Torner, L. **Observation of two-dimensional defect surface solitons** Optics Letters 34 (2009) 6 p. 797-799, ISSN 0146-9592
- Szameit, A.; Keil, R.; Dreisow, F.; Heinrich, M.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A. **Observation of discrete solitons in lattices with second-order interaction** Optics Letters 34 (2009) 18 p. 2838-2840, ISSN 0146-9592
- Vinnichenko, M.; Rogozin, A.; Grambole, D.; Munnik, F.; Kolitsch, A.; Moeller, W.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Chuvilin, A.; Kaiser, U. **Highly dense amorphous Nb2O5 films with closed nano-sized pores** Applied Physics Letters 95 (2009) 8 p. 081904-1-081904-3, ISSN 1077-3118
- Voigtländer, C.; Thomas, J.; Wikszak, E.; Dannberg, P.; Nolte, S.; Tünnermann, A. **Chirped fiber Bragg gratings written with ultrashort pulses and a tunable phase mask** Optics Letters 34 (2009) 12 p. 1888-1890, ISSN 0146-9592



- Notni, G.  
**Vermessung optischer Freiformoberflächen – Von der Makrogeometrie bis zur Nanostruktur**  
Kolloquium des SFB Nanomessmaschine, 9.6.2009, Ilmenau, Deutschland
- Ortaç, B.; Baumgartl, M.; Schmidt, O.; Hideur, A.; Sagnes, I.; Garnache, A.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Microjoule-level picosecond and femtosecond mode-locked fiber oscillators**  
CLEO Europe - EQEC 2009, The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the Xlth European Quantum Electronics Conference, 14.–19.6.2009, Munich, Germany
- Pertsch, T.; Eilenberger, F.; Minardi, S.; Nolte, S.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Röpke, U.; Kobelke, J.; Schuster, K.; Bartelt, H.; Kartashov, Y.; Turner, L.  
**Light propagation in complex two-dimensional waveguide lattices**  
IEEE LEOS Winter Topicals 2009, 12.–14.12.2009, Innsbruck, Austria
- Schreiber, T.  
**Monsterwellen in optischen Fasern**  
Seminar Optische Technologien, 2.–4.9.2009, Schilbach, Deutschland
- Schreiber, T.  
**Power Scaling of High Brightness Fiber Lasers**  
Photonics@be doctoral school 2009; 16.–18.3.2009, Oostduinkerke, Belgium
- Schulz, U.; Munzert, P.; Bollwahn, N.; Kaiser, N.  
**Plasma processes for modifying the optical properties of polymers**  
Frontiers in Optical Coatings, International Conference on optical thin film and coating technology, 11.–16.10.2009, Xian, China
- Schulz, U.  
**Plasma Modification of Polymers for Optical Applications**  
7th International Symposium of Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion, 12.–15.7.2009, Maine University of Maine, Orono, USA
- Tünnermann, A.  
**Advanced solid state lasers: status and perspectives**  
Annual Conference of the Heriot Watt, Innovative Manufacturing, Research Centre Edinburgh, 22.–23.4.2009, Edinburgh, Scotland, United Kingdom
- Tünnermann, A.  
**Laser von der Rolle – Faserlaser erobern die Märkte**  
Fraunhofer Technologiezentrum, 7.–8.5.2009, Aachen, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Green Photonics – Optische Lösungen für die Zukunft**  
Fraunhofer Forum, 11.5.2009, München, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Netzwerken mit Erfolg**  
Baden-Badener Gespräche, 15.05.2009, Jena, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Advanced solid state lasers: status and perspectives**  
EOS Conferences at the World of Photonics Congress 2009, 15.–17.6.2009, Munich, Germany
- Tünnermann, A.  
**Green Photonics – Ein Wachstumsmarkt der Optik- und Photonikindustrie**  
Analystenkonferenz Spectaris, 15.–18.6.2009, München, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Photonik – ein Wachstumsmarkt**  
Jubiläumssymposium Licht-Materialien-Modelle, 7.–8.9.2009, Berlin, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**High repetition rate short pulse fiber lasers and amplifiers: Fundamentals and perspectives**  
5th International Workshop on Fiber Lasers, 30.9.–1.10.2009, Dresden, Germany
- Tünnermann, A.; Limpert, J.; Schreiber, T.  
**High power fiber lasers and amplifiers**  
OSA Annual Meeting, 11.–15.10.2009, San Jose, California, USA
- Tünnermann, A.  
**Green Photonics – Das etwas bessere Licht**  
ART-KON-TOR – Plattform 360°, 21.10.2009, Jena, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Hochleistungsfaserlaser: Entwicklungen und Trends**  
20. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, 28.–29.10.2009, Mittweida, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**High Power Femtosecond Lasers and Novel Dynamics during High Repetition Machining**  
ICALEO International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2.–5.11.2009, Orlando, Florida, USA
- Tünnermann, A.; Limpert, J.; Nolte, S.  
**Lasermaterialbearbeitung silikatischer Werkstoffe**  
6. Jenaer Technologietag, 9.11.2009, Jena, Deutschland
- Vorträge, Poster, Konferenzen / Lectures, Posters, Conferences**
- Beckert, E.; Oppert, T.; Ghassem, A.; Zakel, E.; Burkhardt, T.; Hornaff, M.; Scheidig, I.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.; Buchmann, F.  
**Solder Jetting – A Versatile Packaging and Assembly Technology for Hybrid Photonics and Optoelectronic Systems**  
IMAPS 2009, 42nd International Symposium on Microelectronics, 1.–5.11.2009, San Jose, California, USA  
Proceedings IMAPS (2009) p. 406 ISBN 0-930815-89-0
- Böhme, S.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Laser splicing of end caps: process requirements in high-power laser applications**  
SPIE Photonics West, 24.–29.1.2009, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7202 (2009) Art. 720205, ISBN 978-0-8194-7448-3
- Bowlan, P.; Fuchs, U.; Trebino, R.; Zeitner, U.  
**Measuring the spatiotemporal electric field of tightly focused ultrashort pulses with submicron spatial resolution**  
SPIE Photonics West, 24.–29.1.2009, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7203 (2009) Art. 72030X, ISBN 978-0-8194-7449-0
- Brahm, A.; Kunz, M.; Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**THz tomography in transmission and reflection**  
IRMMW - THz 2009, 34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 21.–25.9.2009, Busan, South Korea

