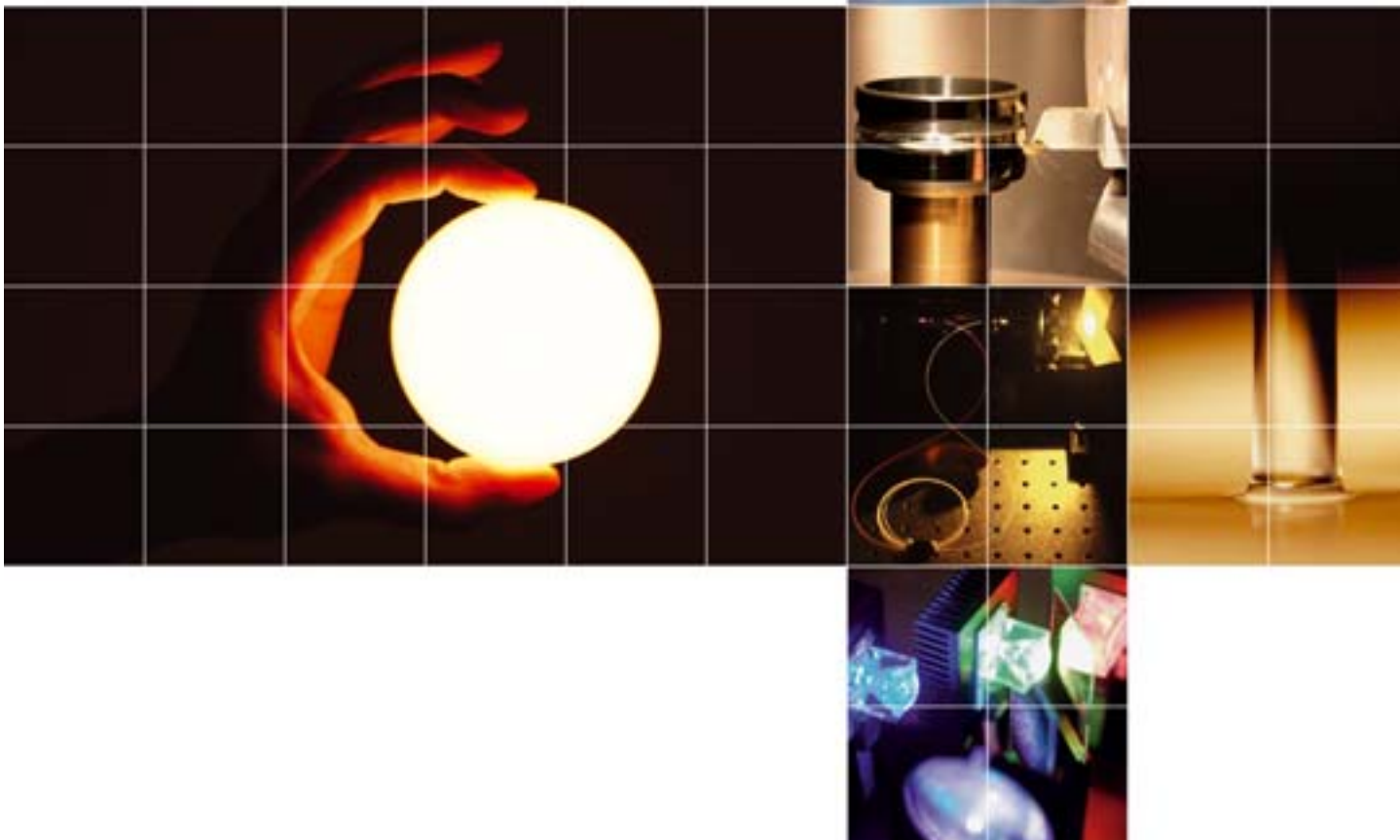




**Fraunhofer** Institut  
Angewandte Optik  
und Feinmechanik

# Jahresbericht Annual Report 2007

Tailored Light - Licht nach Maß



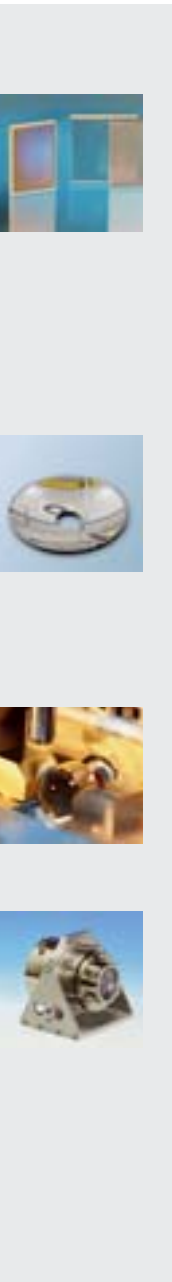


Jahresbericht 2007  
Fraunhofer-Institut  
für Angewandte Optik  
und Feinmechanik

Annual Report 2007  
Fraunhofer Institute  
for Applied Optics and  
Precision Engineering

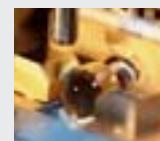
# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>Wichtige Ereignisse 2007</b>	<b>6</b>
Das Institut im Profil	12
Das Institut in Zahlen	22
Fraunhofer-Verbund Oberflächentechnik und Photonik	24
Die Fraunhofer-Gesellschaft	26
<b>Ausgewählte Ergebnisse 2007</b>	<b>29</b>
<b>Optische Komponenten</b>	<b>30</b>
Mikrooptik für LED-Lichtquellen	32
Diamantbearbeitung von ultrapräzisen Freiformen	38
Organische LED – Lichtauskopplung und Lichtmanagement	40
Chirped Microlens Arrays für die Homogenisierung kohärenter Strahlung	46
Computer Generierte Hologramme	48
fs-Laser geschriebene Faser-Bragg-Gitter für integrierte Faserlaser	50
Optische Mikroresonatoren	54
3D-Strukturierung von Lithiumniobat	58
<b>Multifunktionale optische Schichten</b>	<b>62</b>
Hochreflektierende EUV/Röntgen-Multilayerspiegel	64
Hochtemperatur LPP Kollektorspiegel für die EUV-Lithographie	72
Hochreflektierende Beschichtungen auf Kunststoffoptiken	74
Gesputterte Spiegelschichten für die Optik und Beleuchtungstechnik	76
Online-Fehlerkorrekturen bei der plasmagestützten Abscheidung von Interferenzschichtsystemen	78
Benetzungsanalyse an mikro- und nanostrukturierten Oberflächen	80
<b>Integrationsverfahren</b>	<b>82</b>
Solder Bumping – ein neues, flexibles AVT-Verfahren für optoelektronische Systeme	84
Justierdrehen – eine Schlüsseltechnologie für die Montage von Präzisionsobjektiven	92
Kompakte Pickup-Optik für mobile Blue-Ray-Datenspeicher – Montagekonzept	94
<b>Optomechanische Präzisionssysteme</b>	<b>96</b>
Chucks für EUV-Lithographie und AFM-Messtechnik	98
Echtzeit-Bildverarbeitung für den ultra-dünnen Bildsensor	100
ns-Faserlaser für die Mikromaterialbearbeitung	102
1 mJ Ultrakurzpuls-Faserverstärker hoher Leistung	104
Ein akkommodierendes opto-mechanisches Augenmodell zur Beschreibung von Laserimpulseinträgen in das Auge	108
Next-Generation Streulichtmesssysteme eröffnen neue Anwendungsfelder	110
Intraoraler 3D-Digitalisierer für CAD/CAM in der Zahnmedizin	116
Messsystem zur THz-Bildgebung mit Zeilendetektor	118
Prüflabor für Fingerprint-Sensoren	120
<b>Namen, Daten, Ereignisse</b>	<b>122</b>
<b>Patente</b>	<b>126</b>
<b>Wissenschaftliche Publikationen</b>	<b>128</b>
<b>Der Weg zu uns</b>	<b>139</b>



# Contents

<b>Preface</b>	<b>5</b>
<b>Highlights 2007</b>	<b>6</b>
<b>The Institute in Profile</b>	<b>12</b>
<b>The Institute in Figures</b>	<b>22</b>
<b>Fraunhofer Surface Technology and Photonics Alliance</b>	<b>24</b>
<b>The Fraunhofer-Gesellschaft</b>	<b>27</b>
<b>Selected Results 2007</b>	<b>29</b>
<b>Optical Components</b>	<b>30</b>
Microoptics for LED light sources	33
Single point diamond turning of freeform mirrors	39
Organic LED – light extraction and light management	41
Chirped microlens arrays for the homogenization of coherent radiation	47
Computer generated holograms	49
fs-laser written fiber Bragg gratings for integrated fiber lasers	51
Optical microresonators	55
3D structuring of lithium niobate	59
<b>Multi-functional Optical Coatings</b>	<b>62</b>
High-reflectance EUV/soft X-ray multilayer mirrors	65
High-temperature LPP collector mirror for EUV lithography	73
High reflective coatings for polymer optical components	75
Sputtered mirror coatings for optics and lighting technology	77
Plasma-ion assisted deposition of interference coatings with online error compensation	79
Wetting analysis on micro- and nanostructured surfaces	81
<b>Integration Technologies</b>	<b>82</b>
Solder Bumping – a new and flexible packaging technology for optoelectronic systems	85
Lens centering – key technology for the assembly of high precision optics	93
Compact pickup-optic for mobile blue-ray-data storage systems – assembly concept	95
<b>Opto-mechanical Precision Systems</b>	<b>96</b>
Chucks for EUV lithography and AFM analysis	99
Image processing for a thin compound-eye sensor	101
ns-fiber laser for micro-processing of materials	103
1 mJ ultra-short pulse fiber amplifier with high average power	105
An accommodating opto-mechanical eye model to describe the propagation of fs-laser pulses inside the eye	109
Next generation light scattering techniques enter new application areas	111
Intraoral 3D scanner for CAD/CAM in dentistry	117
THz imaging system with line detection	119
Test laboratory for fingerprint scanner	121
<b>Names, Dates, Activities</b>	<b>122</b>
<b>Patents</b>	<b>126</b>
<b>Scientific Publications</b>	<b>128</b>
<b>How to reach us</b>	<b>139</b>





## Jena – Stadt des Lichts

Entscheidungsträger aus Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft sprechen heute vom 21. Jahrhundert als dem Jahrhundert des Lichts. Obwohl die Optik alle Bereiche unseres Lebens durchdringt, ist sie im eigentlichen Sinne ein Wegbereiter („enabler“) und Katalysator für andere Wissenschaften. So nutzt fast jede wissenschaftliche und technische Disziplin heute Methoden der modernen Optik. Der Einsatz optischer/optoelektronischer Systeme in Technik und Medizin führt zu neuen Produkten, Verfahren und Prozessen, die sich durch höhere Umweltverträglichkeit, Qualität und Produktivität auszeichnen.

Die Kontrolle von Licht in allen seinen Eigenschaften wird daher eine bestimmende Rolle bei den Schlüsseltechnologien dieses Jahrhunderts spielen. Die Region Jena mit dem Cluster CoOptics – Cooperate in Optics – stellt sich dieser Aufgabe. Wissenschaft und Wirtschaft haben sich hier zusammengefunden, um unter Einsatz optischer Technologien innovative Produkte von morgen zu entwickeln.

Die Sichtbarkeit dieser erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft unter dem Bindeglied Optik dokumentiert eindrucksvoll die erfolgreiche Bewerbung der Stadt Jena im Rahmen des bundesweiten Wettbewerbs Stadt der Wissenschaften 2008.

Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und das Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität FSU-IAP sind mit ihren Kernkompetenzen im Bereich Photonenmanagement wichtige Partner im Cluster. Die Institute bilden die sogenannte photonische Kette in ihrer Gesamtheit ab; ausgehend von der fundamentalen Analyse der Propagation des Lichts erfolgt ein angepasstes Optik-System-Design bis hin zum Prototypenbau. Hierbei hat in den vergangenen Jahren die mikro- und nanostrukturierte Optik zunehmend an Bedeutung gewonnen, Laser- und Elektronenstrahlolithographie sind daher zu einem unverzichtbaren Werkzeug in beiden Einrichtungen geworden.

Die Forschungsarbeiten der beiden Institute auf dem Gebiet des Photonenmanagements bilden die Grundlage brillanter Halbleiterlichtquellen und Festkörperlaser höchster Leistung. Wichtige Beiträge konnten beispielsweise im Photonenmanagement von neuartigen Leuchtdioden geleistet werden, die heute in dem LED-Modul OSTAR® von OSRAM Opto Semiconductors Anwendung finden. Für die Entwicklung dieses Produktes wurde das Forscherteam, bestehend aus Wissenschaftlern des Fraunhofer IOF und OSRAM Opto Semiconductors mit dem Deutschen Zukunftspreis 2007, dem Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation, ausgezeichnet.

Ein zutreffendes Photonenmanagement in dotierten Lichtwellenleitern durch aktive spektrale und temporale Pulsformung ermöglichte den Instituten die Realisierung des derzeit leistungsstärksten Ultrakurzpulslasers – ein Meilenstein in der Entwicklung derartiger Systeme, wie die internationale wissenschaftliche Community bescheinigt. Nicht nur Lichtquellen, auch Photodetektoren oder Solarzellen können durch geeignetes Photonenmanagement in ihrer Effizienz optimiert werden. Forschergruppen von IOF und FSU-IAP konnten sogenannte Lichtkonzentratoren und spezielle Absorberstrukturen entwickeln, die eine Steigerung des Wirkungsgrades ermöglichten. Entwicklungsprojekte wie diese belegen eindrucksvoll die Bedeutung optischer Technologien für die Zukunft. IOF und FSU-IAP nehmen mit ihren Partnern die zukünftigen Herausforderungen an.

Mein besonderer Respekt, meine Anerkennung und mein Dank gelten meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihre hervorragenden Leistungen und ihr persönliches Engagement. Mein Dank gilt aber auch unseren Partnern in Wissenschaft und Wirtschaft für die gute Zusammenarbeit sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, dem Freistaat Thüringen, der Deutschen Forschungsgemeinschaft und weiteren Stiftungen und Verbänden für ihre stete Unterstützung.

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

## Jena – City of Light

Decision makers from the worlds of science, industry and society are already calling the 21<sup>st</sup> Century the Century of Light.

Although optics penetrates every area of our lives, in the strictest sense it is really an enabler and catalyst for other strands of science, and almost every scientific and technical discipline makes extensive use of modern optics. The use of optical/opto-electronic systems in engineering and medicine is bringing about new products, methods and processes that combine environmental compatibility with outstanding quality and productivity.

There is little doubt that controlling light and all its properties will play a decisive role in the key technologies of this century. Through the CoOptics – Cooperate in Optics – cluster, the Jena region is meeting this challenge head on. The scientific and business communities have got together to use optical technologies to develop the innovative products of tomorrow. The high profile of this successful collaboration between science and business, based on a common interest in optics, is impressively demonstrated by Jena's successful bid in the national competition to find Germany's City of Science 2008.

The Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF and the Institute of Applied Physics at Friedrich Schiller University FSU-IAP are important partners in the cluster, with their core expertise in the area of photon management. The two institutes cover the entirety of the so-called photonic chain – starting with fundamental analysis of the propagation of light and moving on to an adapted optical system design

and ultimately production of a prototype. In recent years, optics involving micro and nanotechnology has become increasingly important, making laser and electron beam lithography an indispensable tool for both organizations.

The two institutes' research work in the field of photon management underpins brilliant semiconductor light sources and high-powered solid state lasers. For example, they have made vital contributions in photon management for the brand new LEDs that are now used in the OSTAR® LED module from OSRAM Opto Semiconductors. The research team, made up of scientists from Fraunhofer IOF and OSRAM Opto Semiconductors, was awarded the German Future Prize 2007 for the development of this product, an award for technology and innovation presented by the German Federal President.

Appropriate photon management in doped optical fibers using active spectral and temporal pulse shaping enabled the institutes to create what is currently the most powerful ultra-short pulse laser – a milestone in the development of these systems that has been acknowledged by the international scientific community. As well as light sources, light sensors and solar cells can also use targeted photon management to optimize their efficiency. Research teams from IOF and FSU-IAP have managed to develop so-called light concentrators and special absorber structures that allow the efficiency to be enhanced. Development projects such as these are impressive evidence of the importance of optical technologies for the future. IOF and FSU-IAP are working with their partners to tackle the challenges that the future will bring.

I would like to express my great respect, appreciation and thanks to my employees for their outstanding work and their personal dedication. But I also want to thank our partners from science and industry for their excellent co-operation, as well as the German federal ministry of education and research, the Free State of Thuringia, the German Research Foundation and other trusts and associations for their continuous support.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann

## Highlights 2007



### Deutscher Zukunftspreis 2007

Am 6. Dezember 2007 wurde der Deutsche Zukunftspreis, der Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation, zum elften Mal verliehen.

Die Freude war groß und die Überraschung perfekt, als nach der Vorstellung der vier nominierten Projekte im Berliner Kongresszentrum die Entscheidung der Jury bekannt gegeben wurde und Moderatorin Maybrit Illner die Herren Dr. Klaus Streubel und Dr. Stefan Illek von der OSRAM Opto Semiconductors GmbH sowie Dr. Andreas Bräuer vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF auf die Bühne bat.

Für ihr Projekt »Licht aus Kristallen – Leuchtdioden erobern unseren Alltag« erhielten sie aus den Händen des Bundespräsidenten Horst Köhler den mit 250 Tausend Euro dotierten Preis.

Der Preis ist Ergebnis einer erfolgreichen Zusammenarbeit, die durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde.

Resultat der Entwicklungsarbeit ist eine leistungsfähige LED-Lichtquelle mit dem Potenzial, die Domäne konventioneller Lichtquellen zu erobern.

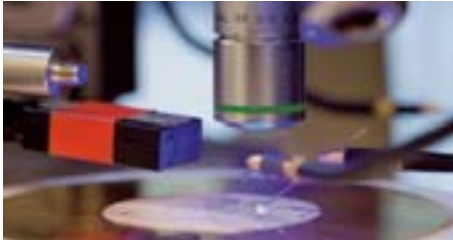
Grundlage ist eine neue, bei OSRAM OS entwickelte Dünnschichttechnologie zur Herstellung der LED-Chips. Zwischen Substrat und Licht emittierendem Halbleiter wird eine strukturierte Metallschicht aufgebracht, die als Spiegel fungiert und dafür sorgt, dass das Licht nur in einen Halbraum abgestrahlt wird. Ein speziell für die Dünnschichttechnologie entwickeltes Gehäuse ermöglicht das Nebeneinanderpacken vieler LED-Chips unterschiedlicher Farbe und sorgt für die Ableitung der in den Chips erzeugten Wärme. Durch Mischen des Lichts ist jeder beliebige Farbton einstellbar. Am Fraunhofer IOF wurde eine aus zwei Komponenten bestehende Optik entwickelt, die das Licht maximal nutzt, formt und in die gewünschte Richtung lenkt.

Möglich war die Innovation durch die Leistungen der Forscherteams hinter den Ausgezeichneten.



Die Preisträger mit Bundespräsident Horst Köhler (v. l. n. r.):  
Dr. Klaus Streubel, OSRAM Opto Semiconductors GmbH;  
Dr. Stefan Illek, OSRAM Opto Semiconductors GmbH;  
Dr. Andreas Bräuer, Fraunhofer IOF.





On December 6, 2007, the German Federal President's award for technology and innovation, was presented for the eleventh time.

There was a sense of huge excitement and anticipation as the four nominated projects were presented at the Berlin Congress Centre and the final decision of the jury was announced, as hostess Maybrit Illner invited Dr. Klaus Streubel and Dr. Stefan Illek from OSRAM Opto Semiconductors GmbH and Dr. Andreas Bräuer from the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF onto the stage.

In recognition of their project "Light from crystals – LEDs take over our day-to-day lives", they received the prize from Federal President Horst Köhler, along with the check for Euro 250,000.

The prize is the result of successful co-operation supported by the German federal ministry of education and research.

The outcome of the development work is a high-power LED light source with the potential to take over the territory currently dominated by conventional sources.

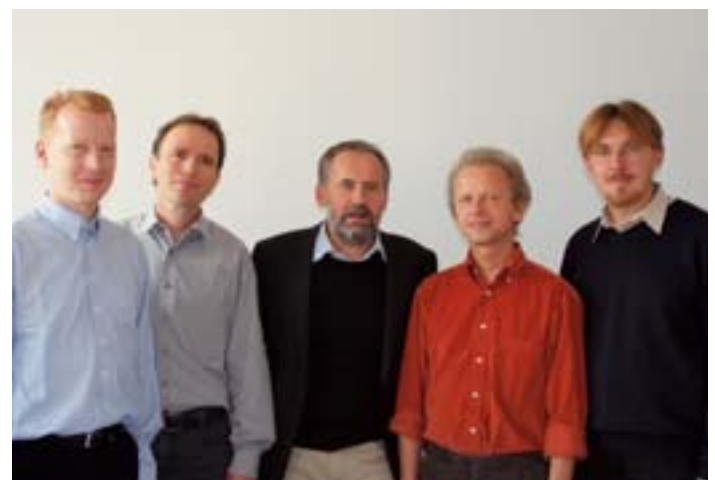
It is based on a new thin film technology developed by OSRAM OS for manufacturing LED chips. A structured metal film is inserted between the substrate and the light emitting semiconductor, which acts as a mirror and ensures that the light is only emitted in one half-space. A special package technology developed for thin film technology allows a large number of different colored LED chips to be packed closely together and dissipates the heat generated in the chips. Any color can be created by mixing the light. Fraunhofer IOF developed a two-component optical system that fully utilizes the light, shapes it and deflects it in the desired direction.

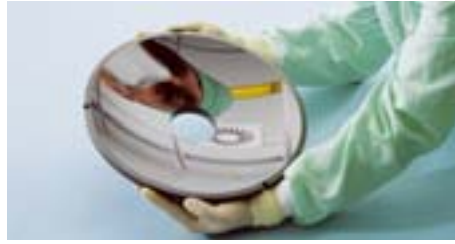
The innovation was made possible by the efforts and dedication of the teams of researchers behind the award winners.

---

### German Future Prize 2007

Das Team am Fraunhofer IOF (v. l. n. r.):  
Dr. Uwe Detlef Zeitner, Dr. Peter Dannberg,  
Dr. Andreas Bräuer, Dr. Peter Schreiber und  
Dr. Sergey Kudaev.





---

## Thüringer Forschungspreis Thuringia Research Prize

Der Thüringer Forschungspreis 2007 in der Kategorie Angewandte Forschung geht an Dr. Thomas Peschel, Tino Benkenstein, Dr. Torsten Feigl, Christoph Damm, Dr. Sergiy Yulin, Sven Schröder und Dr. Uwe D. Zeitner für die Entwicklung von Komponenten und Systemen für die EUV-Lithographie bei 13,5 nm. Das interdisziplinäre Forscherteam hat spezielle Beschichtungsverfahren für Kollektorspiegel, Messverfahren zu deren Charakterisierung sowie hochpräzise Füge- und Montageverfahren entwickelt. Ergebnis des Projektes ist der Prototyp eines Labor-Resistbelichters für die EUV-Lithographie bei 13,5 nm. Herzstück des Gerätes ist ein beugungsbegrenztes EUV-Schwarzschild-Objektiv.

The Thuringia Research Award 2007 in the category of Applied Research goes to Dr. Thomas Peschel, Tino Benkenstein, Dr. Torsten Feigl, Christoph Damm, Dr. Sergiy Yulin, Sven Schröder and Dr. Uwe D. Zeitner for the development of components and systems for the EUV lithography at 13.5 nm. The interdisciplinary team of researchers developed special coating methods for collector mirrors, measuring methods for their characterization and high-precision joining and assembly methods. The result of the project is the prototype of a laboratory resist exposer for EUV lithography at 13.5 nm. The nucleus of this device is a diffraction-limited EUV Schwarzschild objective.

---

## onCOOPTics

Am 19. April wurde mit der Übergabe des Förderbescheids durch das BMBF der Startschuss für das Verbundprojekt »onCOOPTics – Hochintensitätslaser für die Radioonkologie« gegeben. Im Rahmen des BMBF-Programms »Unternehmen Region« werden insgesamt 11,5 Mio. Euro für fünf Jahre zur Verfügung gestellt. Das europaweit einmalige Projekt soll Hochleistungslaser weiterentwickeln, um eine neue Qualität bei der Krebsbestrahlung zu erreichen. Es greift dabei auf die Expertise auf dem Gebiet der Laserphysik im Zentrum für Innovationskompetenz (ZIK) »ultra optics« an der Universität Jena und das Know-how auf dem Gebiet der medizinischen Strahlentherapie im ZIK »OncoRay« an der TU Dresden zurück, die in der neuen Initiative »onCOOPTics« zusammengeführt werden.