- Brahm, A.; Scharnowski, S.; Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Nolte, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**128 Channel THz ultrashort pulse system**  
CLEO Europe - EQEC 2009  
The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the XIth European Quantum Electronics Conference, 14.–19.6.2009, Munich, Germany
- Brahm, A.; Scharnowski, S.; Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Nolte, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**128 Channel THz ultrashort pulse system**  
IRMMW - THz 2009, 34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 21.–25.9.2009, Busan, South Korea
- Bräuer, A.  
**Microoptics for illumination and imaging systems**  
IBM Research Center Almaden, 28.1.2009, San Jose, California, USA
- Bräuer, A.; Beckert, E.  
**Microoptics for efficiency increase of LED lighting**  
Green Lighting 2009 (GL09), 24.–25.3.2009, Frankfurt/Main, Germany
- Bräuer, A.; Schreiber, P.; Dannberg, P.; Wippermann, F.  
**Highly efficient microoptics for homogeneous LED spots and spot arrays**  
15th Microoptics Conference MOC 2009, 25.–28.10.2009, Tokyo, Japan
- Bräuer-Burchardt, C.; Heinze, M.; Munkelt, C.; Kühmstedt, P.  
**Influence of filter operators on 3D coordinate calculation in fringe projection systems**  
FRINGE'09: The 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology, 14.–16.9.2009, Nürtingen, Germany  
Fringe 2009: 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology (2009)  
p. 215-220,  
ISBN 978-3-642-03050-5
- Bräuer-Burchardt, C.; Schröder, S.; Trost, M.; Kühmstedt, P.; Duparré, A.; Notni, G.  
**Roughness Estimation of Ultra Thin Multilayer Coatings in Cross-Section Images with Poor SNR Using Edge Localization**  
6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA), 16.–18.9.2009, Salzburg, Austria
- Breitbarth, M.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Calibration of a combined system with phase measuring deflectometry and fringe projection**  
SPIE Europe Optical Metrology, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection, 14.–18.6.2009, Munich, Germany  
SPIE Proceedings Vol. 7389 (2009) Art. 738909,  
ISBN 978-0-8194-7672-2
- Bruchmann, C.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Gebhardt, S.E.; Tünnermann, A.  
**Unimorph laser mirror based on LTCC**  
7th Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine 2009, 8.–11.6.2009, Shatura, Russia
- Bruchmann, C.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Peschel, T.; Gramens, S.; Gebhardt, S.E.; Tünnermann, A.  
**Novel construction of a deformable mirror for laser beam shaping**  
SPIE Photonics West, 24.–29.1.2009, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7209 (2009) Art. 72090B,  
ISBN 978-0-8194-7455-1
- Brückner, A.; Stollberg, K.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Recent developments in microoptical artificial compound eyes**  
15th Microoptics Conference MOC 2009, 25.–28.10.2009, Tokyo, Japan
- Brückner, A.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Hoffmann, C.  
**Ultra-compact vision system for automotive applications**  
EOS 4th Topical Meeting on Advanced Imaging Techniques, 10.–12.6.2009, Ernst-Abbe-Zentrum, Jena, Germany  
4th EOS Topical Meeting on Advanced Imaging Techniques (2009) p. 166-167,  
ISBN 978-3-00-024189-5
- Brückner, C.; Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Design of a THz optics for a 128 channel THz imaging system**  
IRMMW - THz 2009, 34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 21.–25.9.2009, Busan, South Korea
- Burkhardt, T.; Hornaff, M.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Parametric investigation of solder bumping for assembly of optical components**  
SPIE Photonics West, 24.–29.1.2009, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7202 (2009) Art. 720203,  
ISBN 978-0-8194-7448-3
- Burkhardt, T.; Kamm, A.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Buchmann, F.; Tünnermann, A.  
**Solderjet bumping for the assembly of optical fibers**  
VII. ITG-Workshop, 7.5.2009, Wernigerode, Germany  
VII. ITG-Workshop Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik, p. 42-46, ISBN 978-3-86955-008-4
- Dannberg, P.; Wippermann, F.; Schreiber, P.; Bräuer, A.  
**Wafer-level fabrication of complex micro-optical modules**  
EOS Conferences at the World of Photonics Congress 2009, 15.–17.6.2009, Munich, Germany
- Duparré, A.; Notni, G.  
**Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen**  
Fraunhofer VISON Technologietag 2009, 8.–9.10.2009, Kaiserslautern, Deutschland
- Duparré, A.  
**Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen für funktionale Oberflächen und Schichten**  
Fraunhofer Allianz Vision Seminar und Praktikum: Inspektion und Charakterisierung von Oberflächen mit Bildverarbeitung, 3.–4.12.2009, Erlangen, Deutschland
- Duparré, A.; Schröder, S.  
**Nanoroughness characterization of complex surfaces by advanced light scattering techniques**  
110. Annual Meeting of the DGaO, 2.–5.6.2009, Brescia, Italy
- Eberhardt, R.; Beckert, E.; Burkhardt, T.; Mohaupt, M.; Bruchmann, C.; Tünnermann, A.  
**Neue Konzepte der Aufbau- und Verbindungstechnik mikrooptischer Systeme**  
Mikrosystemtechnik Kongress 2009, 12.–14.10.2009, Berlin, Deutschland
- Eckstein, H.-C.; Zeitner, U.D.; Schmid, W.; Strauss, U.  
**Control of slow axis mode behavior with Waveguide Phase Structures in Semiconductor Broad-Area Lasers**  
SPIE Photonics West, 24.–29.1.2009, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7230 (2009) Art. 72301L,  
ISBN 978-0-8194-7476-6



- Eilenberger, F.; Minardi, S.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Lederer, F.; Tünnerman, A.; Ropke, U.; Kobelke, J.; Schuster, K.; Bartelt, H.; Khartashov, Y.; Torner, L.  
**Observation of discrete-continuous optical bullets**  
2009 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & 11th European Quantum Electronics Conference (CLEO/EQEC), 14.–19.6.2009, Munich, Germany p. 1, ISBN 978-1-4244-4079-5
- Feigl, T.; Perske, M.; Pauer, H.; Yulin, S.; Schürmann, M.; Kaiser, N.  
**5 sr high-temperature collector mirror**  
SPIE Advanced Lithography 2009, 22.–27.2.2009, San Jose, California, USA
- Förster, E.; Müller, R.  
**Opto-electric emitter-receiver-device with ray shaping**  
Smart System Integration SSI, 1.–11.3.2009, Brussels, Belgium  
SPIE Photonics West 2009 Terahertz Technology and Applications II, 28.–29.1.2009, San Jose, USA
- Freese, W.; Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Eckstein, H.-C.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Multi-channel detection of ultrashort THz-pulses based on photoconductive antennas**  
SPIE Photonics West 2009 Terahertz Technology and Applications II, 28.–29.1.2009, San Jose, USA SPIE Proceedings Vol. 7215 (2009) Art. 721505, ISBN 978-0-8194-7461-2
- Gebhardt, A.; Risse, S.; Peschel, T.; Senden, R.; Bosch, A.J.  
**New nickel plated metal mirrors utilizing meltspun aluminium silicon alloy**  
Euspen 9th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 5.6.2009, San Sebastian, Spain  
Euspen Proceedings of the 9th international conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology p.427-430, ISBN 9780955308260
- Gebhardt, A.; Scheiding, S.; Risse, S.; Steinkopf, R.  
**Manufacturing of Free-forms with well defined Reference Structures**  
Proceedings of the ASPE Annual Meeting in Monterey, 4.–9.10.2009, Monterey, California, USA
- Großmann, C.; Vogel, U.; Lippmann, U.; Riehemann, S.; Notni, G.  
**Ultra-compact projection system using an OLED source for mobile application**  
4th EOS Topical Meeting on Advanced Imaging Techniques, 10.–12.6.2009, Jena, Germany  
4th EOS Topical Meeting on Advanced Imaging Techniques p. 64-65, ISBN 978-3-00-024189-5
- Groves, R.M.; Pradarutti, B.; Kouloumpi, E.; Osten, W.  
**Multi-sensor evaluation of a wooden panel painting using terahertz imaging and shearography**  
SPIE Europe Optical Metrology 2009. Optics for Arts, Architecture, and Archaeology II, 14.–18.6.2009, Munich, Germany  
SPIE Proceedings Vol. 7391 (2009) Art. 73910E, ISBN 978-0-81-947674-6
- Groves, R.M.; Pradarutti, B.; Notni, G.; Kouloumpi, E.; Osten, W.  
**Structural diagnostics of artwork using shearography and terahertz imaging**  
Lacona VIII - Lasers in the observation of art, 21.–25.9.2009, Sibiu, Romania
- Hagemann, C.  
**Monolithischer Hochleistungspumpkoppler für Faserlaser**  
Seminar Optische Technologien, 2.–4.9.2009, Schilbach, Deutschland
- Hartung, H.; Geiss, R.; Gischkat, T.; Schrepel, F.; Iliew, R.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Wesch, W.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.  
**Photonic crystals in lithium niobate by ion-beam enhanced etching**  
IEEE/LEOS winter topicals meeting series, 12.–14.1.2009, Innsbruck, Austria p. 62-63, ISBN 978-1-4244-2610-2
- Heidler, N.; Schenk, C.; Harnisch, G.; Risse, S.; Schubert, G.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Dynamical Non-contact Exhaustion Pipe for Vacuum Compatible Air Guided Stages**  
ASPE 24th Annual Meeting, 4.–9.10.2009, Monterey, California, USA
- Helm, R.; Mauroner, O.; Dowling, M.  
**Innovativeness as mediator between entrepreneurial motivation and venture performance**  
7th Interdisciplinary European Conference on Entrepreneurship Research (IECER), 05.03.2009, Lisbon, Portugal
- Helm, R.; Mauroner, O.; Dowling, M.; Meng, F.  
**Economic Development of Cities through Spin-offs from Research Institutions: Entrepreneurial Orientation and Spin-off Venture Performance**  
The Second Knowledge Cities Summit, 5.–6.11.2009, Shenzhen, China
- Herfurth, T.; Trost, M.; Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.  
**EUV scattering measurements of optical components**  
110. Annual Meeting of the DGaO, 2.–5.6.2009, Brescia, Italy
- Herfurth, T.; Schröder, S.; Duparré, A.  
**Finish assessment of ultra precision optical surfaces using light scattering techniques**  
SPIE Optifab, 11.–14.5.2009, New York, USA
- Jakobs, S.; Lappschies, M.; Schallenberg, U.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S.  
**Characterization of metal-oxide thin films deposited by plasma assisted reactive magnetron sputtering**  
Frontiers of Optical Coatings 2009, 11.–16.10.2009, Xian, China
- Kaiser, N.; Bischoff, M.; Feigl, T.; Schulz, U.; Yulin, S.  
**A Journey from Ancient China Bronze Mirrors to Picometer Shaped Interference Coatings**  
Frontiers of Optical Coatings 2009, 11.–16.10.2009, Xian, China
- Kaiser, N.; Blumröder, U.; Fücksel, K.; Schulz, U.  
**Stochastic nanostructures on polymers for photovoltaic applications**  
2009 TechCon, 11.–12.5.2009, Santa Clara, California, USA