The starting shot for the joint project "onCOOPTics – High-intensity lasers for radio-oncology" was fired on April 19 with the presentation of the subsidization approval by the German federal ministry of education and research. In the course of the ministry's program "Enterprise Region" a total of 11.5 million Euros were provided for 5 years. This project which is unique in Europe is to develop high-intensity lasers further to achieve a new quality in cancer radiation treatment. It makes use of the existing expertise in the field of laser physics in the "ultra optics" Center for Innovation Competence (CIC) at the University of Jena and the know-how in the field of medical radiation therapy in the "OncoRay" CIC at the University of Dresden which are combined in the new "onCOOPTics" initiative.



Unter der Überschrift »Präzisions-systeme für Optik und Mechanik aus Jena« präsentierte das Fraunhofer IOF neue technologische Entwicklungen für innovative optische Systeme, von Mikrostrukturierungssystemen, über THz-Messsysteme bis hin zu opto-mechanischen Baugruppen für Welt-raumanwendungen. Die Entwicklungen betreffen die gesamte Prozesskette vom Design über Fertigungsverfahren bis hin zur Systemintegration und zum Bau von Prototypen. Besonderes Interesse fanden fasergekoppelte Lasermodule und lasergespleißte Optiken auf der Basis innovativer Füge- und Montage-verfahren. Neuheitswert hatte ein industrienahes THz-System für die Vermessung von Prüflingen aus Kunst-stoff. Die Erzeugung der THz-Strahlung mittels Ultrakurzpuls-Faserlaser macht das System sehr robust und kompakt.

Große Resonanz fand der im Forum der Messe veranstaltete Workshop zum Thema Festkörperlaser. Mehr als 400 Interessenten besuchten die Vorträge. Vertreter führender Laser-Hersteller wie TRUMPF Laser GmbH, Rofin-Sinar Laser GmbH, JENOPTIK Laser Solution GmbH, IPG Photonics Corporation, Spectra Physics und SPI Lasers Ltd sowie Anwender von Laser-technologien wie die ThyssenKrupp Steel AG und die SITEC Industrietechnologie GmbH informierten über neueste Entwicklungen und Trends. Zum Abschluss des Workshops gab es eine Standparty mit Thüringer Bratwurst, Bier und Musik, die reichlich für weiter-führende Diskussionen genutzt wurde.

Under the title "Precision Systems for Optics and Mechanics from Jena" the Fraunhofer IOF is presenting new technological developments for innovative optical systems, from microstructuring systems and THz measuring systems to complex opto-mechanical modules for aerospace applications. The developments concern the entire process chain from design, through production processes to system integration and building of prototypes. Special interest was attracted by fiber-linked laser modules and laser-spliced optics based on innovative joining and assembly methods. Also a novelty was a close-to-industry THz system for measuring plastic samples. Thanks to the use of an ultra-short pulse fiber laser for generating the THz radiation, the system is very robust and compact.

The workshop on the subject of solid state lasers staged in the forum of the fair aroused great interest. More than 400 visitors attended the lectures. Representatives of leading manufacturers such as TRUMPF Laser GmbH, Rofin-Sinar Laser GmbH, JENOPTIK Laser Solution GmbH, IPG Photonics Corporation, Spectra Physics and SPI Lasers Ltd as well as users of laser technologies such as ThyssenKrupp Steel AG and SITEC Industrietechnologie GmbH informed about the latest developments and trends. After the workshop there was a booth party with grilled sausages, beer and music from Thuringia which provided ample opportunity for further discussion.

---

## Laser.World of Photonics 2007

---

## Workshop



## Lange Nacht der Wissenschaften Long Night of Sciences

Auftakt für Jena als Stadt der Wissenschaften 2008 war die Lange Nacht der Wissenschaften am 16. November 2007. Der Zuspruch war außerordentlich hoch, es wurden mehr als 10 000 Eintrittskarten verkauft (Jena hat ca. 100 000 Einwohner), dementsprechend frequentiert war auch das Fraunhofer IOF. Schon von Weitem wurden die Besucher vom IOF-Film »Tailored Light – Licht nach Maß«, der an die Außenwand des Instituts projiziert wurde, angelockt.

Im IOF drehte sich alles um Licht. In Experimenten und kurzweiligen Vorträgen wurden Gesetzmäßigkeiten der Lichtausbreitung sowie Effekte rund um das Licht und seine Wirkungen erhellte. Es wurde demonstriert, wie Archimedes mittels Hohlspiegel die römische Flotte vor Syracus in Brand gesetzt haben soll oder wie Fußspuren mit Hilfe eines handgeführten 3D-Scanners hochgenau reproduziert werden können. Eine 6 m<sup>2</sup> große Weltkarte mit hoher Auflösung wurde mittels eines 1 cm<sup>2</sup> großen computergenerierten Hologramms an eine Wand projiziert und die Brille, die dank eines am IOF entwickelten Verfahrens nicht mehr beschlägt, wurde gezeigt.

Besondere Attraktion, die Groß und Klein in ihren Bann zog, war die Ausstellung Spiegelwelten. In 14 Spiegel-exponaten konnten die Besucher die vielfältigen Wirkungen des Reflexionsgesetzes erkunden. Dazu wurde in einem kurzweiligen Vortrag über Spiegel in der Bronzezeit und die Rolle des Spiegels in der Kunst informiert.

The kick-off for Jena as the City of Sciences 2008 was the Long Night of Sciences on November 16, 2007. The reception was extraordinarily good, more than 10,000 tickets were sold (Jena has a population of 100,000) and the Fraunhofer IOF on the Beutenberg campus was also highly frequented. Visitors were attracted from afar by the IOF film "Tailored Light – Licht nach Maß" projected onto the outside wall of the institute.

The IOF presentation was concerned exclusively with light. The laws of light propagation as well as the effects to do with light and its influences were elucidated in experiments and entertaining lectures. It was demonstrated how Archimedes is supposed to have set fire to the Roman fleet off Syracuse using concave mirrors or how footprints can be reproduced with high accuracy with the aid of a hand-held 3D scanner. A map of the world measuring approximately 6 square meters was projected onto the wall by a 1 cm<sup>2</sup> computer-generated hologram and the glasses which no longer mist over thanks to a surface refining method developed at the IOF were shown.

A special attraction which fascinated old and young alike was the Mirrored Worlds exhibition. Visitors were able to study the many effects of the law of reflection in 14 mirror exhibits. Listeners were also informed about mirrors in the Bronze Age and the role of the mirror in Art in an interesting lecture.



Der Innovationstag Thüringen findet jährlich auf der Messe Erfurt statt. Hier präsentieren Thüringer Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Vorträgen, Podiumsdiskussionen und mit Exponaten neueste Forschungs- und Entwicklungsergebnisse. Erstmals wurde in diesem Jahr die Zielgruppe Schüler und Studenten besonders angesprochen, um sie für Technik und Innovation zu interessieren. Fraunhofer IOF und IDMT haben die Idee aufgegriffen und Entwicklungen vorgestellt, die für ein jüngeres Publikum interessant und spannend sind, wie einen Computer, der Musik erkennt, die man ihm vorsingt, einen ultra-dünnen optischen Sensor nach dem Prinzip des Insektenauges, ein optisches Mikrofon oder hocheffiziente LED-Lichtquellen.

Zum nunmehr 4. Alumni-Treffen waren wieder zahlreiche ehemalige Mitarbeiter angereist, die sich über neue Entwicklungen an IOF und IAP informierten. Thema des Workshops war Faserlaser. Wie in den vergangenen Jahren wurden Arbeiten aus IOF und IAP zum Thema vorgestellt und ein »Ehemaliger«, in diesem Fall Dr. Matthias Jäger von der JENOPTIK L.O.S. GmbH, berichtete über Aktivitäten seines Unternehmens in dem Geschäftsfeld.

Als Sieger 2006 war das IOF Ausrichter des Turniers 2007. Bei herrlichem Wetter fand das bestens organisierte Turnier auf den Plätzen des Universitätssportvereins statt. Sieger wurde die Mannschaft des IWU Chemnitz.

The Innovation Day in Thuringia at which the Thuringia Innovation Prize is also awarded is held annually at the Erfurt Fair. Here, companies and research institutes from Thuringia present the latest research and development results in lectures, podium discussions and exhibits. This year schoolchildren and students were addressed as a target group for the first time to get them interested in technology and innovation. The Fraunhofer IOF and IDMT came up with the idea of presenting development results which are interesting and exciting for younger visitors such as a computer which recognizes music sung to it, an ultra-thin optical sensor on the principle of the insect eye, an optical microphone or highly efficient LED light sources.

Numerous former employees traveled to the 4<sup>th</sup> Alumni Convention which informed about new developments at IOF and IAP. The subject of the workshop was fiber lasers. As in the past, research results from IOF and IAP were presented on the subject and a "former employee", in this case Dr. Matthias Jäger from JENOPTIK L.O.S. GmbH, reported on the activities of his company in this field of business.

As the winner in 2006, IOF was the organizer of the 2007 tournament. The excellently organized tournament took place in brilliant weather on the pitches of the University Sports Club. The winner was IWU Chemnitz.

---

### Innovationstag Thüringen Innovation Day in Thuringia

---

### Alumi-Treffen Alumni Convention

---

### Fraunhofer-Fußballpokal Fraunhofer Soccer Cup

## The Institute in Profile

### Kurzporträt Short Portrait

»Tailored Light – Licht nach Maß«  
Die immer bessere Kontrolle von Licht ist Ziel der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit am Fraunhofer IOF und Grundlage zur Darstellung neuer innovativer optischer Systeme.

Schwerpunkte der anwendungsorientierten Forschungsarbeit sind:

- multifunktionale optische Schichtsysteme
- Mikro- und Nanostrukturtechnik für die Optik
- Schicht- und Oberflächencharakterisierung
- mikrooptische Systeme, Wellenleiteroptik
- Faserlaser und ihre Anwendung
- optische Messsysteme und Sensoren
- Systeme zur Optik-Charakterisierung
- opto-mechanische Präzisionssysteme
- Verfahren der Optikmontage.

Zentrale Kompetenz ist das Optik- und Mechanik-Design. Hervorzuheben ist die Kombination von Expertise auf den Gebieten Optik und Präzisionsmechanik.

“Tailored Light – Licht nach Maß“  
The aim of research and development at Fraunhofer IOF is controlling light better and better. It is the basis for the presentation of new innovative optical systems.

Focus of the application-oriented research is put on the following fields:

- multi-functional optical coatings
- micro- and nano-structure technology for optics
- characterizing of surfaces and coatings
- micro-optical systems, beam guiding optics
- fiber lasers and their application
- optical measurement systems and sensors
- systems for optics-characterization
- opto-mechanical precision systems
- procedures of optics assembly.

Central competence is optics and mechanics design. The combination of competences in optics and precision-mechanics is to be pointed out.

### Anbindung an die FSU Jena Connection to the FSU Jena

Das IOF arbeitet auf der Basis des 2003 geschlossenen Kooperationsvertrages eng mit dem Institut für Angewandte Physik (IAP) der FSU zusammen. Von strategischer Bedeutung ist die Zusammenarbeit im Innovationscluster JOIN.

Die Forschungsfelder am IAP sind:

- Mikrostrukturtechnik
- Mikro- und Nanooptik
- Integrierte Optik
- Ultraschnelle Optik
- Faser- und Wellenleiteroptik.

Vorteile der engen Kooperation:

- praxisnahe Ausbildung der Studenten
- bessere Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis
- gemeinsame Nutzung der hochwertigen Geräteausstattung und Infrastrukturen.

The IOF cooperates with the Institute of Applied Physics (IAP) of the FSU on the basis of the cooperation contract closed in 2003. The cooperation within the innovation cluster JOIN is of strategic importance.

Main topics of research at IAP are:

- microstructure technology
- micro- and nano-optics
- integrated optics
- ultra fast optics
- fiber- and waveguide optics.

Advantages of the close cooperation:

- practical education of students
- better implementation of scientific results in practice
- collective use of the high-value equipment
- collective use of the infrastructure.

Das Institut verfügt über exzellent ausgestattete 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 sowie eine Mechanik-Werkstatt.

The institute has 2550 m<sup>2</sup> of state of the art laboratories, including 860 m<sup>2</sup> of class 10,000 to class 10 clean room facilities and an outstandingly equipped mechanical workshop.

## Besondere technische Ausstattung Special Technical Equipment

### Beschichtungstechnik für den EUV- bis NIR-Spektralbereich

- Sputteranlagen
- Hochvakuumbedampfungsanlagen
- Mikrogalvanik

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

- Sputtering technologies
- High vacuum evaporation
- Micro-electroplating

### Mikro- und Nanostrukturtechnik

- Photolithographieanlage
- Laserstrahl-Lithographieanlage
- Elektronenstrahl-Lithographieanlage

### Micro- and nano- structuring

- Photolithography
- Laser beam lithography
- Electron beam lithography

### Mikrooptik-Technologie

- Anlagen zum reaktiven Ionenätzen
- Plasma-Trockenätzanlage
- Polymer- und Glaspräganlage
- Mask-Aligner

### Micro-optics technologies

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

### Ultrapräzisionsbearbeitung

- Ultrapräzisions-Drehmaschinen
- Ultrapräzisions-Fräsmaschine
- Fast/slow tool servo
- CNC-Mehrfachfräsmaschine
- 5-Achs-Mikrobearbeitungszentren

### Ultra-precision machining

- Ultra-precision turning lathe
- Ultra-precision freeform machine
- Fast/slow tool servo
- CNC multi milling machine
- 5-axis micro machining centers

### Integration, Mikromontage und Handling von Mikrobauteilen

- Dosiersysteme für Klebstoffe
- Laserstrahllötanlage
- Mikromontagesysteme
- Positionier- und Justiersysteme

### Integration, micro-assembly and handling of micro-components

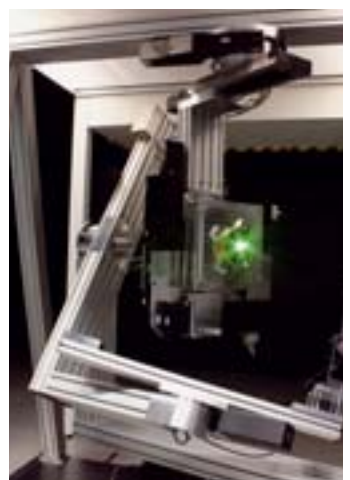
- Dispensing systems for adhesive
- Laser beam soldering
- Micro-assembly systems
- Positioning and alignment systems

### Messtechnik

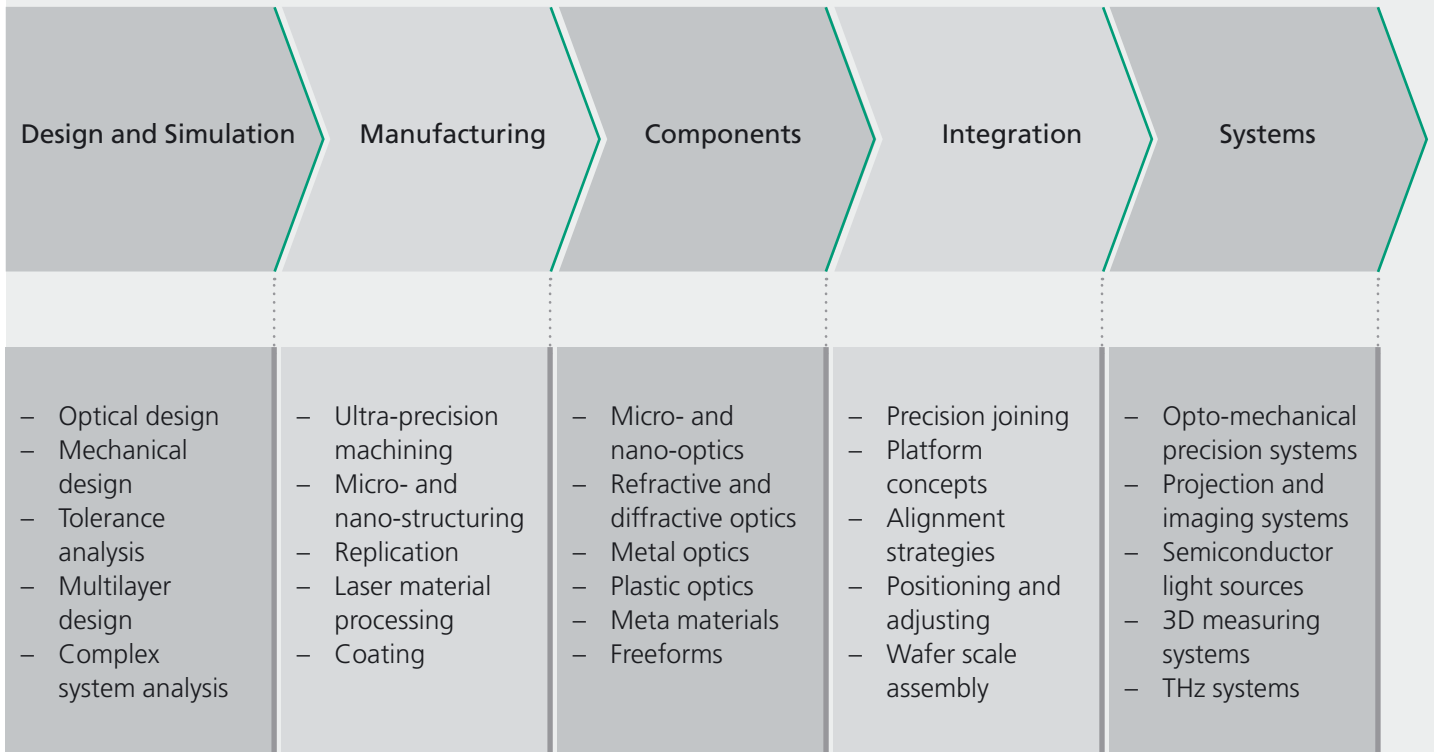
- Streulichtmesssysteme
- Spektralphotometer (120 nm–50 µm)
- Röntgendiffraktometer
- Röntgenreflektometer
- Rasterkraftmikroskop
- Elektronenmikroskop
- Laserscanningmikroskop
- Freiformmesssystem UA3P
- Messsysteme zur 3D-Formerfassung
- Verfahren zur Optik-Charakterisierung
- Test von Lebensdauer und Haftfestigkeit optischer Schichten
- Klimaprüfung

### Measurement technologies

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



Optical Systems Technology



Markets

Information and Communication	Mobility and Transport	Illumination
Aerospace and Astronomy	Safety and Security	Production
Energy and Pollution conservation	Life sciences and Health care	Basic research



## Anwendungen

### Freiformoptik

- Beleuchtung/Abbildung

Mit einer Feinstruktur von  $\pm 200 \mu\text{m}$  versehene diamantgedrehte Freiformspiegel erlauben die Erzeugung beliebiger Leuchtdichteverteilungen. Als Lichtquelle dienen Hochleistungs-LEDs.

### Unterdruck-Chuck

- Messtechnik

Der Chuck für den Einsatz in einem AFM ist aus Glaskeramik (thermische Ausdehnung  $2 \cdot 10^{-8} \text{K}^{-1}$ ) gefertigt. Durch zonale Mikrostrukturierung der Oberfläche ist der Chuck für Wafergrößen von 1" bis 12" einsetzbar.

### ns-Faserlasersystem

- Materialbearbeitung

Ein gütegeschalteter Resonator mit mikrostrukturierter photonischer Doppelkernfaser liefert 15 ns Pulse mit einer Energie von 0,5 mJ. Damit ist das System für die Mikromaterialbearbeitung einsetzbar.

### Intraoraler 3D-Digitalisierer

- Zahnmedizin

Der intraorale Scanner erlaubt die Vermessung der Zahnoberflächen des gesamten Gebissbogens im Mund des Patienten. Aus den gewonnenen Messdaten kann der Zahnersatz direkt hergestellt werden.

### Justierdrehen

- Produktion

Entscheidend für die Qualität von Präzisionsobjektiven sind Zentrierung und Positionierung der Objektivlinsen. Justierdrehen ist eine Schlüsseltechnologie für die Montage derartiger Objektive.

## Applications

### Free form optics

- Illumination/imaging

The generation of arbitrary illuminance distributions is achieved by diamond turned free form mirrors with fine structure of  $\pm 200 \mu\text{m}$ . High power LEDs are used as light source.

### Vacuum chuck

- Measurement technique

The chuck was manufactured from a glass ceramic material (thermal expansion  $2 \cdot 10^{-8} \text{K}^{-1}$ ) for application in an AFM. Due to zonal surface structuring the chuck may be used for wafers from 1 up to 12 inch diameter.

### ns fiber laser system

- Material treatment

A q-switched resonance cavity with a micro-structured double clad photonic crystal fiber provides 15 ns pulses with pulse energy of 0.5 mJ. The laser system is applicable for micro-processing of materials.

### Intraoral 3D scanner

- Dentistry

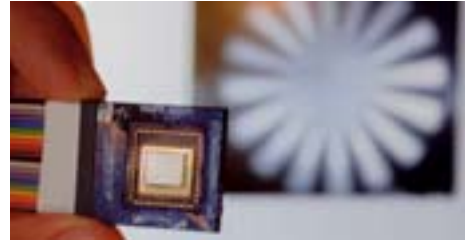
The intraoral scanner allows the measurement of the dental surface of the complete tooth arch in the patient's mouth. The production of the prosthesis can be performed directly using the measurement data.

### Lens centering

- Production

The quality of high precision optics strongly depends on centering and positioning of the lenses. Lens centering is a key technology for the assembly of such optics.





**Fraunhofer-Innovationscluster  
Optische Technologien JOIN**

**Fraunhofer Innovation Cluster  
Optical Technologies JOIN**

Der Optikstandort Jena ist im internationalen Vergleich ein wesentliches Zentrum der modernen Optik. Mehr als 150 Unternehmen der Region arbeiten auf dem Gebiet Optik, der Umsatz lag 2006 bei 2 Mrd. Euro und die Exportquote betrug 60 %. Es gibt eine Vielzahl von Hochschulen und außer-universitären Forschungseinrichtungen, die auf dem Gebiet der Optik arbeiten.

Today, the optics location Jena is an important center of modern optics in an international comparison. More than 150 companies in the region work in the field of optics, sales in 2006 amounted to approximately 2 billion Euros and the export figure was 60 %. There are a number of universities and independent research facilities working in the field of optics.

1999 entstand mit dem Netzwerk OptoNet eine Plattform für Austausch und Kooperation. Darauf aufbauend wurde 2006 der Innovationscluster JOIN mit dem Fokus vorwettbewerbliche Forschung im Feld Optik für Volumenmärkte gegründet. Hauptpartner sind die Friedrich-Schiller-Universität und die Unternehmen Carl Zeiss, JENOPTIK, Vistec Electron Beam, aber auch eine Vielzahl kleinerer Unternehmen.

In 1999 the OptoNet network was created as a platform for exchange of ideas and cooperation. The JOIN innovation cluster with the focus on pre-competitive research in the field of optics for volume markets was founded based on this in 2006. The main partners are the Friedrich Schiller University and the companies Carl Zeiss, JENOPTIK, Vistec Electron Beam but also a number of smaller companies.

Resultat eines gemeinsamen Strategieprozesses war die Definition von Technologieplattformen und Leitprojekten für JOIN.

The result of a common strategy process was the definition of technology platforms and guideline projects for JOIN.

**Technologieplattformen:**

- Mikro- und Nanostrukturtechnik
- Ultrapräzisionsbearbeitung
- Aufbau- und Verbindungstechnik

**Technology platforms:**

- Micro and nano structuring
- Ultra-precision machining
- Packaging and joining technology

**Leitprojekte:**

- Bioinspirierte mikrooptische Systeme
- Miniaturisierte Digitalprojektion
- Mess- und Prüfsysteme

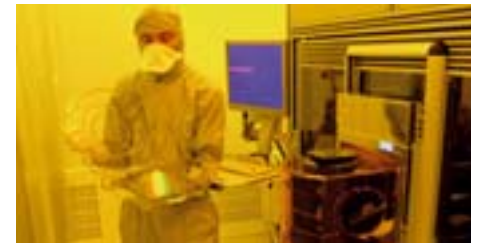
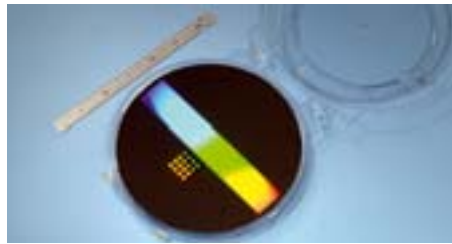
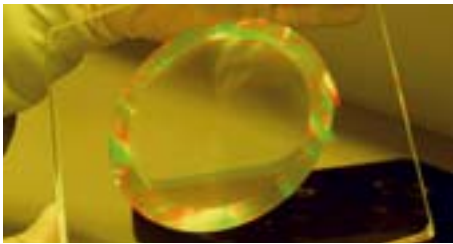
**Guideline projects:**

- Bio-inspired micro-optic systems
- Miniaturized digital projection
- Measuring and test systems

Erste Ergebnisse wurden am 4. September 2007 auf dem FhG-Symposium »Beschleunigte Innovation mit regionalen und industrienahen Forschungsclustern« in Berlin vorgestellt.