- Kalkowski, G.; Peschel, T.; Risse, S.; Müller, S.; Engelstad, R.; Zeuske, J.; Vukkadala P.  
**Determination of Local Electrostatic Forces for EUVL Mask Chucks**  
35th International Conference on Micro- and Nano-Engineering, 28.9.–1.10.2009, Ghent, Belgium
- Kick, A.; Bönsch, M.; Begemann, S.; Sonntag, F.; Schilling, N.; Voigt, J.; Katzschner, B.; Herr, A.; Danz, N.; Howitz, S.; Klotzbach, U.; Jung, M.; Brabetz, W.; Mertig, M.  
**SPR-basierte DNA-Mikroarrays**  
9. Dresdner Sensor-Symposium, 7.–9.12. 2009, Dresden, Deutschland
- Kühmstedt, P.  
**Ultramobile 3-D-Messtechnik**  
Fraunhofer VISON Technologietag 2009, 8.–9.10.2009, Kaiserslautern, Deutschland
- Kühmstedt, P.; Bräuer-Burchardt, C.; Notni, G.  
**Measurement Accuracy of Fringe Projection Depending on Surface Normal Direction and Object Position**  
SPIE Optics + Photonics. Optical Inspection and Metrology for Non-Optics Industries, 2.–6.8.2009, San Diego, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7432 (2009) Art. 743203, ISBN 978-0-8194-7722-4
- Kühmstedt, P.  
**Praxisbericht: Robuste Multi-View-3D-Messsysteme in Rapid Prototyping- und Qualitätssicherungs-Prozessketten**  
Fraunhofer Allianz Vision Seminar mit Praktikum: Optische 3-D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion, 19.–20.11.2009, Magdeburg, Deutschland
- Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Ultramobile 3D-Messtechnik**  
Vortragsforum 3D-Bildverarbeitung in der Mess- und Prüftechnik, Control 2009, 5.–8.5.2009, Stuttgart, Deutschland
- Mertig, M.; Kick, A.; Bönsch, M.; Katzschner, B.; Voigt, J.; Sonntag, F.; Schilling, N.; Klotzbach, U.; Danz, N.; Begemann, S.; Herr, A.; Jung, M.  
**A Novel Platform Technology for the Detection of Genetic Variations by Surface Plasmon Resonance**  
IEEE Sensors 2009 Conference, 25.–28.10.2009, Christchurch, New Zealand
- Michaelis, D.; Danz, N.; Flämmich, M.; Wächter, C.; Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Tailored light emission form OLEDs**  
Talk at 3rd EOS Topical Meeting on Optical Microsystems (OpS'09), 27.–30.9.2009, Capri, Italy
- Mohaupt, M.; Beckert, E.; Hornaff, M.; Burkhardt, T.; Damm, C.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Precisely assembled Multi Deflection Arrays – key components for Multi Shaped Deam lithography**  
MNE 2009 - Micro Nano Engineering 2009, 28.9.–1.10.2009, Ghent, Belgium
- Munkelt, C.; Trummer, M.; Denzler, J.; Notni, G.  
**Volumetric view planning for 3D Reconstruction using combined quality criteria**  
The 9th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, 1.–3.7.2009, Vienna, Austria  
Optical 3-D measurement techniques, Vol. II p. 275-284, ISBN 978-3-9501492-5-8
- Munkelt, C.; Trummer, M.; Kühmstedt, P.; Denzler, J.; Notni, G.  
**View Planning for 3D Reconstruction using Time-of-Flight Camera Data as a-priori Information**  
FRINGE'09: The 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology, 14.–16.9.2009, Nürtingen, Germany  
Fringe 2009: 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology p. 556-561, ISBN 978-3-642-03050-5
- Munkelt, C.; Trummer, M.; Kühmstedt, P.; Notni, G.; Denzler, J.  
**View Planning for 3D Reconstruction Using Time-of-Flight Camera Data**  
31. DAGM - Symposium 2009, 9.–11.9.2009, Jena, Germany  
Proceedings Pattern recognition p. 352-361, ISBN 978-3-642-03797-9
- Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Hocheffektive Entspiegelung von Kunststoffoptiken durch Plasmaätzen**  
V2009 Industrieausstellung und Workshop-Woche  
Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik, 20.–22.10.2009, Dresden, Deutschland
- Notni, G.  
**Bildgebende Terahertz-Systeme für die zerstörungsfreie Prüfung**  
388. JENAer Carl-Zeiss-Optikkolloquium, 15.12.2009, Jena, Deutschland
- Notni, G.  
**Blick in die Zukunft: Zerstörungsfreie Prüfung und Terahertz-Tomographie**  
Fraunhofer Allianz Vision Seminar mit Praktikum: Wärmefluss – Thermographie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Produktion, 12.–13.11.2009, Erlangen, Deutschland
- Notni, G.  
**Digitale Projektionssysteme für medizintechnische Anwendungen**  
OptoNet Workshop: Optische Systeme und Sensoren für den Zukunftsmarkt  
Gesundheit, 2.4.2009, Jena, Deutschland
- Notni, G.  
**Grundlagen der Terahertz-Messtechnik**  
Fraunhofer VISON Technologietag 2009, 8.–9.10.2009, Kaiserslautern, Deutschland
- Notni, G.  
**Kolibri CRIME – Mobiler 3D-Scanner**  
10. Internationaler Polizeiarbeitsworkshop: Photogrammetrie und Laserscanning, 20.–24.7.2009, Neuss, Deutschland
- Notni, G.  
**Kolibri CRIME – Handgeführter kabelloser 3D-Scanner zur Erfassung von Formspuren**  
Kriminaltechnisches Symposium 2009 Werkzeugspuren und sonstige Formspuren, 28.–29.4.2009, Kiel, Deutschland
- Notni, G.  
**Konfokale Verfahren – Triangulationsverfahren – Lichtschnitt – Streifenprojektion**  
Fraunhofer Allianz Vision Seminar mit Praktikum: Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion, 19.–20.11.2009, Magdeburg, Deutschland
- Notni, G.  
**THz-Bildgebung für die zerstörungsfreie Prüfung**  
14. IPA-Anwenderforum, 30.9.2009, Stuttgart, Deutschland