The first results were presented in Berlin on September 4, 2007 at the FhG-symposium "Accelerated Innovation with Regional and Industry Related Research Clusters".





Das Anfang 2006 am Fraunhofer IOF eingerichtete Center for Advanced Micro- and Nano-Optics hat einen weiteren wichtigen Schritt in Bezug auf die Kundenorientierung vollzogen.

Im Verlauf des Jahres 2007 konnte erfolgreich ein Qualitätsmanagementsystem für diese Technologieplattform eingeführt und gemäß DIN EN ISO 9001 : 2000 zertifiziert werden. Der Geltungsbereich der Zertifizierung betrifft den Kernprozess »Herstellung von mikro- und nanostrukturierter Optik, basierend auf Elektronenstrahl-lithographie sowie zugehörige Mikrostrukturierungsprozesse«.

Herzstück des CMN-Optics ist eine moderne Elektronenstrahl-lithographie-anlage vom Typ Vistec SB350 OS. Damit ist die Erzeugung kleinster Strukturen mit hoher Schreibgeschwindigkeit und bis zu 50 nm Auflösung möglich. Die Maschine bietet exzellente Parameter hinsichtlich Positionier- und Wiederholgenauigkeit beim Schreibprozess auf Substraten mit bis zu 300 mm Ausdehnung.

Anwendung findet diese Technologie u. a. bei der Herstellung dielektrischer Gitter für die Pulskompression, computergenerierter Hologramme für die Asphärenprüfung, Fresnellinsen, strukturierter Polarisatoren oder künstlich doppelbrechender Elemente.

The Center for Advanced Micro- and Nano-Optics which has been installed at the Fraunhofer IOF in the beginning of 2006 has performed an additional step towards the improvement of its customer orientation.

During the year 2007 a quality management system has been successfully installed for this technology platform and was certified according to DIN EN ISO 9001 : 2000. The certificate is valid for the core process "Fabrication of micro- and nano-structured optics, based upon electron beam lithography, and associated micro-structuring processes."

The heart of the CMN-Optics is a modern electron beam lithography system Vistec SB350 OS. It is capable to realize smallest structures with high writing speed up to a resolution of 50 nm. The machine offers excellent parameters with respect to positioning accuracy and repeatability during the writing process on substrates with up to 300 mm extension.

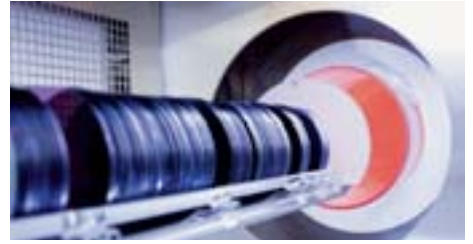
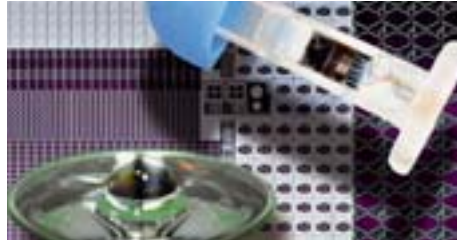
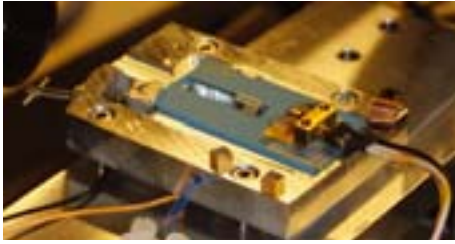
Applications of this technology are amongst others the fabrication of dielectric gratings for pulse compression, computer-generated holograms for asphere testing, Fresnel-lenses, structured polarizers or elements showing artificial birefringence.

## Center for Advanced Micro- and Nano-Optics CMN-Optics



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





**amos Applikationszentrum  
amos Application Center**



[www.amos-solution.de](http://www.amos-solution.de)

Das Fraunhofer IOF und das CiS Institut für Mikrosensorik in Erfurt gründeten 2007 das Applikationszentrum Mikrooptische Systeme »amos«. Es ist eines von bundesweit vier Zentren der Mikrosystemtechnik, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert und vom VDI/VDE-IT fachlich betreut werden.

Das Zentrum amos basiert auf den technologischen Ressourcen der beiden FuE-Partner und bietet anwendungsnahe Entwicklungsleistungen basierend auf Spitzentechnologien an. Schwerpunkt sind mikrooptische und mikrosensorische Fragestellungen.

Das Leistungsspektrum beinhaltet:

- Design und Simulation von Produktkonzepten,
- Produktentwicklung vom Design bis zur Fertigung aus einer Hand,
- Fertigungsgerechte Prozessentwicklung und Technologietransfer,
- Marktanalysen, Entwicklungsberatung und Machbarkeitsstudien.

Das amos-Technologieangebot wird durch eine breite Palette an FuE-Dienstleistungen ergänzt.

Derzeit werden mehrere Projekte mit namhaften Industriepartnern durchgeführt. Dabei steht die Verknüpfung von Mikrosystemtechnik mit Photonik im Mittelpunkt.

In 2007 the Fraunhofer IOF and the CiS Institute for Micro Sensors, Erfurt jointly established the Application Centre for Microoptical Systems "amos". amos is one of four centers currently supported by the German federal ministry of education and research and the VDI/VDE-IT.

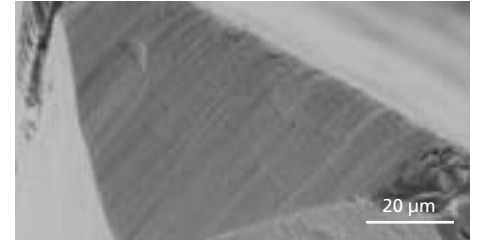
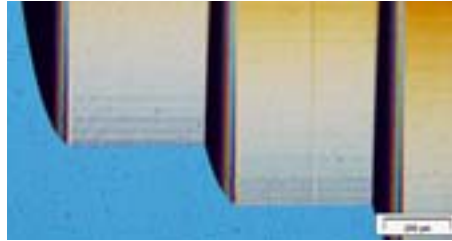
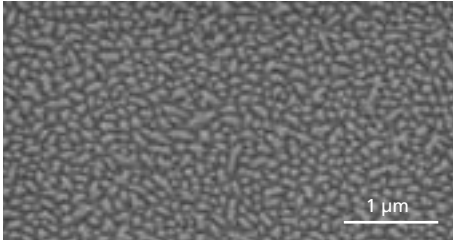
The center amos is based on the technological resources of the two R&D partners and offers application oriented development services based on high-end technologies. Main topics are micro-optical systems and optical sensors

The business activities include:

- Design and simulation of product concepts,
- One-stop product development from design to manufacturing,
- Suitable for production process development and technology transfer,
- Market analyses, consulting and feasibility studies.

The technology offered by amos is supplemented by a broad range of R&D services.

It is currently involved in several projects with well-known industrial partners. Its unique feature is that it combines micro system technology with photonics.



Die Steigerung der Funktionalität mechanischer und optischer Bauteile aus Kunststoff und Glas durch mikro- und nanostrukturierte Oberflächen sowie die Verbesserung der Fertigung solcher Bauteile sind Forschungsschwerpunkte der Nachwuchsforschergruppe »NanoReplica«, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung über vier Jahre gefördert wird.

Bei der Abbildung der gesamten Replikations-Prozesskette kommen Simulationsverfahren ebenso zum Einsatz wie Ultrapräzisions-Bearbeitungstechniken, Lithographie und Laserablation, um Strukturgrößen von Makro bis Nano zu adressieren.

Die Entwicklung von Freiform- und Nanostruktur-Messtechniken sowie Untersuchungen zu Entformbarkeit und Standzeit der Formeinsätze vervollständigen die Arbeiten.

Ziel der Arbeiten sind innovative Produktideen für Anwendungen in der optischen und der kunststoffverarbeitenden Industrie.

Die Forschergruppe kooperiert mit industriellen und akademischen Partnern der Region und deutschlandweit, um die entwickelten Technologien in die Industrie zu überführen und Fachkräfte zu qualifizieren.

Increasing the functionality of mechanical and optical parts made of polymers or glass by integrating micro- and nanostructured surfaces as well as improving the precision and reliability of these parts are the main focus of the young scientists group "NanoReplica", funded for four years by the German federal ministry of education and research.

Reproducing the entire replication process, scientific investigations covering simulation as well as diamond-cutting, lithography and laser ablation technologies are used to create structures that range from macro to nano.

The development of free form and nanostructure measuring technologies as well as investigations for demoulding and long term mould reliability complete the scientists' work.

The objective of the research work is ideas for innovative products for applications in the optics industry as well as the plastics processing industry.

The research group cooperates closely with industrial and academic partners of the region and in Germany, providing great opportunities for networking, technology transfer to the industry and training of specialized personnel.

**Forscherguppe NanoReplica**  
**Research Group NanoReplica**

**nano**  **replica**


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

## Organization

	<b>Director</b>	Prof. Dr. Andreas Tünnermann
	<b>Deputy Director</b>	Prof. Dr. Norbert Kaiser
	<b>Assistant</b>	Adlin Bruns

	<b>Optical Coatings</b>  Prof. Dr. Norbert Kaiser <b>NIR- and VIS-Coatings</b>  Dr. Olaf Stenzel <b>Optical Coatings on Plastics</b>  Dr. Ulrike Schulz <b>VUV-, EUV- and X-Ray Coatings</b>  Dr. Torsten Feigl <b>Coating Technology</b>  Dipl.-Ing. (FH) Wieland Stöckl	<b>Optical Systems</b>  Dr. Gunther Notni <b>Characterization of Surfaces and Coatings</b>  Dr. Angela Duparré <b>3D Measurement</b>  Dr. Peter Kühmstedt <b>Optics System Design</b>  Dr. Stefan Riehemann	<b>Microoptical Systems</b>  Dr. Andreas Bräuer <b>Design</b>  Dr. Peter Schreiber <b>Technology</b>  Dr. Peter Dannberg <b>Integration</b>  Dipl.-Ing. (FH) Bernd Höfer <b>CMN-Optics</b>  Dr. Uwe Detlef Zeitner	<b>Precision Engineering</b>  Dr. Ramona Eberhardt <b>Microassembly</b>  Dr. Erik Beckert <b>Precision Systems</b>  Dr. Stefan Risse <b>Simulation and Mechanical Design</b>  Dr. Thomas Peschel <b>Fiber Lasers</b>  Dr. Thomas Schreiber
--	--	---	--	---

**Strategy, Marketing, Coordination**

 Dr. Brigitte Weber

**Administration**

 Dipl.-Kauffr. Astrid Deppe

**Technical Services**


 Dipl.-Phys. Kersten Fonfara

**ultra-optics®**  
Center of Innovation Competence




Prof. Dr. Thomas Pertsch

**CMN-Optics**  
Center for Advanced Micro- und Nano-Optics



Dr. Uwe Detlef Zeitner

**amos**  
Applikationszentrum Mikrooptische Systeme



Oliver Mauroner

Institute of Applied Physics IAP  
FSU Jena

**Laser Shaping**



Prof. Dr. Stefan Nolte

**Micro Structuring**



Dr. Ernst-Bernhard Kley

**Fiber Lasers**



Dr. Jens Limpert

**Nano-Optics**



Prof. Dr. Thomas Pertsch

---

## Kuratorium

Fraunhofer-Institute und Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft werden durch Kuratorien beraten.

Dem Kuratorium des Fraunhofer IOF gehörten im Berichtszeitraum an:

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

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

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

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

**Prof. Dr.-Ing. habil Gerhard Linß**  
Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Ilmenau

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

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

**Prof. Dr. Roland Sauerbrey**  
Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e.V., Dresden

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

**MinR Dr. Frank Schlie-Roosen a. G.**  
Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn

**Dr. Norbert Stath**  
OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg

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

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

**Dr. Dirk Zittlau**  
VDO Automotive AG, Regensburg

---

## Advisory Committee

Advisory committees support the Fraunhofer Institutes as well as the Board of the Fraunhofer-Gesellschaft. Members of the advisory committee of the Fraunhofer IOF have been in the report period:

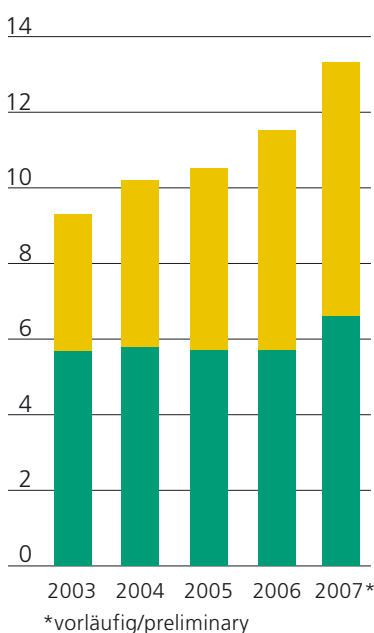
### Betriebshaushalt

Die positive Entwicklung des IOF und die gute Auftragslage 2007 spiegeln sich im Anwachsen des Betriebshaushalts des Instituts und dem ausgewogenen Verhältnis von Grundfinanzierung und Auftragsforschung aus Industrie und öffentlichem Bereich wieder. Dadurch war es möglich zusätzliche Arbeitsplätze zu schaffen. Die Ausbildung von Diplomanden und Doktoranden erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Fachhochschule Jena.

### Budget

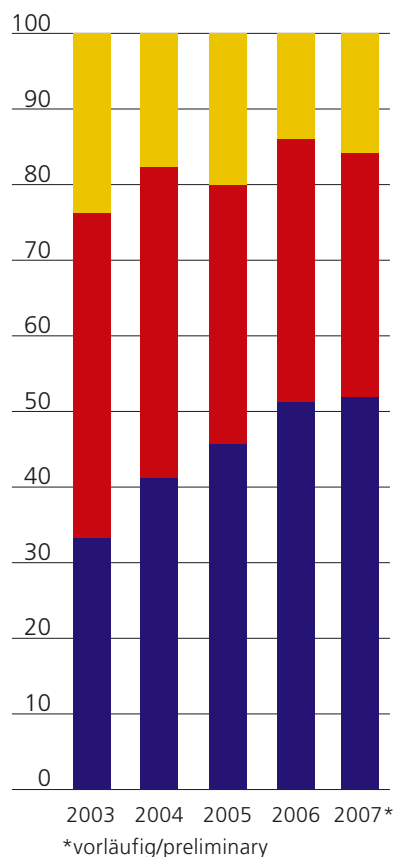
The successful development of the IOF and the positive order situation in 2007 are reflected in the increased budget of the institute and in the well-balanced ratio between core financing and contract research with industry and the public sector. As a result, additional positions for scientists as well as technicians could be created. The training of diploma and PhD students is carried out in close collaboration with universities, especially the Friedrich-Schiller-University and the University of Applied Sciences in Jena.

Betriebshaushalt/Budget (Mio. Euro)



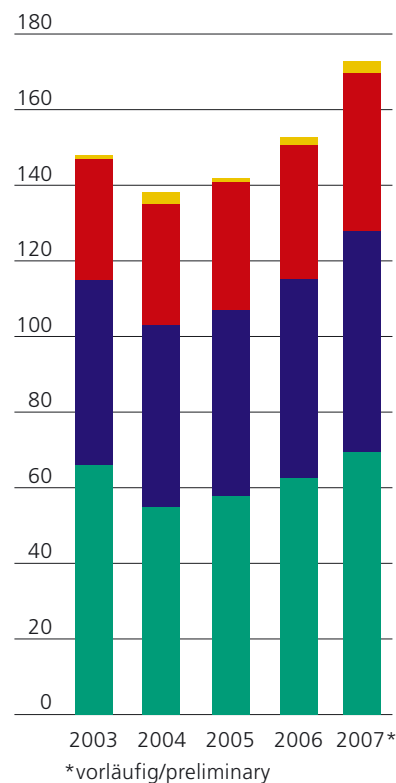
■ Personalaufwand/Personnel expenses  
 ■ Sachaufwand/Material expenses

Ertrag/Revenue (%)



■ Industrie/Contracts (Industry)  
 ■ öffentliche Aufträge/Contracts (Government)  
 ■ Grundfinanzierung/Federal funding

Mitarbeiter/Staff



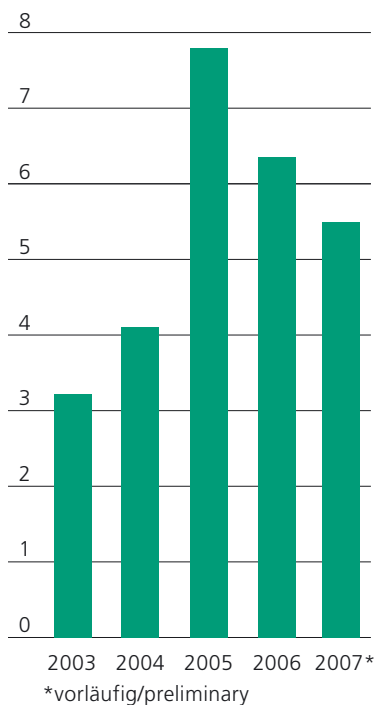
■ Wissenschaftler/Scientists  
 ■ Techniker/Technicians  
 ■ Schüler und Studenten/students  
 ■ Sonstige/Temporary contracts



## Investitionen

Die kontinuierliche Investition in die Infrastruktur ist Strategie des IOF und dient der Entwicklung der Technologieplattformen des Innovationsclusters JOIN. Resultierte in den Jahren 2004 bis 2006 der Hauptanteil der Investitionen aus Mitteln der EU und des Freistaats Thüringen für die Beschaffung einer Elektronenstrahlolithographieanlage speziell für optische Anwendungen, kommt der wesentliche Teil der Investitionen 2007 aus Mitteln der Grundfinanzierung.

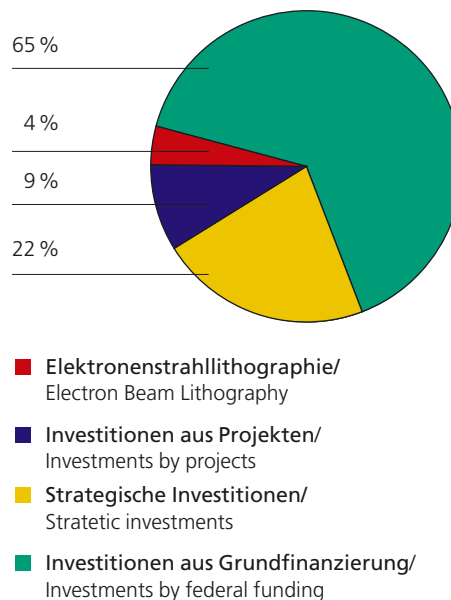
Investitionen/Investments (Mio. Euro)



## Investments

The continuous investment in infrastructure is a strategy of the IOF and provides a basis for the development of technology platforms of the innovation cluster JOIN. While from 2004 to 2006 the majority of the investment fund was granted by the European Union and the Free State of Thuringia for new Electron Beam Lithography Equipment, in 2007 the investments were done mainly by core financing.

Investitionen/Investments 2007



## Das IAP 2007 in Zahlen

Die Mitarbeiter des IAP konnten 2007 Drittmittel in Höhe von 5,912 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Am IAP arbeiten zwei Professoren, zwei Juniorprofessoren, 34 wissenschaftliche und elf technische Mitarbeiter. Es wurden 2007 19 Diplomarbeiten und vier Promotionen abgeschlossen.

### Drittmittelleinnahmen des IAP

Fördergeber	Zuwendung/Mio. Euro
BMBF	4,455
DFG	0,565
EU	0,053
Thüringen	0,144
Industrie	0,798

## The IAP 2007 in Figures

Contract research revenues of 5.912 million Euros were acquired by the employees of IAP in 2007 (see table). A total staff of 2 professors, 2 junior professors, 34 scientists and 11 technicians work at IAP. In 2007 19 diploma and 4 PhD students completed their theses.

### Contract research revenue

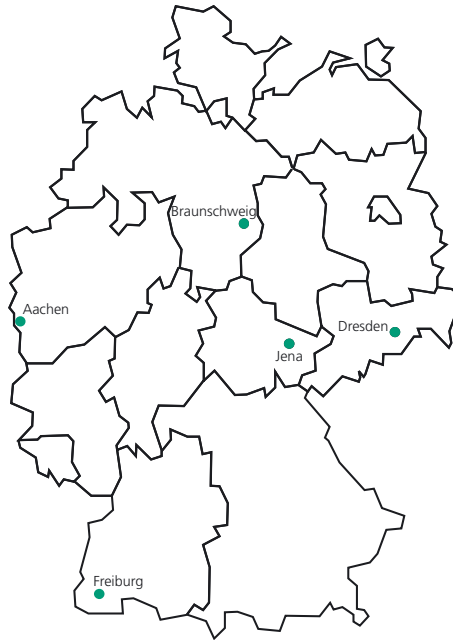
Contracts with	Funds/Mio. Euro
BMBF	4,455
DFG	0,565
EU	0,053
Thuringia	0,144
Industry	0,798



**Fraunhofer** Verbund  
Oberflächentechnik  
und Photonik

**Verbundvorsitzender/Presider**  
Prof. Dr. Eckard Beyer

**Koordination/Coordination**  
Dr. Udo Klotzbach  
Phone: 03 51/2583-252



### Kompetenz durch Vernetzung

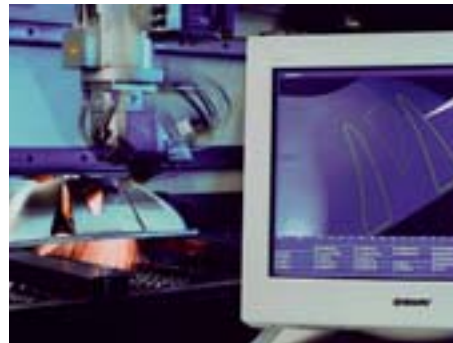
Sechs Fraunhofer-Institute kooperieren im Verbund Oberflächentechnik und Photonik. Aufeinander abgestimmte Kompetenzen gewährleisten eine permanente, schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an den raschen technologischen Fortschritt in allen industriellen Anwendungsbe-  
reichen. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Marktes ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten zum Nutzen des Kunden.



**Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP**  
Ziel des FEP ist die Erforschung und Entwicklung innovativer Verfahren zur Nutzung von Elektronenstrahlen hoher Leistung und dichter Plasmen in Produktionsprozessen für die Oberflächentechnik. Dabei stehen praktische Fragestellungen wie Prozessmonitoring, Qualitätskontrolle, Reproduzierbarkeit, Aufskalierung und Wirtschaftlichkeit im Vordergrund.

**Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP**  
The ambition of FEP is the research and development of innovative processes for the utilization of high performance electron beams and vacuum sealed plasmas for surface technology. Priority is given to problems like process monitoring, quality control, reproducibility, scaling, and profitability.

Fraunhofer FEP, Dresden  
[www.fep.fraunhofer.de](http://www.fep.fraunhofer.de)



**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT**  
Im Bereich der Lasertechnik ist das Zusammenspiel zwischen Laserentwicklung und Laseranwendung von herausragender Bedeutung. Neue Laser erlauben neue Anwendungen und neue Anwendungen geben Anregungen für neue Lasersysteme. Deshalb erweitert das Fraunhofer ILT durch die enge Kooperation mit führenden Laserherstellern und innovativen Laseranwendern ständig seine Kernkompetenzen.

**Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT**  
In the area of laser technology, the interactive relationship between laser development and laser applications is of prime importance. New lasers allow new applications, and new applications set the stage for new laser systems. This is why the Fraunhofer ILT is continually expanding its core competencies through close cooperation with leading laser manufacturers and innovative laser consumers.

Fraunhofer ILT, Aachen  
[www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)



**Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF**  
Hauptgegenstand der Forschungstätigkeit des Fraunhofer IOF ist die optische Systemtechnik mit dem Ziel der immer besseren Kontrolle von Licht. Schwerpunkte sind multifunktionale optische Schichtsysteme, mikrooptische Systeme, optische Messsysteme und Systeme zur Optik-Charakterisierung, opto-mechanische Präzisionssysteme sowie die Mikromontage.