- Oliva, M.; Benkenstein, T.; Flemming, M.; Zeitner, U.  
**AFM characterization of large area micro-optical elements**  
EOS Conferences at the World of Photonics Congress 2009, 15.–17.6.2009, Munich, Germany  
SPIE Proceedings Vol. 7389 (2009) Art. 73893K, ISBN 978-0-8194-7672-2
- Perske, M.; Pauer, M.; Yulin, S.; Nesterenko, V.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**Beschichtungen für die EUV-Lithographie**  
V2009 Vakuum-Beschichtung und Plasma-Oberflächentechnik. Workshop 5: Beschichtungen für den optischen Gerätebau, 20.–22.10.2009, Dresden, Deutschland
- Pertsch, T.; Eilenberger, F.; Minardi, S.; Nolte, S.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Röpke, U.; Kobelke, J.; Schuster, K.; Bartelt, H.; Kartashov, Y.; Torner, L.  
**Spatio-temporal light propagation in complex two-dimensional waveguide lattices**  
IEEE/LEOS winter topical meeting series: (WTM 2009) p. 162-163, ISBN 978-1-4244-2610-2
- Risse, S.; Kalkowski, G.; Peschel, T.; Harnisch, G.; Müller, S.; Eberhardt, E.  
**Ultra-Planar Electrostatic Chucks based on low CTE materials for lithography and metrology**  
ASPE 24th Annual Meeting, 4.–9.10.2009, Monterey, California, USA
- Scheidung, S.; Steinkopf, R.; Gebhardt, A.; Dannberg, P.; Risse, S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Aspheric Lens Array Machining and Replication**  
EOS Conference at the World of Photonics Congress 2009 - Session: High Volume Manufacturing of Optical Components, 15.–17.6.2009, Munich, Germany  
Proceedings EOS Conference at the World of Photonics Congress 2009 on CD-ROM
- Scheidung, S.; Steinkopf, R.; Kolbmüller, A.; Risse, S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Lens Array Manufacturing using a Driven Diamond Lathe**  
Euspen 9th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 5.6.2009, San Sebastian, Spain  
Proceedings of the 9th international conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology Engineering and Nanotechnology p. 423-424, ISBN 978-0-9553082-6-0
- Schmidt, C.; Chipouline, A.; Käsebier, T.; Chowdhury, G. K.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Deych, L.; Pertsch, T.  
**Nonlinear effects in silica and hybrid silica/silicon disc micro resonators**  
2009 IEEE/LEOS winter topicals meeting series: (WTM 2009), p. 118-119, ISBN 978-1-4244-2610-2
- Schmidt, C.; Chipouline, A.; Käsebier, T.; Deych, L.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.  
**Spectral characteristics of coupled silica disc micro resonators**  
2009 IEEE/LEOS winter topicals meeting series (WTM 2009), 12.–14.1.2009, Innsbruck, Austria  
2009 IEEE/LEOS winter topicals meeting series (WTM 2009), p. 92-93, ISBN 978-1-4244-2610-2
- Schreiber, P.  
**LED instead – Replacement of laser diode modules by LED devices**  
EuroLED 2009, 2.–4.6.2009, Coventry, UK
- Schreiber, P.  