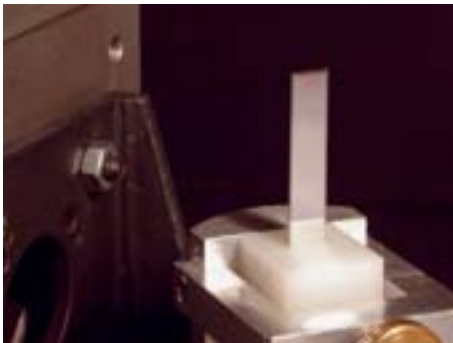
**Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF**  
The core of the research activity of Fraunhofer IOF is optical systems engineering aimed at a steady improvement of light control. The institute's focus is on multifunctional optical coatings, optical measurement systems, micro-optical systems, systems for the characterization of optics, opto-mechanical precision systems and assembling technologies.

Fraunhofer IOF, Jena  
[www.iof.fraunhofer.de](http://www.iof.fraunhofer.de)

## Competence by Networking

Six Fraunhofer institutes cooperate in the Fraunhofer Surface Technology and Photonics Alliance. Co-ordinated competences allow for a permanent, quick and flexible alignment of research work on the rapid technological progress in all industrial fields of application. This market-oriented approach ensures an even wider range of services and creates synergetic effects for the benefit of our customers.

Kernkompetenzen Core Competences	FEP Dresden	ILT Aachen	IOF Jena	IPM Freiburg	IST Braunschweig	IWS Dresden
Schicht- u. Oberflächentechnologie/ Coating and Surface Engineering	●	●	●	●	●	●
Strahlquellen/ Beam Sources	●	●	●	●		
Mikro- und Nanotechnologie/ Micro- and Nanotechnology	●	●	●	●	●	●
Materialbearbeitung/ Materials Treatment	●	●			●	●
Optische Messtechnik/ Optical Measurement Technique		●	●	●	●	●



**Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM**  
Das Fraunhofer IPM entwickelt optische Systeme für die Spektroskopie und Laserbelichtungstechnik. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Verwirklichung hochdynamischer Systeme. Neben der schnellen Laseransteuerung sind dafür besondere Kompetenzen bei der Signalverarbeitung gefragt. So wurden für die Infrastrukturüberwachung von Hochgeschwindigkeitsstrecken robuste, wartungsarme Messgeräte realisiert.

**Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM**  
The Fraunhofer IPM develops optical systems for applications in spectroscopy and light exposure technology. A major focus is the realization of highly dynamical systems. Besides a rapid activation, they require special competencies in signal processing as realized through robust and low maintenance measurement systems for the infrastructure monitoring of high speed railway roads.

Fraunhofer IPM, Freiburg  
[www.ipm.fraunhofer.de](http://www.ipm.fraunhofer.de)



**Fraunhofer-Institut für Schicht und Oberflächentechnik IST**  
Das Fraunhofer IST bündelt als industrienahes FuE-Dienstleistungszentrum Kompetenzen auf den Gebieten Schichtherstellung, Schichtanwendung und Schichtcharakterisierung. Zurzeit ist das Institut in folgenden Geschäftsfeldern tätig: Maschinenbau und Fahrzeugtechnik; Werkzeuge; Energie; Glas und Fassade; Optik; Information und Kommunikation; Mensch und Umwelt.

**Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST**  
As an industry oriented R&D service center, the Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST is pooling competencies in the areas film deposition, coating application and film characterization. Presently, the institute is operating in the following business fields: mechanical and automotive engineering; tools; energy; glass and facade; optics; information and communication; life science and ecology.

Fraunhofer IST, Braunschweig  
[www.ist.fraunhofer.de](http://www.ist.fraunhofer.de)



**Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS**  
Das Fraunhofer IWS forscht auf den Gebieten der Lasertechnik (z. B. Laserschweißen, Laserschneiden, Laserhärten), der Oberflächentechnik (z. B. Auftragschweißen), der Mikrobearbeitung sowie der Dünnschicht- und Nanotechnologie. Die in die Forschung und Entwicklung integrierte Werkstoffprüfung und -charakterisierung fundiert und erweitert das Spektrum des IWS.

**Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS**  
The Fraunhofer IWS is conducting research in the areas of laser technology (e.g. laser beam welding, cutting, hardening), surface technology (e.g. build-up welding), micro machining as well as thin film and nano technology. The integration of material testing and characterization into research and development constitutes and upgrades the IWS spectrum.

Fraunhofer IWS, Dresden  
[www.iws.fraunhofer.de](http://www.iws.fraunhofer.de)

# Die Fraunhofer-Gesellschaft

---

Forschung für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung für die Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand. Im Auftrag von Ministerien und Behörden des Bundes und der Länder werden zukunftsrelevante Forschungsprojekte durchgeführt, die zu Innovationen im öffentlichen Nachfragebereich und in der Wirtschaft beitragen.

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 Weiterentwicklung, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen auch für Information 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, in anderen Bereichen der Wissenschaft, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studentinnen und Studenten an Fraunhofer-Instituten eröffnen sich wegen der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt derzeit mehr als 80 Forschungseinrichtungen, davon 56 Institute, an 40 Standorten in ganz Deutschland. 13 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,3 Milliarden Euro. Davon fallen mehr als 1 Milliarde 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.

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.

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. The organization also accepts commissions from German federal and Länder ministries and government departments to participate in future-oriented research projects with the aim of finding innovative solutions to issues concerning the industrial economy and society in general.

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, accelerating technological progress, improving the acceptance of new technologies, and not least by disseminating their knowledge 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, in other scientific domains, in industry and in society. Students working 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.

At present, the Fraunhofer-Gesellschaft maintains more than 80 research units, including 56 Fraunhofer Institutes, at 40 different locations in Germany. The majority of the 13,000 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of 1.3 billion euros. Of this sum, more than 1 billion euros 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 institutional 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.

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



# Ausgewählte Ergebnisse

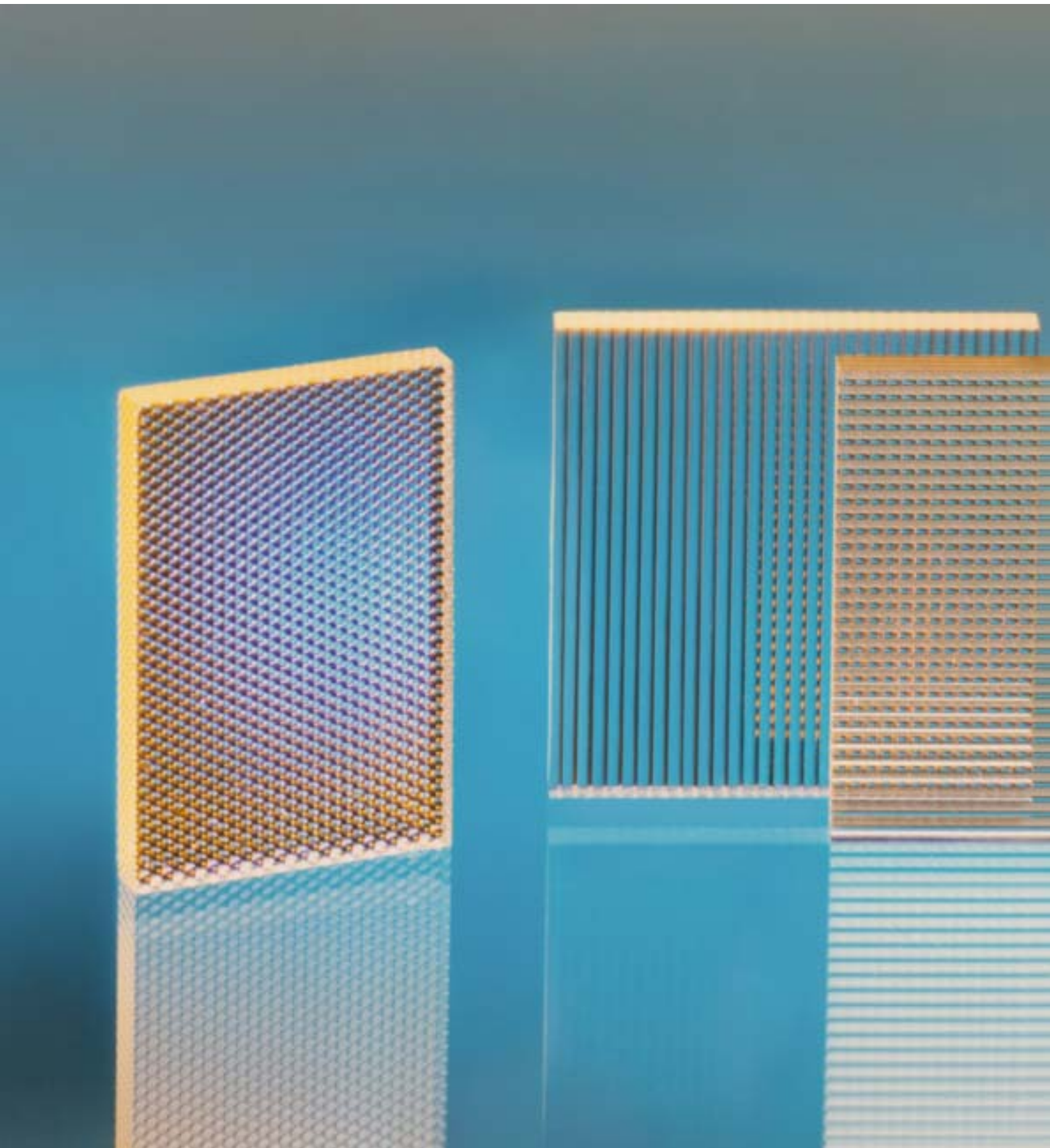
## Selected Results

# 2007

# Optische Komponenten

## Optical Components







Peter Schreiber



Sergey Kudaev



Andreas Bräuer



Peter Dannberg



Dirk Michaelis



Uwe Detlef Zeitner

---

## Einführung

Hochleistungs-LEDs werden aufgrund ihrer hohen Lebensdauer und Effizienz klassische Lichtquellen wie Halogen- und Entladungslampen in vielen Anwendungsfeldern von der Raumbelichtung bis hin zur Display-hinterleuchtung und im Automotivbereich verdrängen. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür sind effiziente Optiken, die das Licht der LED-Chips bündeln und für die jeweilige Anwendung formen. Eine in Primär- und Sekundäroptik gegliederte, zweistufige Optik erlaubt eine flexible Auslegung effizienter Lichtquellen zur homogenen Ausleuchtung rechteckiger und runder Bereiche mit höchsten Leuchtdichten sowie die Realisierung bildgebender Strahlformer.

---

## Primäroptik

Die Aufgabe der Primäroptik ist die Bündelung eines möglichst großen Teils des von der LED emittierten Lichts in einen von der nachfolgenden Optik akzeptierten Raumwinkelbereich. Wesentliche Designziele für die Primäroptik sind hohe Transmission und Erhaltung der Etendue, um hohe Leuchtdichten und eine optimale Refokussierbarkeit zu gewährleisten. Der Einsatz von Konzentratoroptiken bietet hierfür optimale Voraussetzungen. Das Konzentratordesign nutzt parametrische Elementmodelle basierend auf rationalen Bezier-Splines. Die Optimierung erfolgt für unterschiedliche Bewertungskriterien wie maximal nutzbare Transmission, minimale Restdivergenz und homogenes Nah- und/oder Fernfeld, zunächst global mit Splines niedriger Ordnung und dementsprechend einer geringen Anzahl variabler Parameter. Danach wird die Spline-Ordnung in einem

lokalen Optimierungsprozess schrittweise erhöht /1/. Da die Modellierung der Konzentratoren stückweise durch mehrere Splines erfolgt, werden parallel zur Optimierung der Anschluss der einzelnen Segmente justiert und mögliche Überschneidungen erkannt und korrigiert. Die Spline-Modellierung der Elemente und die Optimierungsalgorithmen sind als nutzerdefinierte Elemente und Makros in den Raytracer ZEMAX® implementiert.

Auf maximale Transmission in einen spezifizierten Divergenzbereich optimierte radialsymmetrische Konzentratoren für Dünnfilm-LED-Module (OSTAR® der Fa. OSRAM OS) mit jeweils vier 1 mm<sup>2</sup> LED-Chips zeigt Abb. 1. Der refraktiv/reflektive Konzentrator (RXI) kollimiert die Abstrahlung in einen Divergenzbereich mit 15° Vollwinkel (Abb. 1, links). Die Modellierung des Elements erfolgt durch insgesamt vier Bezierkurven bis zur 8. Ordnung. Rein brechend wirken die Flächen 1 und 4, während Fläche 2 als metallisierter Spiegel und Fläche 3 sowohl totalreflektierend (TIR) als auch brechend wirken. Die mit A und B gekennzeichneten Flächen dienen zur Halterung des Elements. Ein Beispiel für einen einfachen TIR-Konzentrator mit 40° Restdivergenz ist in Abb. 1 (rechts) dargestellt. Fernfeldmessungen an diamantgedrehten Mustern (Abb. 2) ergaben ca. 83 % eingeschlossene Leistung im Divergenzbereich 15° (Designwert 87 %) bei einer Gesamttransmission von 86 % für den RXI.



## Introduction

High-power LED will replace classical light sources like halogen and discharge lamps in many application fields from room illumination over display back-lighting to automotive applications, because of their long lifespan and efficiency. Essential prerequisites are efficient optical modules collimating and homogenizing the LED light emerging from the chips for the respective application. Optical modules consisting of primary and secondary optics allow for efficient light sources illuminating rectangular or circular spots with high homogeneous luminance or for image forming beam shapers.

## Primary Optics

The purpose of primary optics is to collect an essential part of the LED light and reshape it according to the angular cone of the subsequent optics. Essential targets for the design are high transmission and etendue conservation

resulting in high luminance and optimum refocusability. Optical concentrators are ideal elements for this purpose. Parametric models based on rational Bezier-splines are utilized for the concentrator design. Optimization is done for different evaluation criteria like maximum transmission, minimum residual divergence and homogeneous near and/or far field, starting with low order splines, i.e. a small number of variable parameters. Following that the spline orders are increased stepwise /1/. Because modelling of the concentrators is realized piecewise by a number of splines, possible overlaps during optimization are recognized and corrected by adjusting the intersecting points between the segments. Spline modelling of the elements and the optimization algorithms are implemented as add-ons in the raytracer ZEMAX®.

Concentrators for thinfilm LED modules (OSTAR®, Co. OSRAM Opto Semiconductors) containing four 1 mm<sup>2</sup> LED chips optimized for maximum transmission in a specified divergence angle are depicted in Fig. 1.

The refractive/reflective concentrator (RXI) collimates the light into a divergence of 15° full angle (Fig. 1, left). Modelling of this element is done by 4 Bezier curves up to the 8<sup>th</sup> order. Surfaces 1 and 4 are refractive, surface 2 acts as a metallized mirror, whereas surface 3 is both totally internally reflecting and refracting. Surfaces A and B serve for assembling purposes. An example of a simple TIR concentrator with residual divergence of 40° is shown in Fig. 1 right. Far field measurements at diamond turned concentrator samples (Fig. 2) showed that 83 % (compared to a designed value of 87 %) of the optical power is circled in a divergence cone of 15°. The RXI total transmission is 86 %.

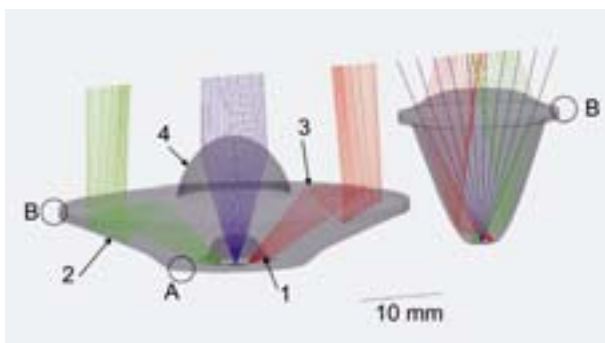


Abb. 1: Design eines refraktiv/reflektiven (RXI, links) und eines TIR-Konzentrators (rechts).

Fig. 1: Design of a refractive/reflective (RXI, left) and a TIR concentrator (right).



Abb. 2: Diamantgedrehte Prototypen für RXI (links) und TIR-Konzentrator (rechts).

Fig. 2: Diamond turned prototypes for RXI (left) and TIR concentrator (right).

Abbildung 3 zeigt eine Designvariante für einen TIR-Konzentrator mit quadratischem, homogenem Nahfeld mit 18 mm Kantenlänge bei 15° Restdivergenz. Die Vermessung der Homogenität an diamantbearbeiteten Mustern dieses Konzentrators ergibt – unabhängig von der Zahl der eingeschalteten LED-Chips des OSTAR®-Moduls – weniger als 15 % PV Abweichung am Ausgang.

### Sekundäroptik

Die Sekundäroptik transformiert das Licht vom Ausgang der Primäroptik in die gewünschte Leuchtdichteverteilung in der Beleuchtungsebene. Häufig geforderte Verteilungen sind dabei homogen ausgeleuchtete rechteckige oder runde Flächen. Ein klassischer Ansatz zur Erreichung solcher Verteilungen ist der Wabenkondensator. Kernstück dieser Beleuchtungsoptik sind zwei Linsenarrays, die im Abstand der einfachen Brennweite zueinander angeordnet sind. Unabhängig von ihrem Einfallswinkel transformiert diese Anordnung kollimierte Bündel in eine

telezentrische, divergente Abstrahlung mit einer der numerischen Apertur (NA) des Arrays entsprechenden Strahldivergenz (Abb. 4). Die monolithische Realisierung als mikrooptisches Tandem-Linsenarray ermöglicht, verglichen mit klassischen einseitigen Linsenarrays mit Lensletaperturen im Millimeterbereich, eine wesentliche Verringerung der Baulänge der Beleuchtungsoptik und die Verlagerung der Justage der Arrays von der Systemassemblierung in den Herstellungsprozess.

Erforderlich sind Zentrierung und Fokussierung der beiden Arrays zueinander auf 5 µm bis 10 µm genau. Die Herstellung der Mikrolinsenarrays erfolgt durch beidseitige Abformung von Reflow-Masterstrukturen durch Reaktionsguss von UV-härtendem Polymer auf Glassubstrate (Abb. 5) /2/. Optional ist die Integration von ebenfalls lithographisch strukturierten vergrabenen Blendenstrukturen möglich (Abb. 6). Die NA der Arrays liegen typischerweise im Bereich zwischen 0,1 und 0,3 bei Array-Pitches von 300 µm bis 600 µm.

Abb. 3:  
Konzentrator design mit  
quadratischem, homogenisiertem Nahfeld.

Fig. 3:  
Concentrator design with quadratic, homogenized nearfield.

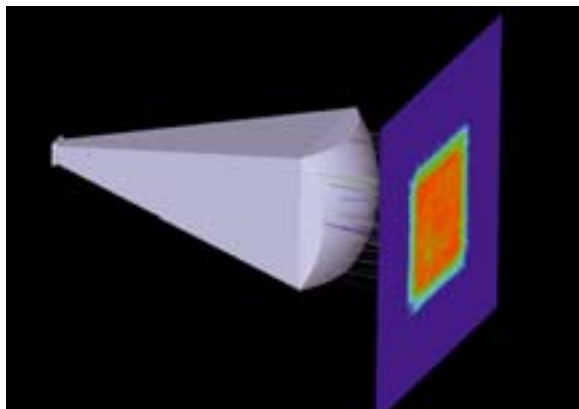


Abb. 4:  
Wabenkondensordesign.

Fig. 4:  
Fly's eye condenser design.

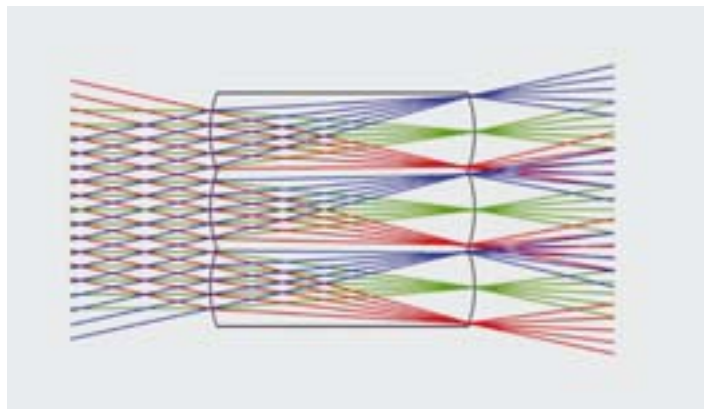




Figure 3 shows a design version for a TIR concentrator with quadratic homogeneous near field with 18 mm width and 30° residual divergence. Homogeneity measurements of diamond machined samples of this concentrator result in less than 15 % PV illuminance deviation at the output, independent of the number of switched-on LED chips of the OSTAR®-Module.

### Secondary Optics

The secondary optics transforms the light from the exit plane of the primary optics into the wished illuminance distribution in the illuminated plane. In a large number of applications homogeneously illuminated rectangular or circular areas are demanded. A classical

approach to this is a fly's eye condenser. Essential parts of this illumination optics are two lens arrays being arranged in a distance of the focal length. Independent of the incident angle, this setup transforms collimated beams into telecentric divergent radiation with a divergence equal to the numerical aperture of the array (Fig. 4). The monolithic realisation of a microoptical tandem lens array enables for a drastic length reduction of the illumination optics compared with classical single-sided lens arrays with millimeter lenslet apertures. Additionally, this approach shifts adjustment from system assembly to the element manufacturing process.

Axial and lateral alignment accuracies of 5 to 10 µm between two arrays are necessary and have been reached. Lens arrays on glass substrates (Fig. 5) are realized by double-sided UV-replication of master structures fabricated by lithography and subsequent reflow technology [2]. Optionally, integration of lithographically patterned apertures is possible (Fig. 6). Numerical apertures of the lenslets are typically between 0.1 and 0.3 and array pitches vary between 300 µm to 600 µm.

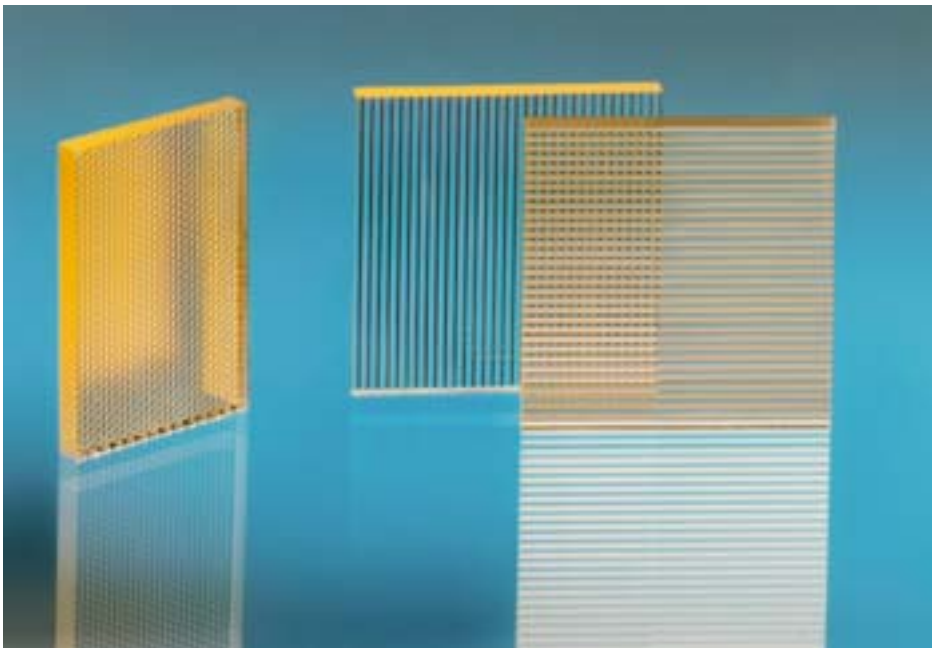


Abb. 5: Replizierte Tandemarrays: Zylinderlinsenarrays (rechts) und hexagonal angeordnete runde Lenslets mit Blendenarray (links).

Fig. 5: Replicated tandem lens arrays: Cylindrical lens arrays (right) and hexagonally arranged circular lenslets with diaphragms (left).

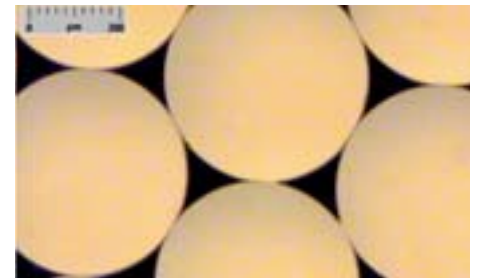


Abb. 6: Mikroskopaufnahme eines hexagonalen Arrays runder Linsen mit vergrabenen Blenden.

Fig. 6: Microscopic view of a hexagonal array of circular lenses with buried diaphragms.

Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau einer LED-Lichtquelle zur homogenen Ausleuchtung eines rechteckigen Bildfelds /3/. Die Sekundäroptik besteht aus je einem senkrecht und einem waagrecht angeordneten Tandem-Zylinderlinsenarray mit Füllfaktoren  $> 99\%$  und einer Kollektorlinse. In der Brennebene der Kollektorlinse erhält man einen homogen ausgeleuchteten rechteckigen Bereich, dessen Aspektverhältnis dem Verhältnis der NA der beiden Tandem-Arrays entspricht (Abb. 8). Zur Erzielung runder Leuchtfelder sind Tandemarrays mit hexagonal angeordneten, runden Lenslets mit integrierten Blendenarrays geeignet. Hier sind Füllfaktoren und somit Transmissionen bis ca.  $90\%$  erzielbar.

Einen neuartigen Ansatz zur Erzeugung beliebiger gewünschter Leuchtdichteverteilungen stellt der Einsatz von Freiformoptiken dar. Derartige Elemente – realisierbar als Spiegel oder transmittive Optiken – bestehen aus einer Basisfläche zur Strahlableitung und Fokussierung auf die Beleuchtungsebene, versehen mit einer Feinstruktur zur Umverteilung des Lichts in die gewünschte Leuchtdichteverteilung. Spezielle Designalgorithmen sorgen für kontinuierliche Elementprofile ohne Stufen und Abschattungseffekte.

Abbildung 9 zeigt schematisch den Strahlengang einer LED-Beleuchtung mit einem reflektiven Freiformelement zur Bilderzeugung. Die Abmaße des Spiegels betragen  $(5 \times 5) \text{ cm}^2$  bei einem Krümmungsradius von  $100 \text{ mm}$ . Die Abweichungen der Feinstruktur von der Basisfläche belaufen sich auf nur  $\pm 200 \mu\text{m}$ . Das als diamantgedrehter Aluminium-Freiformspiegel realisierte Element /4/ zeichnet bei Ausleuchtung mit einer OSRAM Dragon®-LED ein präzises Bild mit hohem Kontrast von  $> 10 : 1$  und vernachlässigbaren Störlichtanteilen.

Die Arbeiten zur Primäroptik und zur Strahlhomogenisierung sind zusammen mit der Dünnfilm-LED-Chipentwicklung und der angepassten Assembliertechnik (OSTAR) von OSRAM-OS mit dem Deutschen Zukunftspreis 2007, dem Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation, ausgezeichnet worden.

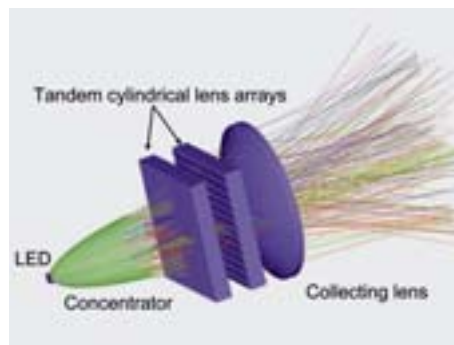


Abb. 7:  
Schematischer Aufbau einer homogenisierten LED-Rechteckquelle.

Fig. 7:  
Schematic view of a homogenized rectangular LED source.

#### Literatur:

- /1/ Kudaev, S.; Schreiber, P.: Parametric Design of Non-Imaging Collimators, IODC 2006, Proc. SPIE Vol. 6432 (2006), p. 634212.
- /2/ Dannberg, P.: Complex micro-optical modules generated by lithography and UV-molding, Jahresbericht Fraunhofer IOF 2005, S. 37.
- /3/ Schreiber, P.; Kudaev, S.; Dannberg, P.; Gebhardt, A.: Microoptics for homogeneous LED illumination, Photonics Europe 2006, Proc. SPIE Vol. 6196 (2006) p. 61690P.
- /4/ Steinkopf, R.; Gebhardt, A.; Risse, S.: Diamantbearbeitung von ultrapräzisen Freiformen, Jahresbericht Fraunhofer IOF 2007, S. 38.



Abb. 8:  
Labordemonstrator für LED-Rechteckquelle.

Fig. 8:  
Lab demonstrator for rectangular LED source.



In Fig. 7 an LED light source for homogeneous illumination of a rectangular image field is shown schematically /3/. The secondary optics consists of two tandem cylindrical lens arrays with fill factors better than 99 % which are arranged vertically and horizontally respectively, and an additional collector lens. In the focal plane of the collector lens a homogeneously illuminated rectangular area with aspect ratio equal to the ratio of the numerical apertures of the two tandem lens arrays is obtained (Fig. 8). For circular illumination spots tandem arrays with hexagonally arranged circular lenslets with integrated diaphragms are used. Fill factor and accordingly transmission for these arrays amount to about 90 %.

A new approach for the generation of well determined arbitrary illuminance distribution is the use of free form optics. These types of elements realized either as mirror or transmissive components consist of a curved surface for beam deflection and focussing and additionally with a fine structure for the desired light redistribution. Special design algorithms serve for continuous profiles without discontinuities and shadowing effects.

Figure 9 shows schematically the ray pattern of an LED illumination with a reflective free form element for image generation. The size of this free form mirror is 5 x 5 cm<sup>2</sup> with a radius of curvature of 100 mm. Typical maximum profile depths of the fine structure are  $\pm 200 \mu\text{m}$ . The aluminium free form mirror realized by fast tool servo assisted diamond turning transforms the light of a OSRAM Dragon<sup>®</sup>-LED into a precise image with high contrast  $> 10 : 1$  and negligible straylight /4/.

The work on LED primary optics and beam homogenization together with the thin-film LED chip development and the assembling technology OSTAR by OSRAM-OS have been awarded the "German Future Prize 2007".

#### Literature

- /1/ Kudaev, S.; Schreiber, P.: Parametric Design of Non-Imaging Collimators, IODC 2006, Proc. SPIE Vol. 6432 (2006), p. 634212.
- /2/ Dannberg, P.: Complex micro-optical modules generated by lithography and UV-molding, Jahresbericht Fraunhofer IOF 2005, S. 37.
- /3/ Schreiber, P.; Kudaev, S.; Dannberg, P.; Gebhardt, A.: Microoptics for homogeneous LED illumination, Photonics Europe 2006, Proc. SPIE Vol. 6196 (2006) p. 61690P.
- /4/ Steinkopf, R.; Gebhardt, A.; Risse, S.: Diamantbearbeitung von ultrapräzisen Freiformen, Jahresbericht Fraunhofer IOF 2007, S. 38.

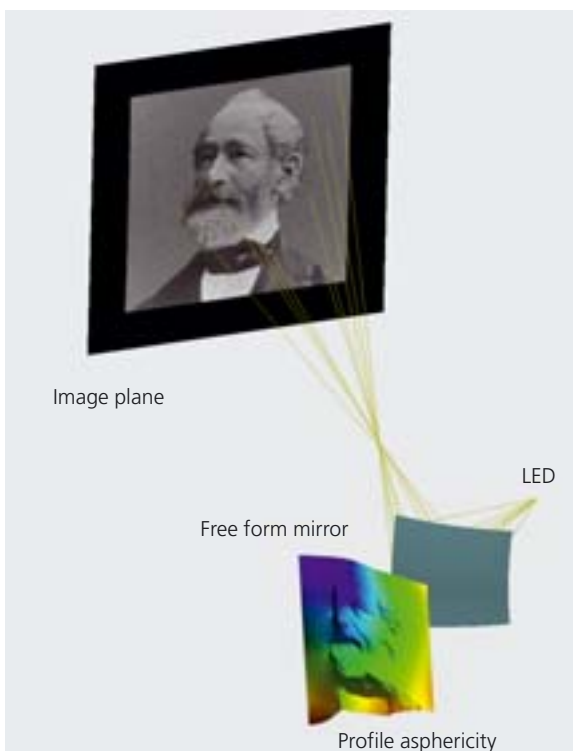


Abb. 9:  
Designschema des bildgebenden LED-Strahlformers.

Fig. 9:  
Design for image-forming LED beam shaper.



Ralf Steinkopf



Andreas Gebhardt



Stefan Risse

Technologien der Ultrapräzisionsbearbeitung ermöglichen, das Spektrum der sphärischen Elemente in optischen Systemen um asphärische Komponenten zu erweitern. Auf diese Weise werden kompakte Designs realisiert, in welchen die Abbildungsfehler und gleichzeitig die Anzahl der optischen Bauelemente reduziert werden. Attraktives Beispiel sind miniaturisierte Kameras in mobilen Telefonen.

Optische Elemente ohne Rotations-symmetrie, sogenannte Freiformen, ermöglichen nicht nur miniaturisiertere Bauformen, sondern eröffnen die Möglichkeit, neue Anwendungsfelder zu erschließen. Der zusätzliche Freiheitsgrad ist jedoch mit einem erheblichen Mehraufwand sowohl im Design als auch in der Fertigung verbunden. Aus diesem Grund werden Freiformen insbesondere für Volumenmärkte nachgefragt, wo hohe Stückzahlen den Einsatz von Replikationswerkzeugen erfordern. Anwendungsbeispiele finden sich in der Automobilindustrie (Head-Up Displays) oder Telekommunikation (Head-Mounted Displays). Andererseits werden Einzelstücke mit außerordentlicher Performance, die die hohen Kosten rechtfertigen, basierend auf dieser Technologie entwickelt, beispielsweise für Luft- und Raumfahrt-Anwendungen (Teleskopspiegel).



Abb. 1:  
Fast Tool Servo Turning.

Fig. 1:  
Fast tool servo turning.

Im Fraunhofer IOF werden Freiformflächen, basierend auf verschiedenen Verfahren der Ultrapräzisionsbearbeitung, erzeugt. Unterschieden werden diese durch die Art der Maschinenkinematik sowie der Relativbewegung von Werkzeug zu Werkstück:

- Hobeln,
- Servo Turning (Abb. 1) und
- Fräsen.

Je nach Gestalt der Bauteile und der Anforderungen an die Oberfläche wird ein geeignetes Verfahren ausgewählt.

Für Bauteile mit kleinen Abmessungen aber steil ansteigenden Flanken ist Hobeln als Bearbeitungsverfahren geeignet. Das Diamantwerkzeug bewegt sich zeilenförmig über die Oberfläche des Bauteils. Bei Abrastung großer Flächen resultieren zum Teil sehr lange Prozesszeiten. Um diese zu begrenzen, kann die Fläche auch im Slow-Tool-Servo-Modus, einer Variante des Drehens, realisiert werden. Im Unterschied zum »normalen« Drehprozess, bei welchem zwei Linearachsen angesteuert werden, werden für die Freiformbearbeitung die Linearachsen mit einer Rotationsachse synchronisiert. Auf diese Weise lassen sich große Bauteile bearbeiten, deren Abweichung zur Rotationssymmetrie durchaus im Bereich mehrerer Millimeter liegen kann (Abb. 2). Freiformen mit geringer Abweichung zur Rotationssymmetrie, die im Gegensatz aber hochfrequent sein kann, werden mit dem Fast-Tool-Servo, einer schnellen Linearachse, bearbeitet (Abb. 3).

Die Bewertung der optischen Flächen erfolgt interferometrisch mittels im Fraunhofer IOF erzeugter Computer-generierter Hologramme (CGH) oder mittels Profilometer im taktilen Flächenscan. Im Ergebnis werden typischerweise Formabweichungen im sub-Mikrometerbereich erzeugt (Abb. 4).





Spherical optics is widely becoming replaced by aspherical optics, often machined by means of single point diamond turning. The benefit gained from using aspherical optics is reduced aberrations and thereby the number of optical components. Miniaturized cameras in mobile phones are attractive examples.

Optical elements without rotational symmetry, "freeforms", allow not only miniaturized designs but open up the way for new areas of application. Freeform elements offer remarkable opportunities for new optics, but additional expenses in design and manufacturing should be calculated. Mass markets with a demand for replication tools offer the potential capacity for competitive units. Application examples can be found in the automotive industry (head-up displays), or telecommunications (head-mounted displays). In other cases, unique examples, such as aerospace applications (telescope mirrors), out-fitted with extraordinary performance, justify the high cost based on this technology.

At Fraunhofer IOF, freeform applications based on various technologies of diamond machining are being manufactured. Machine kinematics and the relative motion between tool and workpiece make all the difference in the machining process.

The technologies are:

- ruling,
- servo turning (Fig. 1)
- and milling.

Depending on the shape of the components and the requirements of the surface, an appropriate procedure is chosen. Components with small dimensions but steep slopes are machined by a process called ruling.

The diamond tool moves in a raster pattern over the surface of the component. Nevertheless, rastering of large areas sometimes causes long process times. To reduce this effect such parts become machined in slow tool servo mode, a variant of turning. In contrast to the „normal“ turning process, in which two controlled linear axes and one non-controlled rotary axis work together, in slow tool mode a rotary axis is synchronized with two linear axes. Large components, even with asymmetrical shapes in the range of several millimetres (Fig. 2), are also possible. Components with high frequency asymmetries are machined with fast tool servo, an additional and also synchronized linear axis (Fig. 3).

The optical surfaces can be evaluated interferometrically with computer-generated holograms (CGH), made at Fraunhofer IOF, or via profilometer in 3D scans. The typical result is a form deviation in the sub-micron range (Fig. 4).

Abb. 2: Beispiel eines Freiformspiegels, erzeugt durch Servo Turning.

Fig. 2: Example of a freeform mirror made by servo turning.

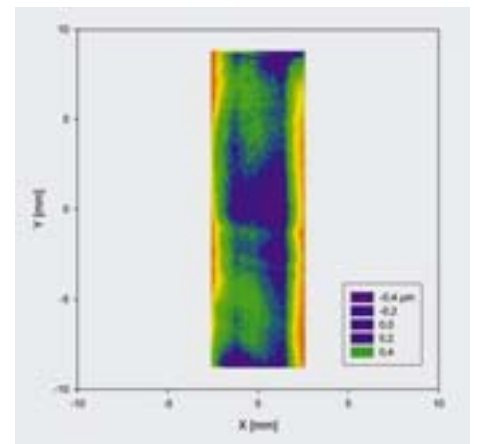


Abb. 3: Freiformoptik für die Strahlformung inkohärenter Quellen (LED).

Fig. 3: Freeform optics for incoherent beam shaping.

Abb. 4: Formabweichung eines gehobelten Freiformspiegels.

Fig. 4: Form deviation of a freeform mirror.



# Organische LED – Lichtauskopplung und Lichtmanagement



Norbert Danz



Dirk Michaelis



Michael Flämmich



Christoph Wächter



Sergey Kudaev

---

## Einleitung

Organische Licht emittierende Dioden (OLED) /1/ sind neue Lichtquellen, bei denen die aktiven Materialien im Gegensatz zu LED aus dünnen Schichten organischer Polymere oder kleiner Moleküle bestehen. Dadurch sind preiswerte Herstellungstechnologien, wie z. B. das Drucken, denkbar. Eine Besonderheit der OLED liegt in den vielen Freiheiten bei der Gestaltung dieser Lichtquellen: Sie können auf flexiblen Substraten aufgebaut und auch transparent gestaltet werden. In Verbindung mit den geringen Dicken der aktiven Schichten sind völlig neuartige Lichtquellen mit einzigartigen Eigenschaften und Anwendungen bereits im Labor gezeigt worden. In Kleinformatigen Displays von Mobiltelefonen, Radios oder MP3-Playern wird die OLED-Technologie bereits kommerziell eingesetzt. Großflächige, effiziente OLEDs für Anwendungen zur Beleuchtung oder als Hinweisschilder sind Gegenstand der aktuellen Entwicklung und der Arbeiten am Fraunhofer IOF im Rahmen des BMBF-Projekts »HOBBIT«.

Aufgrund der optischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien wird nur ein kleiner Teil der emittierten Lichtenergie (~ 20 %) durch das Substrat in die Luft ausgekoppelt und steht dem Nutzer zur Verfügung. Etwa 60 % des Lichts wird in geführte Moden des Dünnschichtstapels emittiert, während die restlichen 20 % das Substrat aufgrund der Totalreflexion an der Substrat-Luft-Grenzfläche nicht verlassen können. Zusätzlich tritt bei diesen Lichtquellen starke stromabhängige Alterung auf. Demzufolge ist die Erhöhung des Anteils der in Luft abgestrahlten Energie von zentraler Bedeutung für die Effizienzsteigerung und Erhöhung der Lebensdauer.

Zur Steigerung der Lichtauskopplung werden verschiedene Ansätze verfolgt, wie die Optimierung des Dünnschichtstapels, die mikrooptische Strukturierung des Substrats, sowie die Einbeziehung von diffraktiven Strukturen in das OLED-Schichtsystem.

---

## Homogenes Schichtsystem

Die Emission des aktiven Mediums im Inneren des Schichtstapels wird mit der Methode der Greenschen Funktionen simuliert /2/, wobei ein angeregter Zustand als Hertzscher Dipol modelliert wird. Bei Kenntnis der optischen Eigenschaften und Schichtdicken aller verwendeten Materialien ist so eine rigorose analytische Beschreibung der Emission möglich (Abb. 1).

Zusätzlich müssen weitere Eigenschaften des emittierenden Materials bekannt sein. Dies sind das intrinsisch emittierte Spektrum, die Verteilung der Rekombinationsrate in der aktiven Schicht, die Emissionsquanteneffizienz des angeregten Zustands sowie die Orientierungsverteilung der Dipolübergangsmomente. Fluoreszenzexperimente an dünnen Schichten mit optischer Anregung können diese Aussagen nur bedingt liefern, da alle vier Größen im elektrisch gepumpten Zustand des Systems bekannt sein müssen.



## Introduction

Organic light emitting diodes (OLED) [1] are new light sources containing thin, layered active media made of small organic molecules or organic polymers. This enables for cost efficient fabrication technologies, such as printing. A distinctive feature of OLEDs is the range of freedom in the design of this light source: It can generally be set up on flexible substrates and be prepared in a transparent manner. Taking the small thickness of the OLED into account additionally, novel light sources comprising new properties and applications have been demonstrated at laboratory level. OLED technology is readily commercialized for small sized displays of radios, mp3-players or cellular phones. Large sized, efficient OLEDs for illumination and signage purposes are the object of current development and IOF research within the project "HOBBIT" funded by the German federal ministry of education and research (BMBF).

Due to the optical properties of the media involved, only a small part (~ 20 %) of the light generated inside the device is coupled out into the air and can be used. Approximately 60 % of light energy is emitted into guided modes of the thin film stack, while the remaining 20 % of radiation suffers from total internal reflection at the substrate-air-interface. Additionally, a strong current dependent aging of OLEDs is observed. Therefore, increasing the fraction of light coupled into the air plays a major role in both the efficiency and device lifetime enhancement. Different approaches are being conducted to increase the OLED outcoupling such as optimization of the planar stack, micro optical patterning of the substrate as well as the introduction of diffractive structures into the stratified system.

## Homogeneous stratified system

The active medium's emission inside the OLED stack is simulated by means of the Green's function method [2], which models the excited state by a Hertz dipole. Knowledge of the optical properties and thicknesses of all media involved enables for rigorous analytical description of the system's emission (Fig. 1). But additional properties of the emitting material must be known, especially the intrinsically emitted spectrum, the spatial distribution of recombination rate inside the active layer, the quantum efficiency of emission, and the orientation distribution of the dipole transition momentum. Analysis of optically excited fluorescence in single thin films yields only limited results, because all four values should be known in electrically pumped operation.

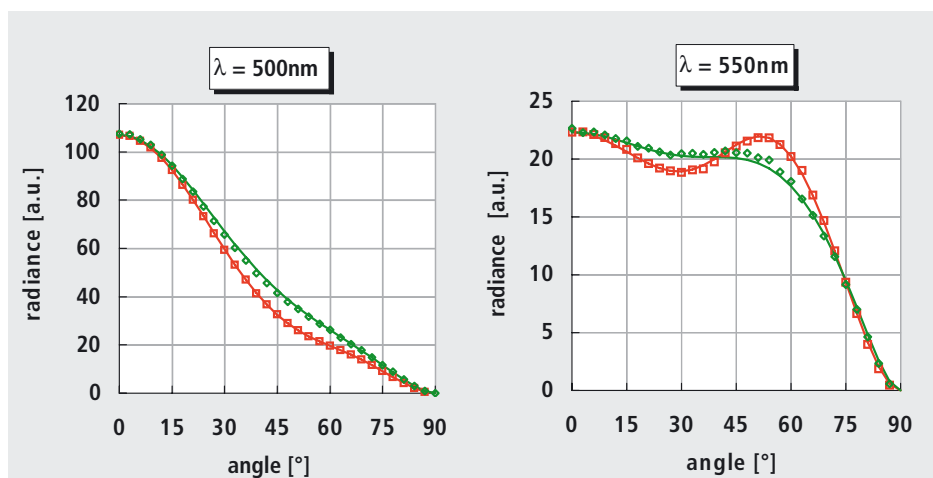


Abb. 1:  
Gemessene (Punkte) und berechnete (Linien) Abstrahlcharakteristik einer OLED für zwei Wellenlängen und die beiden Polarisationen TE (rot) sowie TM (grün).

Fig. 1:  
Measured (points) and simulated (lines) radiation pattern of an OLED at two wavelengths and the two polarizations TE (red) and TM (green).

Gegenwärtig werden Methoden entwickelt, um diese Eigenschaften des aktiven Materials im Betrieb der OLED zu bestimmen. Mittels einer immersionsgekoppelten Halbkugel (Abb. 2) kann z. B. die Strahlung im Substrat beobachtet werden. Dieses Vorgehen liefert, verglichen mit der konventionellen Messung, zusätzliche Informationen aufgrund des größeren beobachteten Winkelspektrums.

Zusätzlich können spezielle OLEDs entworfen werden, um verschiedene Emittereigenschaften im Strahlungsfeld sichtbar zu machen. So ist die Emission senkrecht orientierter Dipolübergangsmomente in herkömmlichen, optimierten Systemen an Luft praktisch nicht sichtbar. Im Substratstrahlungsfeld (Abb. 2) oder in einer speziell veränderten OLED kann diese Emission beobachtet und damit auf die Orientierungsverteilung der Dipolübergangsmomente geschlossen werden /3/.

## Strukturierte OLED

Die Verringerung der Verluste durch Totalreflexion an der Substrat-Luft-Grenzfläche kann durch mikrooptische Arrays an dieser Grenzfläche erreicht werden. Derartige Elemente haben dabei zwei Wirkungen: Einerseits kann Strahlung, die im Substrat unter großen Einfallswinkeln auf die Grenzfläche trifft, das Substrat verlassen. Dieser Effekt ist deutlich in Abb. 3 zu erkennen, in der an der Stirnfläche des Substratglases ohne Mikrolinsenarray die Substratstrahlung sichtbar ist. Andererseits tritt, unter Änderung des Ausbreitungswinkels, auch eine Rückreflexion zum OLED-Schichtsystem auf.

Der letztgenannte Effekt führt zu einer »Mischung« des Winkelspektrums der Substratstrahlung und damit zu einem sogenannten »Light Recycling«, da zurück gestreutes Licht nach Reflexion am aktiven Schichtsystem wieder auf die Grenzflächenstruktur trifft und nun eventuell das System verlassen kann.

Die Simulation dieser Effekte muss auf zwei Modellen aufbauen: Einer rigorosen, wellenoptischen Beschreibung der Emission und der Reflexion des Dünnschichtstapels, sowie einer Berechnung des Mikroarrays durch nichtsequentielle Strahlverfolgung. Die Optimierung einer OLED für eine gegebene Auskoppelstruktur führt dann sowohl zu einem angepassten Strahlungsfeld im Substrat als auch zu einer Schichtstruktur bestmöglicher Reflexion. Demzufolge kann ein homogenes System auf ein Mikroarray optimiert und dadurch weiter verbessert werden.

Abbildung 3 zeigt eine Farbveränderung der OLED-Abstrahlung zwischen homogenem und strukturiertem Bereich. Dieser Effekt kann teilweise mit der Winkel- und einer damit einhergehenden spektralen Mischung im Substrat erklärt werden. Andererseits führt der Cut-off geführter Moden im langwelligen Bereich zu mitunter großen spektralen Effekten im Substratstrahlungsfeld /4/.