**Mikrooptische Konzepte zur Strahlformung von Leuchtdioden**  
7. VDI-Fachtagung Innovative Beleuchtung mit LED, 10.–11.11.2009, Düsseldorf, Deutschland
- Schreiber, P.  
**Solid state lighting – LED versus lasers?!**  
World of Photonics, 15.–18.6.2009, Munich, Germany
- Schröder, S.; Duparré, A.  
**Angle-resolved scattering: a method for investigations of laser induced damage**  
Laser Damage Symposium XLI: Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, 21.–23.9.2009, Boulder, USA
- Schröder, S.; Trost, M.; Herffurth, T.; Duparré, A.  
**Comparison of methods to determine Power Spectral Density functions and rms roughness**  
SPIE Optifab, 11.–15.5.2009, New York, USA
- Schulz, U.; Munzert, P.; Gödeker, C.; Kaiser, N.  
**Breitband-Entspiegelung von Glas- und Kunststoff-optik**  
V2009 Vakuum-Beschichtung und Plasma-Oberflächentechnik. Workshop 5: Beschichtungen für den optischen Gerätebau, 21.–22.10.2009, Ramada Hotel, Dresden, Deutschland
- Schulz, U.  
**Entspiegelung transparenter Polymere durch Plasmaätzen**  
DPG Frühjahrstagung, 30.3.–2.4.2009, Greifswald, Deutschland
- Schulz, U.  
**Designing Optical Coatings by Using Low-Index Equivalent Layers and Low Index Effective Media**  
SVC 52nd Annual Technical Conference, 9.–14.5.2009, Santa Clara, California, USA
- Schürmann, A.; Yulin, S.; Nesterenko, V.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**Complex investigation of Mo/Si multilayer optics after exposure to pulsed EUV radiation**  
International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, 18.–21.10.2009, Prague, Czech Republic
- Schürmann, M.; Luck, F.-U.; Stöckl, W.; Jobst, P.-J.; Kaiser, N.  
**Strukturierbare optische Schichten auf der Basis von Chrom**  
V2009 Vakuum-Beschichtung und Plasma-Oberflächentechnik. Workshop 5: Beschichtungen für den optischen Gerätebau, 20.–22.10.2009, Dresden, Deutschland
- Siepmann, J.; Heinze, M.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Pixel Synchronous Measurement of Object Shape and Colour**  
SPIE Optics + Photonics. Optical Inspection and Metrology for Non-Optics Industries, 2.–6.8.2009, San Diego, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7432 (2009) Art. 74320Y, ISBN 978-0-8194-7722-4
- Sonntag, F.; Schmieder, S.; Danz, N.; Mertig, M.; Schilling, M.; Klotzbach, U.; Beyer, E.  
**Novel lab-on-a-chip system for label-free detection of DNA hybridization and protein-protein interaction by surface plasmon resonance (SPR)**  
SPIE Bioengineered and Bioinspired Systems IV, 2.–6.5.2009, Dresden, Germany  
SPIE Proceedings Vol. 7365 (2009) Art. 73650Q, ISBN 978-0-8194-7639-5
- Stenzel, O.  
**Oxidische nanoporöse Schichten mit ausbalancierten optischen und mechanischen Eigenschaften**  
V2009 Vakuum-Beschichtung und Plasma-Oberflächentechnik. Workshop 5: Beschichtungen für den optischen Gerätebau, 20.–22.10.2009, Dresden, Deutschland