Abb. 2:  
Beobachtung des Strahlungsfelds einer OLED im Substrat durch eine immersionsgekoppelte Halbkugel.

Fig. 2:  
Observation of the OLED's substrate radiation pattern using an immersion coupled half ball lens.





Methods to determine these properties of the OLED's emitting material are currently being developed. As an example, the radiation pattern inside the substrate can be measured using an immersion coupled half ball lens (Fig. 2). Compared to a conventional approach, this yields additional information due to the increased angular range being analyzed. Furthermore, certain devices can be designed to visualize different emitter properties in the device radiating pattern. One example is the emission of perpendicularly oriented transition dipole moments that practically do not emit into the air. Upon analyzing the substrate radiation or the air radiation in the case of an especially designed OLED, that emission becomes accessible to gain knowledge about the orientation distribution of transition dipole moments /3/.

### Patterned OLED systems

Losses due to total internal reflection at the substrate-air-interface can be reduced by introducing micro optical structures at this interface. These elements yield a twofold effect: First, radiation that hits the interface with a large angle of incidence can now leave the substrate. This effect is clearly seen in Fig. 3 where substrate radiation is apparent at the edge of the substrate without microlens array. Second, back reflection towards the OLED stack will occur in connection with a change of the propagation angle. This yields a mixing of the substrate radiation angular spectrum and thus a so-called light recycling, because back reflected light might leave the substrate after a subsequent reflection at the active OLED stack.

The simulation of micro patterned substrates must rely upon two models: A rigorous, wave optical description of emission and reflectivity of the thin film system and a non sequential ray tracing calculation of the combined OLED and micro structure system. The optimization of an OLED stack onto a given micro structure will lead to a well adapted substrate radiation pattern as well as to a stack with highest possible reflection. According to this consideration, a homogeneous system can be optimized onto a given micro array and thus can be further improved.

Figure 3 illustrates a slight color shift of the OLED emission when comparing the homogeneous and the micro patterned area. This effect can be explained partially by the angular and an associated spectral mixing during light recycling in the substrate. But the cut-off of thin film guided modes in the long wavelength range might yield enormous spectral effects in the substrate radiation pattern /4/.



Abb. 3:  
Weiße OLED (Merck KGaA, Mainz), die in der unteren Hälfte mit einem Mikrolinsenarray (IOF) versehen ist. Ohne die Mikrostruktur ist in der oberen Hälfte der Stirnfläche deutlich die Substratstrahlung zu erkennen.

Fig. 3:  
White emitting OLED (Merck KGaA, Mainz) covered by an microlens array (IOF) in the lower half area. Substrate radiation is apparent without the micro structure at the substrate edge in the top left of the image.

Der bedeutendste optische Verlustkanal in einer OLED sind geführte Moden des Dünnschichtsystems /5/ und darunter insbesondere die starke Anregung eines TM-polarisierten Oberflächen-Plasmon-Polaritons an der Grenzfläche zum Metall. Dieser Effekt kann durch lateral strukturierte Schichtsysteme, also Gitter oder photonische Band-Gap-Strukturen, verringert werden. Neben dem enormen Herstellungsaufwand sind bei solchen Anordnungen wiederum zwei Effekte zu beachten:

- Erstens wird das Strahlungsfeld der Emitter gegenüber dem homogenen System infolge der Ankopplung an ursprünglich gebundene Moden mitunter stark modifiziert.
- Zweitens tritt auch hier – durch Beugung bei der Reflexion am Dünnschichtstapel – eine Mischung des Winkelspektrums im Substrat analog zur Wirkung einer strukturierten Substrat-Luft-Grenzfläche auf.

Die Simulation solcher Strukturen beruht auf der Verallgemeinerung des im homogenen System angewendeten Algorithmus, wobei die Gitterwirkung mittels »Rigorous Coupled Wave Analysis« (RCWA) berechnet wird. Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Wirkung einer Gitterstruktur.

## Zusammenfassung

Die Simulation der optischen Effekte in einer OLED zeigt ein großes Potenzial auf, um die Effizienz dieser neuartigen Lichtquellen, und damit auch deren Lebensdauer, zu steigern. Neben dieser Aufgabe besteht die Möglichkeit, großflächige Lichtquellen mit einem auf die Anwendung angepassten Strahlungsfeld durch Kombination mit entsprechenden mikrooptischen Systemen herzustellen. Damit kann, abhängig vom OLED System, die Lichtausbeute in Vorwärtsrichtung um bis zu 100 % gesteigert werden. Beispielhaft ist in Abb. 5 das Ergebnis der Wirkung von zwei gestapelten mikrooptischen Arrays gezeigt, die eine stark gerichtete Emission der OLED bewirken.

Am Fraunhofer IOF werden geeignete Simulationstools entwickelt, die optischen OLED-Eigenschaften charakterisiert sowie angepasste Auskoppel- und Strahlformungsoptiken technologisch realisiert.

## Literatur:

- /1/ Kalinowski, J.: Organic Light-Emitting Diodes, Marcel Dekker, New York, 2005.
- /2/ Danz, N.; Waldhäusl, R.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.: Dipole lifetime in stratified media, J. Opt. Soc. Am B 19 (2002) 412.
- /3/ Flämmich, M.; Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Gather, M.C.; Meerholz, K.: In situ determination of dipole emitter orientation in organic light emitting diodes, ECOER 2007 Conference, 1.–4. October 2007, Varenna, Italy.
- /4/ Danz, N.; Flämmich, M.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Pflumm, C.; Fiebranz, B.; Voges, F.: Anomalous colour shift of OLED-substrate radiation due to bound modes, ECOER 2007 Conference, 1.–4. October 2007, Varenna, Italy.
- /5/ Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.: Light extraction from OLEDs – the waveguide perspective, Proc. SPIE 6475 (2007) 64750J.

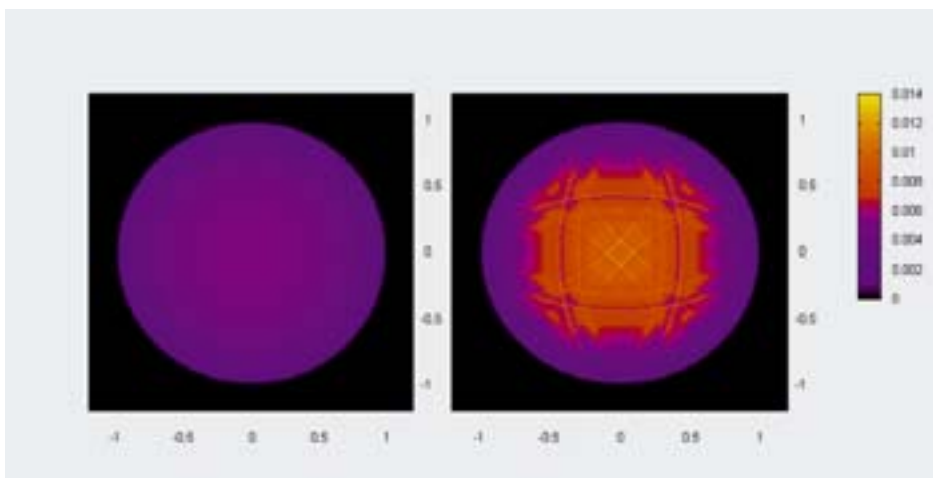


Abb. 4: Emission einer homogenen OLED (links) und einer OLED mit 2D Gitter im Dünnschichtsystem (rechts) in Abhängigkeit der Richtungskosinus der Lichtausbreitung in Luft.

Fig. 4: Emission of a homogeneous OLED (left) and an OLED comprising a 2D grating inside the thin film stack (right) depending on the direction cosines of propagation in air.



The most important optical losses inside an OLED are thin film guided modes /5/, and following this especially the excitation of a TM-polarized surface plasmon polariton guided at the metal interface. This effect can be decreased by using laterally patterned systems such as gratings or photonic band gap structures. Besides the expense of preparing such structures, two effects need to be considered again:

- First, the emitters' radiation pattern is now coupled to the originally bound modes and might be modified considerably compared to the homogeneous system.
- Second, similar to the effect of a patterned substrate-air-interface, angular mixing inside the substrate occurs due to the diffracted reflection at the OLED stack.

The simulation of such structures is based upon a generalization of the algorithm applied for homogeneous systems, introducing the grating diffraction via „Rigorous Coupled Wave Analysis“ (RCWA). An example of a grating's effect is given in Fig. 4.

## Conclusions

The modeling of optical effects inside OLED systems shows large potential to enhance the efficiency, and correspondingly the lifetime, of these novel light sources. Besides this task, the radiation pattern of large area light sources may be shaped according to an intended application by combining the OLED with an appropriate micro optical system. In result, the light extraction efficiency perpendicular to the system can be increased by up to 100 % depending on the system.

Figure 5 depicts the effect of two stacked micro optical arrays as an example, where a strongly directed OLED emission has been reached.

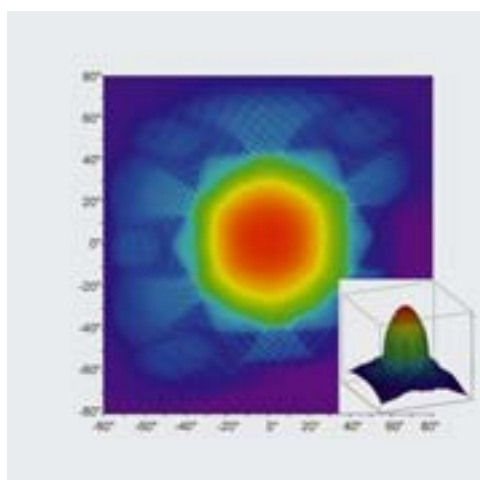
Within this background, the IOF develops appropriate simulation tools, characterizes the optical properties of OLEDs, and technologically prepares optical elements for radiation coupling and pattern shaping.

## References:

- /1/ Kalinowski, J.: Organic Light-Emitting Diodes, Marcel Dekker, New York, 2005.
- /2/ Danz, N.; Waldhäusl, R.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.: Dipole lifetime in stratified media, J. Opt. Soc. Am B 19 (2002) 412.
- /3/ Flämmich, M.; Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Gather, M.C.; Meerholz, K.: In situ determination of dipole emitter orientation in organic light emitting diodes, ECOER 2007 Conference, 1.–4. October 2007, Varenna, Italy.
- /4/ Danz, N.; Flämmich, M.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Pflumm, C.; Fiebranz, B.; Voges, F.: Anomalous colour shift of OLED-substrate radiation due to bound modes, ECOER 2007 Conference, 1.–4. October 2007, Varenna, Italy.
- /5/ Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.: Light extraction from OLEDs – the waveguide perspective, Proc. SPIE 6475 (2007) 64750J.

Abb. 5: Gemessenes Strahlungsfeld einer OLED, die mit einer Primäroptik zur Lichtauskopplung aus dem Substrat und einer Sekundäroptik zur Formung der Abstrahlcharakteristik versehen ist.

Fig. 5: Experimentally determined radiation pattern of an OLED comprising two micro optical arrays, one to increase substrate radiation outcoupling and a second one to shape the far field emission pattern.



# Chirped Microlens Arrays für die Homogenisierung kohärenter Strahlung



Frank Wippermann



Uwe Detlef Zeitner



Andreas Bräuer

Eine Strahlformung von Lasern mit quasi beliebigen Eingangsintensitätsverteilungen in eine Top-Hat-Intensitätsverteilung ist in einer Vielzahl von Anwendungen erforderlich. Hierbei kommen Wabenkondensoraufbauten zum Einsatz, die gegenüber refraktiven mikrooptischen Strahlformungselementen unkritisch in der Justage und tolerant gegenüber temporären Schwankungen der zu homogenisierenden Strahlung sind. Klassische Aufbauten bestehen aus einem Einzel- oder einem Tandemarray regulärer Mikrolinsen und einer dahinter angeordneten Fourierlinse (Abb. 1, links und Mitte). Durch Überlagerung der Verteilungen vieler optischer Kanäle kommt es zu einem Mittelungseffekt und damit zur Homogenisierung. Speziell bei der Nutzung kohärenter Strahlungsquellen treten jedoch vom regulären Aufbau der Mikrolinsenarrays (MLA) hervorgerufene regelmäßige Interferenzmuster in der Intensitätsverteilung auf, die die Homogenität verschlechtern. Nutzt man jedoch eine Anordnung basierend auf gechirpten und damit nichtregulären MLA, können die äquidistanten Peaks in der Ausgangsverteilung vermieden werden (Abb. 1, rechts) /1/. Infolge der auftretenden Vielstrahlinterferenzen tritt stets eine Modulation der Top-Hat-Verteilung auf, die jedoch, verglichen mit regulären MLA, hochfrequenter

und unregelmäßiger ist, was mit einer Verbesserung der Homogenität einhergeht. Die Dimensionierung der gechirpten MLA beruht auf rein geometrischen Randbedingungen, wobei jeder Kanal dieselbe numerische Apertur besitzt, die zweiten Linsen sich im Fokus der ersten befinden und der Füllfaktor der Arrays möglichst groß ist, um maximale Transmission zu erreichen.

Als favorisierte Herstellungstechnik kommt das Schmelzen von Fotolack zum Einsatz, welches auf ebenen Substraten durchgeführt wird /2/. Die technologisch sinnvollste Auslegung des gechirpten Tandemlinsenarrays besteht damit in einer keilförmigen Anordnung. In Abb. 2 sind wellenoptische Simulationen der Ausgangsintensitätsverteilung für einen Wabenkondensator mit einem regulären und einem gechirpten Tandemarray für einen Keilwinkel von  $7^\circ$  dargestellt. Die verbesserte Homogenität und der geringere und unregelmäßigere Abstand benachbarter Intensitätsmaxima sind deutlich zu erkennen. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus einer gemessenen Ausgangsverteilung. Gegenüber der Nutzung regulärer MLA kann die Homogenität eindimensional um mehr als eine Größenordnung verbessert werden.

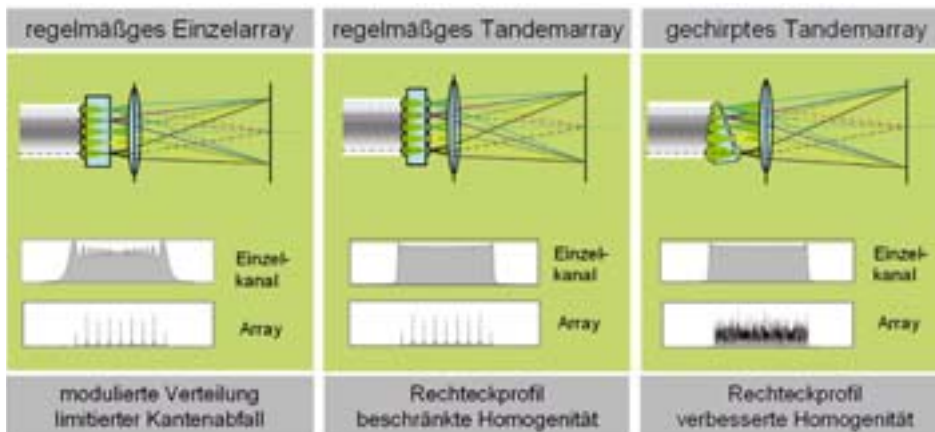


Abb. 1:  
Prinzipieller Aufbau und Ausgangsintensitätsverteilung von Wabenkondensoren zur Strahlhomogenisierung mit regulären und gechirpten Mikrolinsenarrays.

Fig. 1:  
Schematic drawing and output intensity distribution of fly's eye condenser setups using regular and chirped microlens arrays.



# Chirped microlens arrays for the homogenization of coherent radiation



The homogenization of coherent laser sources with arbitrary intensity distribution into a top hat is required in widespread fields of application. This can be done by using fly's eye condensers which are less critical in alignment and more tolerant against temporal changes of the input intensity distribution compared to refractive beam shapers. Classical setups consist of a regularly single or a tandem array of microlenses followed by a Fourier lens (Fig. 1, left and middle). Here, an averaging effect is achieved by superimposing the radiation of the different channels, leading to improved homogeneity. The quality of the homogenization is disturbed by a comb of equidistantly spaced intensity peaks when using coherent radiation. This is caused by the regular structure of the microlens array which acts as a grating. The equidistant peaks in the output distribution can be suppressed when using chirped and therefore irregular microlens arrays (Fig. 1, right) /1/. Peaks are still present in the distribution with

an envelope of a top hat which is due to multiple beam interference effects. However, compared to regular arrays these peaks are located irregularly and more dense which goes along with an improved homogenization. The layout of the chirped microlens arrays is based on pure geometrical constraints whereas each channel possess the same numerical aperture, the lenses of the second array are located in the focal plane of the first and the fill factor of the array is maximized in order to achieve optimum transmission.

Reflow of photoresist is used as preferred fabrication technique which is performed on planar substrates /2/. Consequently, a wedge configuration is the technologically most reasonable layout of the chirped tandem array. Figure 2 shows the results of the wave optical simulation of the output intensity distribution for fly's eye condensers using regular and chirped tandem array with a wedge angle of  $7^\circ$ . The improved peak density and consequently homogenisation can

be observed clearly. The detail of a measured output intensity distribution in false color representation is provided in Fig. 3. The homogeneity of the output distribution can be improved by more than one magnitude in the one dimensional case compared to regular arrays.

#### References:

- /1/ Wippermann, F.; Zeitner, U. D.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Sinzinger, S.: Beam homogenizers based on chirped microlens arrays, *Opt. Exp.*, Vol. 15, No. 10 (2007) 6218-6231.
- /2/ Daly, D.; Stevens, R.; Hutley, M.; Davies, N.: The manufacture of microlenses by melting photoresist, *J. Meas. Sci. Technol.* 1 (1990) 759-766.

Abb. 2: Wellenoptische Simulation der Ausgangintensitätsverteilungen eines regulären (a) und eines gechirpten (b) Tandemarrays bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle konstanter Amplitude unter senkrechtem Einfall.

Fig. 2: Wave optical simulation of the output intensity distribution of a (a) regular and (b) chirped tandem array when illuminated with a single plane wave at perpendicular incidence.

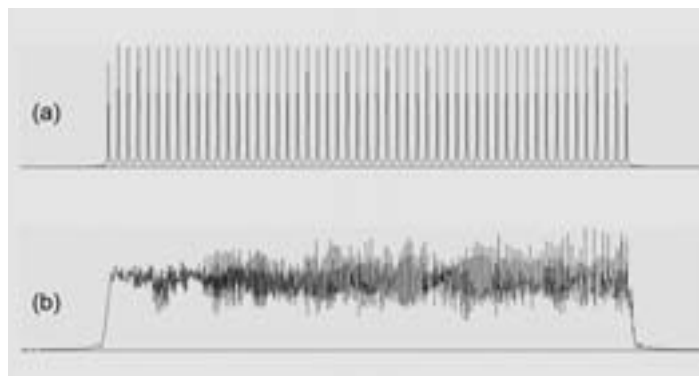
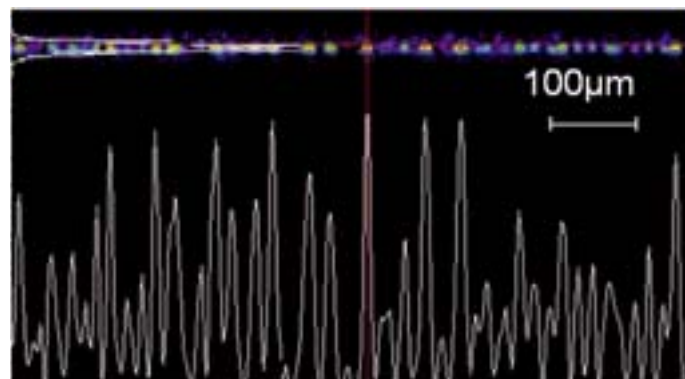


Abb. 3: Ausschnitt aus einer gemessenen Intensitätsverteilung in der Brennebene der Fourierlinse.

Fig. 3: Detail of a measured intensity distribution in the focal plane of the Fourier lens.





Uwe Detlef Zeitner



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

Computer generierte Hologramme (CGH) sind wichtige Elemente der modernen Optik zur Generierung anwendungsspezifischer optischer Felder und Funktionen. Mit Hilfe von Mikro- und Nanostrukturen werden mit diesen Elementen vorgegebene Wellenfronten erzeugt, die mit Methoden der klassischen Optik nicht realisierbar sind. Anwendung finden CGHs z. B. in der interferometrischen Prüfung hochgenauer asphärischer Linsen, für die Aufteilung eines Beleuchtungsstrahls in eine Vielzahl gleichheller Spots (Abb. 1), für die hocheffiziente Einkopplung von Laserlicht in optische Fasern und andere Aufgaben.

Die Herstellung von CGHs stellt höchste Anforderungen an die Technologie, mit der die erforderlichen Mikrostrukturen erzeugt werden. Am Fraunhofer IOF steht mit dem CMN-Optics eine hochmoderne Technologieplattform zur Verfügung, deren Herzstück eine Elektronenstrahlolithographieanlage SB350 OS (Vistec) ist /1/. Damit lassen sich auf Flächen bis zu 300 mm Ausdehnung Strukturen mit Auflösungen unter 50 nm realisieren /2/. Die mit dieser Anlage erreichbaren Positionier- und Überdeckungsgenauigkeiten bei der Belichtung sind ideal für die Herstellung von CGHs höchster Wellenfrontgenauigkeit geeignet. So konnte an großflächigen Pulscompressorgittern mit 100 mm x 100 mm Fläche und 500 nm Gitterperiode mittels interferometrischer Charakterisierung der Gitterstruktur in Littrow-Anordnung nachgewiesen werden, dass der strukturierungsbedingte RMS-Wellenfrontfehler unter 3 nm liegt. Um dieses Potenzial für CGHs voll nutzen zu können, wird am Fraunhofer IOF an einer Reihe von Weiterentwicklungen der gesamten Herstellungskette gearbeitet.

So werden z. B. innovative Ansätze für die Generierung der Belichtungsdaten und neuartige Substratkonzepte erforscht, bei denen die Eigenschaften der gewünschten optischen Funktion direkte Berücksichtigung finden.

Ein aktuelles Anwendungsbeispiel für den Einsatz von CGHs ist ein Astro-Objektiv, welches am Fraunhofer IOF entwickelt wird. Die für die asphärischen Spiegeloptiken notwendigen Prüf-CGHs können am IOF berechnet, hergestellt und charakterisiert werden. Abbildung 2 zeigt ein solches Prüf-CGH auf einem 150 mm Substrat. Zukünftig wird es auch möglich sein, derartige Elemente auf 230 mm bzw. 300 mm Substraten zu realisieren. Dafür erfolgt zur Zeit eine weitere technologische Aufrüstung auf dem Gebiet des Plasmaätzens, um die bei der Belichtung erreichten Genauigkeiten im Bereich von 10 nm Strukturbreitentreue auch nach der Übertragung in das Quarzsubstrat auf der gesamten Fläche sicherzustellen.

#### Literatur:

- /1/ Zeitner, U. D.; Kley, E.-B.: Lithographie der nächsten Generation für die Mikrooptik, IOF Jahresbericht 2006, S. 38.
- /2/ Zeitner, U. D.; Kley, E.-B.: Advanced Lithography for Micro-Optics, Proc. SPIE 6290, Aug. 2006.



Computer generated holograms (CGH) are important elements in modern optics used for the generation of application specific optical fields and functions. Their ability to transform incident beams into wave-fronts not known from classical optics is based upon micro- and nano-sized surface structures calculated by help of computers. Typical application examples of CGHs are the interferometric testing of high-precision aspheric lenses, the splitting of an illumination beam into a number of equal intensity spots (Fig. 1), or the highly efficient coupling of laser light into optical fibers.

The fabrication of CGHs requires an extremely demanding technology for the precise generation of the micro structures. The CMN-Optics at the Fraunhofer IOF provides a technology platform dedicated to modern high-end micro-structuring techniques for optical applications. Its core is an electron-beam lithography system SB350 OS (Vistec) /1/. This machine is capable of fabricating structures with less than 50 nm resolution on substrates with up to 300 mm extension /2/. The positioning- and overlay-accuracy achievable during pattern exposure

with the SB350 OS are ideally suited for the fabrication of CGHs showing highest wave-front precision. As an example we were able to demonstrate large area pulse-compression gratings of 100 mm x 100 mm size and 500 nm grating period with a lithography caused RMS-wave-front error of less than 3 nm. For the wave-front measurement the grating structure has been placed in front of a plane wave interferometer under Littrow-mount. In order to make this potential available for the CGH fabrication a number of further developments of the whole technology chain are currently under investigation at the Fraunhofer IOF. Hot topics are e.g. innovative approaches for the generation of exposure data or completely new substrate concepts which account for the desired optical function right from the beginning.

One application example for the use of CGHs is a lens system used for an astronomical telescope which is currently under development at the Fraunhofer IOF.

The test-CGHs required for the aspherical mirrors can be completely designed, fabricated, and characterized at the IOF. An example of such a test-CGH on a 150 mm substrate is shown in Fig. 2. In the near future it will also be possible to fabricate these elements in larger size on substrates with 230 mm or 300 mm extension. For this purpose the technological instrumentation in the field of plasma etching is being updated. This is an essential step in order to assure the high structure precision of about 10 nm obtained in the lithographic exposure step also after pattern transfer into the fused silica substrate with sufficient homogeneity.

#### References:

- /1/ Zeitner, U. D.; Kley, E.-B.: Lithographie der nächsten Generation für die Mikrooptik, IOF Jahresbericht 2006, S. 38.
- /2/ Zeitner, U. D.; Kley, E.-B.: Advanced Lithography for Micro-Optics, Proc. SPIE 6290, Aug. 2006.

Abb. 1: Mikroskopaufnahme der Struktur eines binären 1-zu-32 Strahlteilers (oben) und berechnete Intensitätsverteilung der 32 Spots (unten).

Fig. 1: Microscope image of the microstructure of a 1-to-32 beamsplitter (top) and calculated intensity distribution of the 32 spots (bottom).

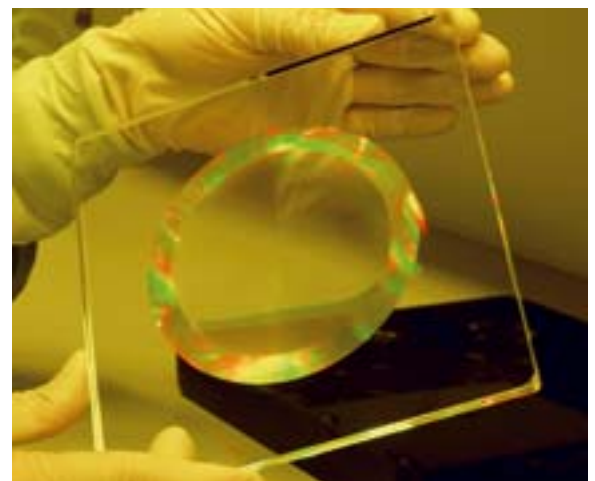
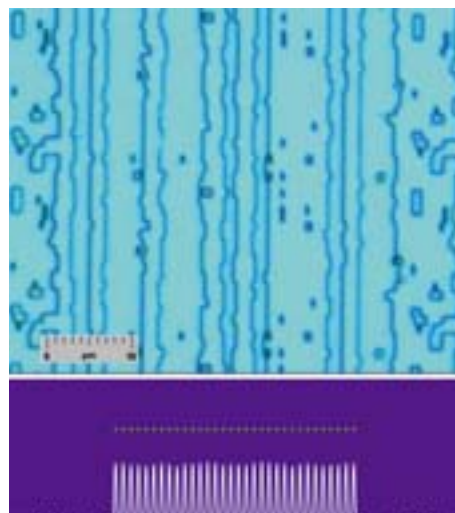


Abb. 2: Computer generiertes Hologramm für die interferometrische Prüfung von Asphären für ein Astro-Teleskop.

Fig. 2: Computer generated hologram for interferometric testing of an aspherical telescope mirror.

# fs-Laser geschriebene Faser-Bragg-Gitter für integrierte Faserlaser



Jens Thomas<sup>1</sup>



Elodie Wikszak<sup>1</sup>



Christian Voigtländer<sup>1</sup>



Stefan Nolte<sup>1</sup>



Andreas Tünnermann<sup>1,2</sup>

Faser-Bragg-Gitter (FBG) sind periodische Brechzahlmodifikationen des Faserkerns, die Licht einer bestimmten Wellenlänge reflektieren (Abb. 1). Analog zum dielektrischen Spiegel ist die Zentralwellenlänge der schmalbandigen Reflexion durch die Periode des FBG festgelegt. FBG für Anwendungen in der Telekommunikation werden herkömmlicherweise per Excimer- oder frequenzverdoppeltem Argon-Ionen-Laser in photosensitive Faserkerne belichtet. Dazu ist eine zeitaufwendige chemische Vorbehandlung des Faserkerns nötig, wie zum Beispiel die Anreicherung mit Wasserstoff. Bei aktiv dotierten Fasern, wie sie für Faserlaser eingesetzt werden, geraten diese Verfahren jedoch an ihre Grenzen, einerseits durch größere Kerndurchmesser, andererseits durch die bereits hohe Dotierung des Fasermaterials mit Seltenerdionen. Deshalb werden bisher für Faserlaser die FBG in eine passive Faser belichtet, die anschließend mit der aktiven Faser verbunden wird. Dieser Ansatz hat zwei Nachteile, zum einen die auftretenden Verluste bei der Verbindung von aktiver und passiver Faser, zum anderen Leistungsbegrenzungen durch die photoempfindliche Faser.

Diese Schwierigkeiten können mit Hilfe ultrakurzer Laserpulse überwunden werden. Fokussiert man ultrakurze Laserpulse in transparentes Material, kann man lokal im Fokus die optischen Eigenschaften wie zum Beispiel den Brechungsindex permanent ändern. Weil die Brechungsindexmodifikation auf nichtlinearer Absorption beruht, spielt die Photoempfindlichkeit nur eine untergeordnete Rolle.

Auf diese Weise lassen sich flexibel vergrabene Wellenleiter im Innern verschiedenster Gläser und Kristalle realisieren.

Die Anwendung reicht von frequenzverdoppelnden Wellenleitern /1/ bis hin zu komplexen dreidimensionalen Wellenleiterarrays /2/.

Mittels ultrakurzer Pulse können FBG nun auch in hochdotierte Fasern eingeschrieben werden. Allerdings muss der Laserfokus, im Gegensatz zu herkömmlichen Techniken, präzise auf den Faserkern ausgerichtet werden. Nur im Fokus ist die Leistungsdichte hoch genug, um den Brechungsindex durch nichtlineare Absorption permanent zu ändern. Für die periodische Modulierung der Brechzahl entlang der Faser wird vor der Faser ein Phasengitter angebracht. Das Phasengitter wurde zuvor mittels Elektronenstrahlolithographie in einem Quarzglassubstrat hergestellt. Beim Einschreiben des FBG wird der Laserstrahl nur in eine Richtung mit einer Zylinderlinse fokussiert, und zwar senkrecht zur Faser und parallel zum Phasengitter. Um dennoch die hohen Leistungsdichten im Bereich von  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> im Fokus zu erreichen, benötigt man z. B. 50 fs kurze Pulse mit mehr als 200  $\mu$ J Pulsenergie. Dies kann mit einem modernen »Chirped Pulse Amplification« (CPA)-System erreicht werden.

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

<sup>2</sup> Fraunhofer IOF

# fs-laser written fiber Bragg gratings for integrated fiber lasers



Fiber Bragg gratings (FBG) are periodical modifications of the fiber core and reflect light at a specific wavelength (Fig. 1). The central wavelength of the narrowband reflection can be precisely tuned with the period of the FBG analog to dielectric mirrors. The usual technique to fabricate FBG for telecommunication applications is to expose a photosensitive fiber core to the interference pattern of an excimer or a frequency doubled Argon-Ion-laser. In order to have a photosensitive fiber core, it is necessary to prepare it chemically using a time-consuming process e.g. hydrogen loading. This technique comes to its limit with actively doped fibers, which are used for fiber lasers, due to bigger core diameters and the high doping concentration of rare earth ions. The common solution for fiber lasers is to fabricate the FBG in a passive fiber and to splice this to the active fiber afterwards. This exhibits two drawbacks, the additional losses due to the joint between active and passive fiber and the power limitations of the photosensitive fiber material.

These difficulties can be overcome by using ultra short laser pulses. If such intense pulses are focused inside a transparent material, it is possible to permanently alter the optical properties such as the refractive index locally within the focal volume. Because the induced modification is based on nonlinear absorption a photosensitivity of the material is not required.

Using this approach buried waveguides in various glasses and crystals have been realized. Applications range from frequency doubling in waveguides /1/ to complex three-dimensional waveguide arrays /2/.

With ultra short pulses, FBG can also be directly inscribed in highly doped fibers. In contrast to conventional techniques, the laser focus has to be aligned precisely to the fiber core. Only within the focus the intensity is high enough to induce nonlinear absorption for a permanent change of the refractive index. To get a periodical modulation of the refractive index along the fiber, a phase grating is placed before the fiber. This phase grating has been fabricated beforehand using electron lithography and ion beam etching. For the inscription of the FBG the laser beam is only focused perpendicular to the fiber and parallel to the phase mask. In order to obtain the high intensity of  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> necessary for nonlinear modifications one needs e.g. 50 fs short pulses with more than 200 μJ pulse energy – easily obtainable with a modern Chirped Pulse Amplification (CPA) System.

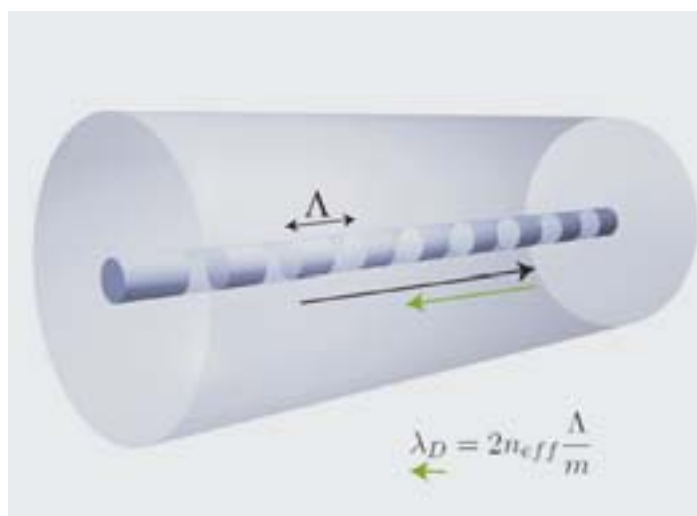


Abb. 1:  
Schema eines Faser-Bragg-Gitters.

Fig. 1:  
Schematic of a fiber Bragg grating.

Zum Einschreiben des FBG wird die Faser mit dem Phasengitter mit einer Geschwindigkeit von 4 mm/min unter dem Laserstrahl bewegt (Abb. 2). Auf diese Weise kann man FBG beliebiger Länge herstellen /3/. Dabei spielt die chemische Zusammensetzung der Faser keine Rolle. Die Einschreibung von FBG direkt in aktive seltenerd-dotierte Fasern wird dadurch ermöglicht /4/.

Für die Anwendung in einem Faserlaser (Abb. 3) wurde zum Beispiel ein FBG mit einer Periode von  $0,717 \mu\text{m}$  in eine polarisationserhaltende mit Ytterbium dotierte Faser eingeschrieben. Je nachdem, welche Polarisationsrichtung das Licht besitzt, wird es entweder bei  $1043,26 \text{ nm}$  oder  $1043,5 \text{ nm}$  schmalbandig ( $\text{FWHM} < 0,05 \text{ nm}$ ) reflektiert. Die Spektren zeigt Abb. 4. Die Faser wurde dann in einem integrierten Faserlaser getestet, der mit einer Halbleiterdiode bei  $978 \text{ nm}$  gepumpt wurde. Als Resonatorspiegel dienten an einem Faserende das hochreflektive FBG und die breitbandige Fresnelreflexion am anderen Ende /5/.

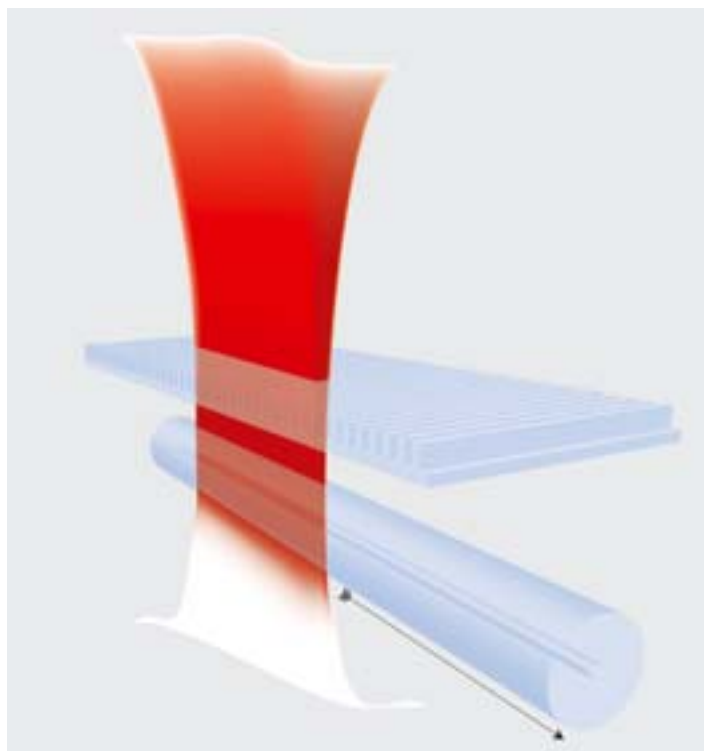
Da die FBG direkt in die Faser integriert sind, stellen sie essentielle Komponenten für die nächste Generation kompakter und hochstabiler Faserlaser dar. Der größte Vorteil des Einschreibens mit ultrakurzen Pulsen liegt darin, dass verschiedenste Fasern, inklusive aktiv dotierte Fasern, mit großem Kernquerschnitt erschlossen werden können. Solche Fasern sind insbesondere als Komponenten für industrielle Hochleistungsfaserlaser wichtig.

#### Literatur:

- /1/ Thomas, J.; Heinrich, M.; Burghoff, J.; Ancona, A.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Femtosecond laser-written quasi-phase-matched waveguides in lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.* 91, 151108 (2007).
- /2/ Szameit, A.; Kartashov, Y. V.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Torner, L.: Observation of Two-Dimensional Surface Solitons in Asymmetric Waveguide Arrays, *PRL* 98, 173903 (2007).
- /3/ Thomas, J.; Wikszak, E.; Clausnitzer, T.; Fuchs, U.; Zeitner, U.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique, *Appl. Phys. B* 86, 153–157 (2007).
- /4/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating, *Optics Letters* 31, 2390–2392 (2006).
- /5/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Klingebiel, S.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Linearly polarized ytterbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg gratings, *Optics Letters* 32, 2756–2758 (2007).

Abb. 2:  
Prinzip des Einschreibens der FBG  
mit ultrakurzen Pulsen.

Fig. 2:  
Principle of the inscription of FBGs  
with ultra short pulses.





For the inscription of the FBG, fiber and phase grating are synchronously moved with a velocity of 4 mm/min with respect to the laser beam (Fig. 2). This way, FBGs of arbitrary length can be written /3/. As the fiber material plays only a minor role the inscription of FBGs into rare earth doped fibers is possible /4/.

For use in a fiber laser setup (Fig. 3), a FBG with a period of 0.717  $\mu\text{m}$  has been inscribed into a polarization maintaining Ytterbium doped fiber. Depending on the polarization, light is reflected with a very narrow bandwidth (FWHM < 0.05 nm) at 1043.26 nm or 1043.5 nm respectively (Fig. 4). The fiber has been tested in an integrated fiber laser which has been pumped with a laser diode at wavelength of 978 nm. We used the highly reflective FBG at one end of the fiber and the broadband fresnel reflection at the other end of the fiber as cavity mirrors /5/.

Because the FBGs can now be written into active fibers, they represent essential components for the next generation of compact and stable fiber lasers. The advantage of ultra short pulses is that FBGs can be inscribed directly into various highly doped fibers with large core diameters. Such fibers are currently used in industrial high power fiber lasers.

#### References:

- /1/ Thomas, J.; Heinrich, M.; Burghoff, J.; Ancona, A.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Femtosecond laser-written quasi-phase-matched waveguides in lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.* 91, 151108 (2007).
- /2/ Szameit, A.; Kartashov, Y. V.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Torner, L.: Observation of Two-Dimensional Surface Solitons in Asymmetric Waveguide Arrays, *PRL* 98, 173903 (2007).
- /3/ Thomas, J.; Wikszak, E.; Clausnitzer, T.; Fuchs, U.; Zeitner, U.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique, *Appl. Phys. B* 86, 153–157 (2007).
- /4/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating, *Optics Letters* 31, 2390–2392 (2006).
- /5/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Klingebiel, S.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Linearly polarized ytterbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg gratings, *Optics Letters* 32, 2756–2758 (2007).

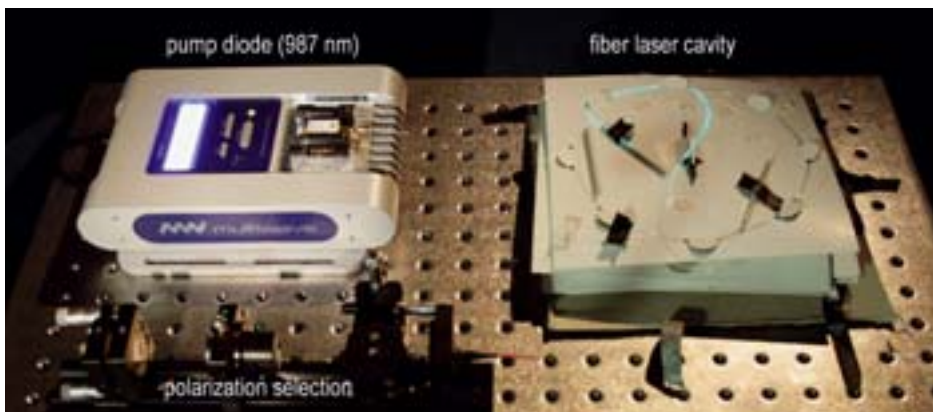


Abb. 3:  
Aufbau des linear polarisierten Faserlasers.

Fig. 3:  
Setup of the linearly polarized fiber laser.

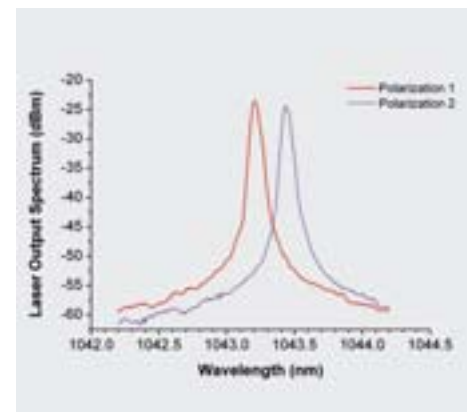


Abb. 4:  
Ausgangsspektrum  
des Ytterbium dotierten Faserlasers.

Fig. 4:  
Output spectrum of the Ytterbium doped  
fiber laser.



Arkadi Chipouline <sup>1</sup>



Carsten Schmidt <sup>1</sup>



Thomas Pertsch <sup>1</sup>



Thomas Käsebier <sup>1</sup>



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



Oleg Egorov <sup>2</sup>



Falk Lederer <sup>2</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

Optische Mikroresonatoren, die in verschiedenen Geometrien realisiert werden können (z. B. Mikrokugel-, Mikrodisk-, Mikroring- und Mikrotoroidresonatoren <sup>1–3</sup>) erfuhren in den letzten Jahren stetig wachsendes Interesse. Gründe dafür sind unter anderem die möglichen Anwendungen solcher Strukturen in der nächsten Generation opto-elektronischer Bauelemente, wie z. B. »Add-Drop«-Filter, Mikrolaser, Wellenlängenkonverter, Sensoren, um nur einige Beispiele zu nennen <sup>4–5</sup>. Des Weiteren bieten Mikroresonatoren eine ausgezeichnete experimentelle Grundlage für die Untersuchung verschiedenster fundamentaler linearer und nichtlinearer physikalischer Phänomene, nicht nur in der Optik <sup>6–7</sup>. Mikroresonatoren zeigen unverhältnismäßig hohe Gütefaktoren von gewöhnlich  $10^8$  (mit etwas mehr Aufwand bis zu  $10^{11}$ ), wodurch sich nichtlineare Effekte schon bei sehr geringen Pumpleistungen (in Größenordnungen von Milliwatt) beobachten lassen, was mit anderen Strukturen praktisch nicht möglich ist.

Aufgrund der Feldverteilung innerhalb des Resonators (das elektromagnetische Feld ist entlang der inneren Grenzfläche stark lokalisiert) nennt man die Resonanzen eines Mikroresonators mit Zylinder- oder Kugelsymmetrie »Whispering-Gallery-Moden«.

Zur effektiven Anregung solcher Moden verwendet man eine getaperte (verjüngte) Faser, deren Durchmesser so weit verringert wurde, dass einerseits Phasenanpassung zwischen Resonatormode und Fasermode vorliegt und andererseits der evaneszente Anteil der Fasermode außerhalb des Claddings signifikant ist. Bringt man den Fasertaper nah genug an die Resonatoroberfläche (Abb. 1), können beide Moden über ihre evaneszenten Felder miteinander koppeln und Energie austauschen.

Die Resonanzen eines Mikroresonators werden dabei indirekt über die Transmission durch den Fasertaper bestimmt, sie sind als Einbrüche im Transmissionspektrum sichtbar. Führt man einen Wellenlängenscan von kleinen zu großen Wellenlängen durch, kommt es bei ausreichender Pumpleistung zu einer asymmetrischen Verbreiterung der Resonanzkurve mit einer sehr steilen Flanke bei höheren Wellenlängen.

Führt man den Wellenlängenscan von großen zu kleinen Wellenlängen durch, ist keine Verbreiterung zu beobachten, es tritt eine typische Lorentzresonanz auf (Abb. 2). Dieses Verhalten ist ein deutliches Zeichen optischer Bistabilität, auf deren Grundlage beispielsweise opto-optische Schalter realisiert werden können.





Optical microresonators of different topologies (microsphere, microdisc, microring and microtoroid resonators /1–4/) attracted a lot of interest the last decade. The potential application of such structures in the next generation of opto-electronic devices such as add-drop filters, micro lasers, wavelength converters, and sensors, to name just a few examples /5–6/. Furthermore, the microresonators provide a convenient laboratory for the investigation of fundamental linear and nonlinear physical phenomena, appearing not only in optics /7–8/. Such microresonators show unprecedentedly high Q-factors – up to  $10^{11}$  in best cases and about  $10^8$  routinely – which allows reaching thresholds for various nonlinear effects at rather low excitation powers of the order of milliwatts, which is practically impossible with other optical systems.

Due to the specific spatial field distribution inside the resonator (the electromagnetic field is strongly localized just underneath the resonator's surface), the resonances possessing cylindrical or spherical symmetry are called "whispering-gallery-modes".

For an effective excitation of these modes a tapered fiber is used. In such fiber its diameter is adiabatically reduced to several microns in order to provide phase matching between the resonator mode and the fiber mode as well as to push a significant evanescent part of the fiber mode out of the cladding. Bringing the tapered fiber close to the surface of the resonator (Fig. 1) both modes can exchange energy due to the overlap of their evanescent fields.

Measuring the taper transmission the modes of the microresonator can be observed as resonance dips in the transmission spectrum. Realizing a wavelength scan from smaller to longer wavelengths with sufficient input power an asymmetric resonance broadening with an abrupt rise at the longer wavelength side occurs.

Carrying out the wavelength scan from longer to smaller wavelengths no resonance broadening could be observed and a typical Lorentz dip appears (Fig. 2). This behavior is a clear sign of optical bistability, on which basis opto-optical switches could be realized.

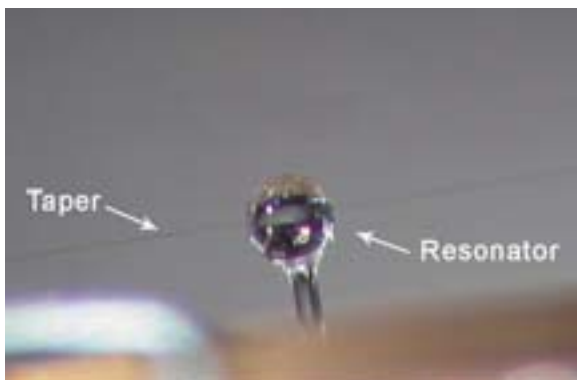
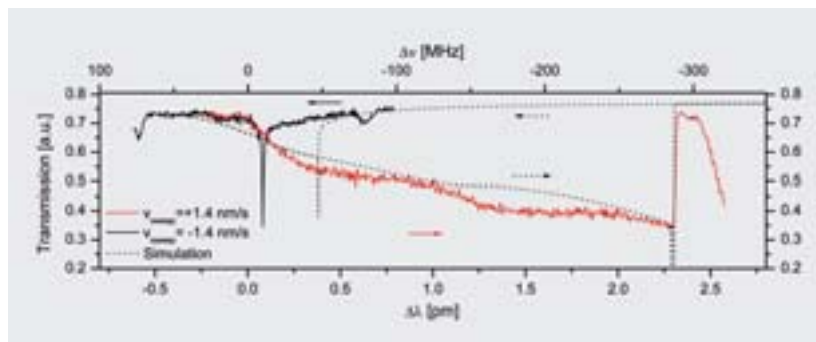


Abb. 1: Mikrokugelresonator mit Fasertaper zur Anregung von »Whispering-Gallery-Moden«.