Swieszkowski, W.; Smolik, W. T.; Danz, N.; Förster, E.; Kaiser, J.-P.; Bruinink, A.; Kurzydłowski, K. J.  
**Micro Sensor for Cell Force Measurement**  
2009 E-MRS Fall Meeting, 14. – 18.9.2009, Warsaw, Poland

Trettin, R.  
**Stimulierte Raman-Streuung in optischen Fasern**  
Auswärtsseminar Optische Technologien, 2. – 4.9.2009, Schilbach, Deutschland

Trummer, M.; Denzler, J.; Munkelt, C.  
**Extending GKL Tracking – Feature Tracking for Controlled Environments with Integrated Uncertainty Estimation**  
Proceedings of the 16th Scandinavian Conference on Image Analysis p. 460 – 469, ISBN 978-3-642-02229-6

Trummer, M.; Munkelt, C.; Denzler, J.  
**Combined GKL Feature Tracking and Reconstruction for Next Best View Planning**  
31. DAGM-Symposium 2009, 9. – 11.9.2009, Jena, Germany  
Proceedings Pattern recognition p. 161-170, ISBN 978-3-642-03797-9

Trutschel, U.; Unger, A.; Langbein, U.; Wächter, C.  
**Directional coupling inside a step-index multi-layer fiber**  
110. Jahrestagung der DGaO, 2. – 5.6. 2009, Brescia, Italy

Tudela, R.; Brückner, A.; Duparré, J.; Bräuer, A.  
**Small stereovision system using artificial apposition compound eye objectives**  
4th EOS Topical Meeting on Advanced Imaging Techniques, 10. – 12.6.2009, Jena, Germany  
Proceedings of 4th EOS Topical Meeting on Advanced Imaging Techniques, p. 52-53

Vinnichenko, M.; Rogozin, A.; Grambole, D.; Munnik, F.; Kolitsch, A.; Moeller, W.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Chuviiln, A.; Kaiser, U.  
**Highly dense amorphous Nb2O5 films with closed nano-sized pores**  
E-MRS Spring Meeting, 8. – 12.6.2009, Strasbourg, France

Vogel, U.; Underwood, I.; Notni, G.; Zilstorff, C.; Meerholz, K.  
**HYPOLED-VGA OLED micro-display for HMD and micro-projection**  
The 9th International Meeting on Information Display, 12. – 16.10.2009, Seoul, South Korea

Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Friedrich, K.  
**Virtuelle Beschichtungsläufe zur Design- und Prozessführungsoptimierung**  
V2009 Vakuum-Beschichtung und Plasma-Oberflächentechnik Workshop 5: Beschichtungen für den optischen Gerätebau, 20. – 22.10.2009, Dresden, Deutschland

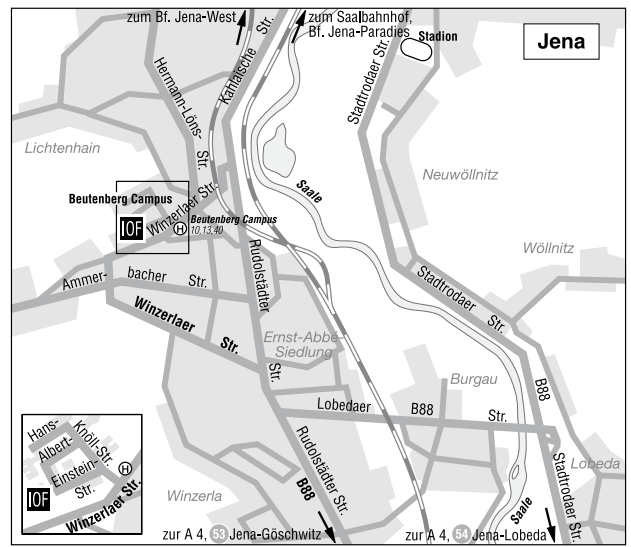
Wippermann, F.C.; Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Comparison of fly's eye condensers based on regular, chirped and stochastic tandem microlens arrays**  
SPIE Photonics West, 24. – 29.1.2009, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 7194 (2009) Art. 719404, ISBN 978-0-8194-7440-7

Wirth, C.; Böhme, S.; Röser, F.; Schmidt, O.; Tsybin, I.; Schreiber, T.; Peschel, T.; Clausnitzer, T.; Limpert, J.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**2 kW High Power Spectral Beam Compining of Yb-Doped Fiber Amplifiers**  
ASSP-Conference 2009, 1. – 4.2.2009, Denver, Colorado, USA

Yulin, S.; Schürmann, M.; Nesterenko, V.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Schürmann, M.C.; Matsunari, S.  
**Optics lifetime under pulsed and synchrotron radiation**  
2009 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, 18. – 21.10.2009, Prague, Czech Republic

# 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. Von dort aus ab Teichgraben mit den Linien 10, 11 oder 13.

An der Haltestelle »Beutenberg Campus« aussteigen und der Ausschilderung folgen.

Ab Westbahnhof (Ost-Westverbindung) ca. 1 Minute zur Haltestelle Magdelstieg, dann die gleiche Busverbindung 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 10, 11 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 Jena-West.

After the bridge on the right hand you will see the bus stop Magdelstieg. 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  
Albert-Einstein-Straße 7  
07745 Jena

Telefon +49 3641 807-0  
Fax +49 3641 807-600  
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. Brigitte Weber  
Dipl.-Ing. Sylvia Bathke

### Redaktion / Editorial deadline

2. März 2009

### Gestaltung / Graphic design

ART-KON-TOR Kommunikation GmbH  
Hainstraße 1  
07745 Jena  
www.art-kon-tor.de

wwsc GmbH  
Eduard-Rosenthal-Straße 30  
99423 Weimar  
www.wwsc.de

### Druck / Print

Förster & Borries GmbH & Co. KG  
Industrierandstraße 23  
08060 Zwickau

### Bildnachweis / Photo Acknowledgements

Seiten / pages 2 + 3:  
© Fraunhofer IOF/Dirk Mahler.

Seite / page 8:  
© Fraunhofer/Bernd Müller.

Seite / page 20:  
© Fraunhofer IOF/Thomas Ernsting.

Seite / page 33:  
Panoramabild, rechtes Motiv:  
© 2010 RapidEye AG. All rights reserved.

Seiten / pages 55 + 109:  
Panoramabild, rechtes Motiv:  
© Fraunhofer IOF/Thomas Ernsting.

Seite / page 127:  
Links: © Fraunhofer IOF/Thomas Ernsting,  
rechts: © Fraunhofer FEP.

Seite / page 128:  
Links: © Fraunhofer ILT, rechts: © Fraunhofer IST.

Seite / page 129:  
Links: © Fraunhofer IPM, rechts: © Fraunhofer IWS.