Fig. 1: Microsphere resonator with tapered fiber for excitation of "whispering-gallery-modes".

Abb. 2: Optische Bistabilität der Resonatormoden aufgrund einer richtungsabhängigen Resonanzverbreiterung.

Fig. 2: Optical bistability of resonator modes due to a resonance broadening which is sweeping direction dependent.



Das Hauptaugenmerk der Arbeiten liegt auf der Untersuchung gekoppelter Mikroresonatoren in Form von Mikrodisk- (Abb. 3) und Mikrokugelresonatoren (Abb. 4) im linearen und nichtlinearen Pumplleistungsregime. Im linearen Fall sollen Lokalisierungen des Lichts innerhalb der Struktur aufgrund von zufälligen (herstellungsbedingten) Parametervariationen benachbarter Resonatoren untersucht werden (in Analogie zur in der Festkörperphysik bekannten Anderson-Lokalisierung). Im nichtlinearen Fall treten Effekte auf, die im Umfeld der raum-zeitlichen nichtlinearen Dynamik dissipativer Systeme untersucht werden. Dieser Teil der nichtlinearen Dynamik ist von großem Interesse, da die hier benutzten Modelle zur Beschreibung gekoppelter Resonatoren auch auf andere physikalische und nichtphysikalische Systeme angewendet werden können, deren experimentelle Untersuchung jedoch weitaus schwieriger bzw. nicht vollständig möglich ist.

Die Transmissionsspektren gekoppelter Resonatoren unterscheiden sich (auch im linearen Fall) deutlich von den Transmissionsspektren einzelner Resonatoren. Abbildung 5 verdeutlicht dies am Beispiel zweier sich berührender Mikrokugelresonatoren (dargestellt ist die Energie im inneren beider Resonatoren über der normierten Frequenz, die proportional zum Verhältnis von Radius und Wellenlänge des verwendeten Lichts ist). Gegenüber einem einzelnen Resonator, bei dem im abgebildeten Bereich nur ein Resonanzpeak auftritt, spaltet die Resonanz für gekoppelte Kugeln in viele einzelne Resonanzpeaks bei unterschiedlichen Frequenzen auf. Die mehrfache Entartung der Moden, die im einzelnen Resonator vorliegt, wird durch die Kopplung der beiden Resonatoren aufgehoben. Ein Modell zur Beschreibung gekoppelter Mikrokugelresonatoren beruht dabei auf der

Entwicklung der elektromagnetischen Felder in vektor-sphärische-harmonische Funktionen (VSH) /8–9/, welche die Feldverteilung entsprechender Eigenmoden im Resonator beschreiben.

Durch die Verwendung der Translations-eigenschaften der VSH können die Eigenmoden beliebig im Raum positionierter Mikrokugelresonatoren in einem Koordinatensystem beschrieben werden, wodurch die Wechselwirkung der verschiedenen Moden untereinander berechnet werden kann. Die Berechnungen können dabei je nach Größe der Resonatoren und der verwendeten Wellenlänge sehr umfangreich sein, da sehr viele Moden miteinander koppeln.

Im Allgemeinen beschränkt man sich daher bei exakten Berechnungen auf wenige, verhältnismäßig kleine Resonatoren. Bei der Verwendung eines analogen Modells für gekoppelte Mikrodiskresonatoren muss man sich auf eine zweidimensionale Betrachtung beschränken, da die Moden eines dreidimensionalen Diskresonators nicht analytisch bestimmt werden können. Nichtsdestotrotz können die grundlegenden Effekte der Kopplung auch in einem zweidimensionalen Modell beschrieben werden.

Teile dieser Arbeit werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert (Forschergruppe 532 Projekt C).

#### Literatur:

- /1/ Vahala, K. J.: Optical microcavities, *Nature* 424, (2003) 839–846.
- /2/ Johnson, T. J.; Borselli, M.; Painter, O.: Self-induced optical modulation of the transmission through a high-Q silicon microdisc resonator, *Opt. Express* 14, (2006) 817–831.
- /3/ Armani, D. K.; Kippenberg, T. J.; Spillane, S. M.; Vahala, K. J.: Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip, *Nature* 412, (2001) 925–928.
- /4/ Matsko, A. B.; Ilchenko, V. S.: Optical resonators with whispering-gallery modes – part II: applications, *IEEE J. Sel. Quant. Electr.* 12, (2006) 15–32.
- /5/ Armani, A. M.; et al.: Label-Free, Single-Molecule Detection with optical microcavities, *Science* 317, (2007) 783–787.
- /6/ Matsko, A. B.; Ilchenko, V. S.: Optical resonators with whispering-gallery modes – part I: basics, *IEEE J. Sel. Quant. Electr.* 12, (2006) 3–14.
- /7/ Mookherjee, S.; Yariv, A.: Kerr-stabilized super-resonant modes in coupled-resonator optical waveguides, *Phys. Rev. E* 66, (2002) 046610.
- /8/ Rakovich, Y. P.; et al.: Fine Structure of coupled optical modes in photonic molecules, *Phys. Rev. A* 70, (2004) 051801.
- /9/ Miyazaki, H.; Jimba, Y.: Ab initio tight-binding description of morphology-dependent resonance in a biosphere, *Phys. Rev. B* 62, No. 12, (2000) 7976–7997.

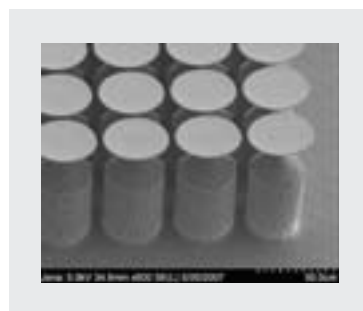


Abb. 3:  
Array von Mikrodiskresonatoren.

Fig. 3:  
Array of microdisc resonators.

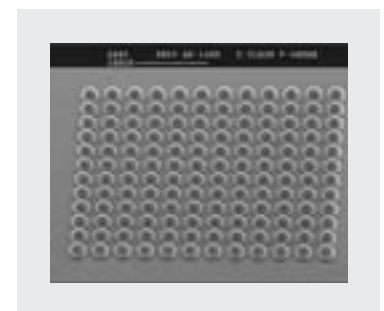


Abb. 4:  
Array von Mikrokugelresonatoren.

Fig. 4:  
Array of microspheres resonators.



The main topic of our research is the investigation of arrays of coupled microresonators in form of microdiscs (Fig. 3) and microspheres (Fig. 4) in linear and nonlinear operation modes. In the linear case effects of light localization due to small random parameter variations (from the fabrication of the samples) are investigated (in analogy with the Anderson localization in solid state physics). In the nonlinear case the appearing effects can be described in the framework of the general approach of spatio-temporal nonlinear dynamics in dissipative systems. This part of nonlinear dynamics is of great interest due to the fact that the models used to describe coupled resonators can also be applied to other physical systems, where experimental realization is much more complicated or can not be performed at all.

The transmission spectra of coupled resonators strongly differ from those of a single resonator (even in the linear case). Figure 5 illustrates this fact for two microsphere resonators in contact, where the internal energy inside of both resonators is shown as a function of the normalized frequency which is proportional to the ratio of resonator size and wavelength of light. In comparison with a single resonance peak occurring

for an uncoupled resonator, for the coupled spheres the resonance splits in many peaks at various frequencies. Due to the coupling of both resonators the manifold degeneracy of the modes breaks up. For the description of coupled microsphere resonators a model is used where the electromagnetic field is expanded in so called vector spherical harmonics (VSH) [8–9], which are eigenmode solution for a single microsphere.

Using translational transformation properties of the VSH the eigenmodes of resonators placed arbitrary in space could be described in one coordinate system and therefore the interaction of different modes can be calculated. Depending on the size of the resonators and the wavelength used the calculations can be very expensive. Therefore, exact calculations are restricted to only a few and relatively small resonators.

Using a similar model for the coupled microdisc resonators, one is restricted to a two dimensional description because the eigenmodes of a 3D disc resonator can not be obtained analytically. Nevertheless, general effects of the coupling can be discussed in a 2D model as well.

Parts of this work were funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (research unit 532 project C).

#### References:

- /1/ Vahala, K. J.: Optical microcavities, *Nature* 424, (2003) 839–846.
- /2/ Johnson, T. J.; Borselli, M.; Painter, O.: Self-induced optical modulation of the transmission through a high-Q silicon microdisc resonator, *Opt. Express* 14, (2006) 817–831.
- /3/ Armani, D. K.; Kippenberg, T. J.; Spillane, S. M.; Vahala, K. J.: Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip, *Nature* 412, (2001) 925–928.
- /4/ Matsko, A. B.; Ilchenko, V. S.: Optical resonators with whispering-gallery modes – part II: applications, *IEEE J. Sel. Quant. Electr.* 12, (2006) 15–32.
- /5/ Armani, A. M.; et al.: Label-Free, Single-Molecule Detection with optical microcavities, *Science* 317, (2007) 783–787.
- /6/ Matsko, A. B.; Ilchenko, V. S.: Optical resonators with whispering-gallery modes – part I: basics, *IEEE J. Sel. Quant. Electr.* 12, (2006) 3–14.
- /7/ Mookherjea, S.; Yariv, A.: Kerr-stabilized super-resonant modes in coupled-resonator optical waveguides, *Phys. Rev. E* 66, (2002) 046610.
- /8/ Rakovich, Y. P.; et al.: Fine Structure of coupled optical modes in photonic molecules, *Phys. Rev. A* 70, (2004) 051801.
- /9/ Miyazaki, H.; Jimba, Y.: Ab initio tight-binding description of morphology-dependent resonance in a biosphere, *Phys. Rev. B* 62, No. 12, (2000) 7976–7997.

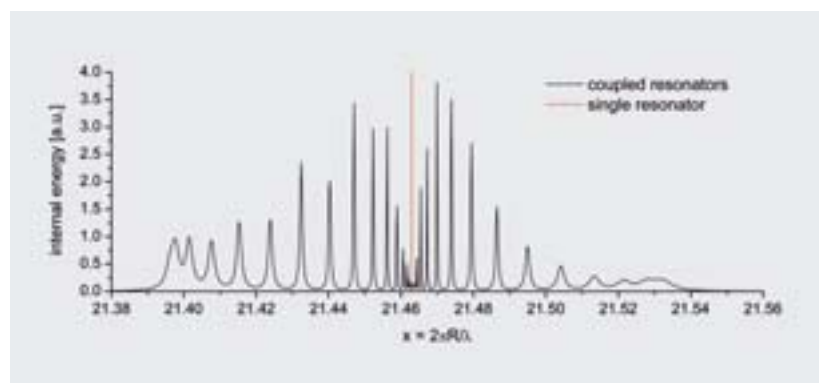


Abb. 5: Resonanzaufspaltung durch Kopplung zweier identischer Mikrokugelresonatoren (die rote Linie markiert die Resonanzposition für einen einzelnen Resonator).

Fig. 5: Splitting of resonances due to coupling of two identical microsphere resonators (the red line marks the position of the single resonator resonance).

# 3D-Strukturierung von Lithiumniobat



Holger Hartung<sup>1</sup>



Ernst-Bernhard Kley<sup>1,3</sup>



Thomas Gischat<sup>2</sup>



Frank Schrempel<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik, Friedrich-Schiller-Universität Jena
- <sup>2</sup> Institut für Festkörperphysik, Friedrich-Schiller-Universität Jena
- <sup>3</sup> Fraunhofer IOF

Lithiumniobat ist aufgrund seiner speziellen Eigenschaften ein vielseitig interessantes optisches Material, dessen Strukturierung aber eine große Herausforderung darstellt. Lithiumniobat zeigt eine starke Widerstandsfähigkeit gegenüber Standard-Ätzverfahren, was es erschwert, hochpräzise Strukturen mit Strukturgrößen im Nanometerbereich sowie senkrechten Wänden zu realisieren, wie sie zum Beispiel für Photonische Kristalle benötigt werden.

Abbildung 1 zeigt eine Photonische Struktur, welche als abstimmbare Wellenleiterstruktur dient. Die angegebenen Dimensionen sind auf eine Wellenlänge von  $1,55 \mu\text{m}$  optimiert. Die laterale Wellenleitung wird durch eine sogenannte photonic-band-gap-Struktur erreicht, welche aus Löchern von  $300 \text{ nm}$  Durchmesser bei einem Lochabstand von  $620 \text{ nm}$  besteht. Für die vertikale Führung des Lichts innerhalb der Wellenleiterschicht ist ein Indexhub von mehr als  $0,4$  zu den oben und unten angrenzenden Materialien notwendig, was durch einen Luftschlitz unterhalb der Lithiumniobat-Membran gewährleistet wird. Die Membran selbst sollte eine Dicke von  $400 \text{ nm}$  haben, um eine monomodige Ausbreitung zu garantieren. Die Herstellung dieses Elements muss in zwei Schritten erfolgen: Herstellung der Löcher sowie Realisierung des Luftschlitzes.

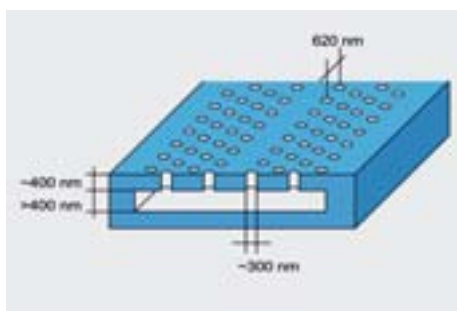


Abb. 1: Modell einer Photonischen Kristallstruktur in Lithiumniobat.

Fig. 1: Model of a photonic crystal structure to be fabricated in lithium niobate.

Ein viel versprechender neuer Ansatz für die hochpräzise Strukturierung von Lithiumniobat ist das ionenunterstützte Ätzen (Ion Beam Enhanced Etching – IBEE). Dieses Verfahren besteht aus zwei Schritten: der Amorphisierung des Kristalls durch Ionenimplantation und dem anschließenden Herauslösen der amorphen Bereiche (Abb. 2). Im ersten Schritt wird das Lithiumniobat-Substrat mit hochenergetischen Ionen bestrahlt, welche in den Kristall eindringen und durch Stöße mit den Gitteratomen Defekte verursachen. Oberhalb eines bestimmten Schwellwerts der Defektkonzentration kann das Lithiumniobat im zweiten Schritt durch nasschemisches Ätzen in Flusssäure entfernt werden.

Die Verteilung der Defekte, welche von den implantierten Ionen verursacht werden, hängt von der Ionenmasse, der Ionenenergie, der Ionenfluenz und der Dichte des Substratmaterials ab. Ionen mit hoher Energie dringen tiefer in den Kristall ein und erzeugen eine maximale Defektkonzentration in tieferen Regionen als Ionen mit geringer Energie. Abbildung 3 zeigt die simulierte Defektkonzentration in Lithiumniobat, aufgetragen über der Tiefe bei der Implantation mit Argonionen verschiedener Energie. Die Simulation zeigt deutlich, wie sich das Maximum der Defektkonzentration bei steigender Ionenenergie verschiebt. Diese Abhängigkeit kann zur Erzeugung einer amorphen Schicht bestimmter Dicke genutzt werden. Um das Substrat von der Oberfläche bis zu der bestimmten Tiefe zu amorphisieren, muss eine mehrfache Implantation mit verschiedenen Ionenenergien erfolgen. Die schwarze Linie in Abb. 3 ist die Summendefektkonzentration nach einer Implantation in vier Schritten mit den dargestellten Ionenenergien. Mit dieser Vorgehensweise kann der Kristall von der Oberfläche bis zu einer Tiefe von  $500 \text{ nm}$  amorphisiert werden.



Lithium niobate is a versatile optical material because of its special properties. The structuring of the crystalline material is a very challenging task. It shows a high resistance against standard dry and wet etching processes, which makes it difficult to realize feature sizes in the nanometer range with high accuracy and sharp vertical profiles as are needed e.g. for photonic band gap structures.

Figure 1 shows an example of a photonic structure which could serve as a tunable wave guiding device. The feature sizes are optimized for a wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$ . The lateral wave guiding is achieved by a photonic band gap structure. This structure consists of holes with a diameter of 300 nm and a hole distance of 620 nm. For trapping the light vertically inside the guiding layer an index-step of more than 0.4 is necessary. This is realized by an air slit below the lithium niobate membrane. The membrane itself should have a thickness of about 400 nm to ensure mono mode guiding. The fabrication of the device must be divided into two steps, the fabrication of the holes and the fabrication of the air slit.

A promising new approach for highly-precise structuring of lithium niobate is Ion Beam Enhanced Etching (IBEE). This process contains two steps: the amorphization of the crystal by ion implantation and, following, the removal of the amorphized regions (Fig. 2). For the first step the lithium niobate substrate is exposed to high energy ions. These ions penetrate into the crystal, lose energy by colliding with the crystal atoms and cause defects. Above a specific defect concentration the lithium niobate can be removed, in a second step, by wet chemical etching in hydrofluoric acid.

The defect concentration, which is caused by the implanted ions, depends on the ion mass, the ion energy, the ion fluency and the density of the substrate material. Ions with high energy generate a maximum defect concentration in deeper regions, with respect to the sample surface, than ions with low energy. Figure 3 shows the simulated defect concentration in lithium niobate as a function of the depth after the implantation of argon ions of several ion energies. The simulation illustrates how the depth of maximum defect concentration increases with increasing

ion energy. This dependence can be used to generate amorphous regions of defined thickness in a defined depth. In order to amorphize the lithium niobate crystal beginning from its surface down to a specific depth the implantation has to be done in several steps using several ion energies. The black line in Fig. 3 shows the sum defect concentration after four implantation steps assuming four different ion energies as given in the graph. With this implantation regime the crystal can be made amorphous from its surface down to a depth of about 500 nm.

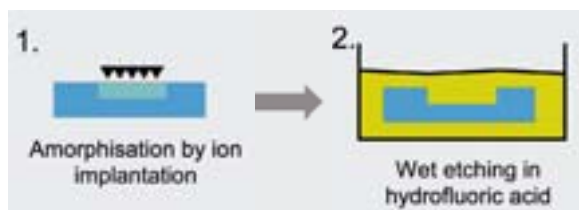
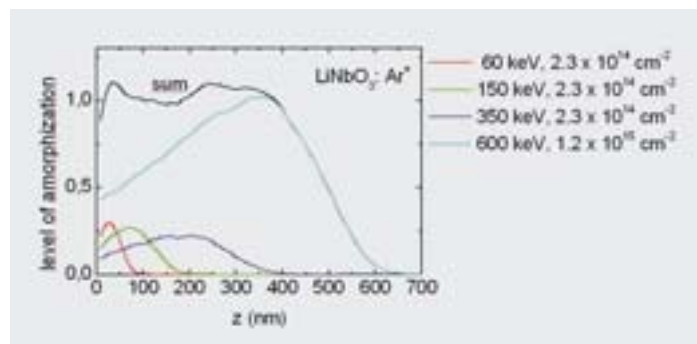


Abb. 2: Die zwei Schritte des Ion Beam Enhanced Etching Prozesses.

Fig. 2: The two steps of Ion Beam Enhanced Etching.

Bild 3: Simulierte Defektkonzentration bei Bestrahlung mit 60, 150, 350 und 600 keV Argonionen.

Fig. 3: Simulated defect concentration of 60, 150, 350, and 600 keV argon ions.



Der zweite Prozessschritt – das nass-chemische Ätzen der amorphen Bereiche – erfolgt mit einer 3,7-prozentigen Flußsäurelösung in einem Ultraschallbad bei 40 °C. Bei diesen Bedingungen beträgt die Ätzrate für vollständig amorphes Lithiumniobat 120 nm/min, im Gegensatz zu 0,1 nm/min für das kristalline Material. Daraus ergibt sich ein Ätzratenkontrast von über 1 000 : 1.

Für die Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen, wie in Abb. 1 dargestellt, ist es notwendig, lateral ein Muster von amorphen und kristallinen Bereichen zu erzeugen. Dies wurde durch das Aufbringen einer strukturierten Maske auf dem Substrat realisiert. Die Bereiche, welche durch die Maske bedeckt sind, sind während des Implantationsschritts gegen die hochenergetischen Ionen geschützt. Um einen ausreichenden Schutz zu gewährleisten, ist es notwendig, dass die Maske dicker ist als die Eindringtiefe der Ionen in die Maskenschicht. Für die verwendeten Prozessparameter ergibt sich eine erforderliche Maskendicke von mindestens 500 nm oder 800 nm für Chrom beziehungsweise Quarzglas.

Für die Herstellung photonischer Elemente wurde Quarzglas als Maskenmaterial verwendet, welches mittels Elektronenstrahlolithographie und Ätzen strukturiert wurde. Es wurden Löcher mit einem Durchmesser von 400 nm und einer Tiefe von 500 nm in Lithiumniobat hergestellt (Abb. 4). In Abbildung 4a erkennt man senkrechte Seitenwände, welche mit herkömmlichen Ätzverfahren nicht herstellbar gewesen wären.

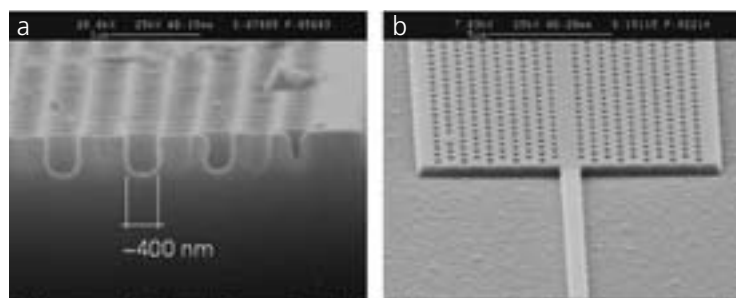
Die Herstellung des Luftschlitzes erfolgt durch Implantation von Helium-Atomen bei einer Temperatur von 100 K, um thermische Effekte bei der Implantation zu unterdrücken. Abbildung 5 zeigt die Defektkonzentration bei einer Ionenenergie von 200 keV bzw. 325 keV. Die Defektkonzentration steigt mit zunehmender Tiefe an und hat ihr Maximum bei 700 nm bzw. 950 nm Tiefe. Da die Defektkonzentration in der Nähe der Oberfläche gering ist, gibt es dort eine ungeschädigte und damit kristalline Schicht, deren Dicke von der Ionenenergie und der Ionenfluenz abhängt. Um die Schädigung innerhalb der Schicht gering zu halten, muss die Fluenz gering genug sein. Dadurch verringert sich die Ätzrate auf 30 nm/min.

Durch Variation von Ionenenergie und Ionenfluenz konnten sowohl Lithiumniobat-Membranen als auch Luftschlitze mit Dicken von 200 nm bis 600 nm hergestellt werden (Abb. 6).

Die experimentellen Ergebnisse zeigen eindrucksvoll, dass IBEE zur Erzeugung hochauflöser photonischer Strukturen benutzt werden kann, was die Realisierung verschiedener photonischer Elemente ermöglicht. Um Strukturen wie das Wellenleiterelement in Abb. 1 zu realisieren, ist es notwendig, die Herstellung der Löcher und des Luftschlitzes zu kombinieren, was momentan experimentell durchgeführt wird.

Abb. 4:  
Photonic-band-gap-Strukturen,  
hergestellt mittels IBEE.

Fig. 4:  
Photonic-band-gap structures fabricated by IBEE.





The second IBEE step – the wet chemical etching of the amorphized regions – has been done using hydrofluoric acid with an acid concentration of 3.7 % at a temperature of 40 °C in an ultrasonic bath. At these conditions the measured etching rate for completely amorphous lithium niobate is 120 nm/min, compared to 0.1 nm/min for the crystalline lithium niobate. This corresponds to a contrast of more than 1000 : 1 for the etching process.

For fabrication of micro- and nano-structures as shown in Fig. 1 it is necessary to create a lateral pattern of partly amorphous and partly crystalline material. We realized this by applying a patterned mask layer on top of the substrate. Those regions that are covered by the mask material are protected against the high energy ions during the implantation step. In order to ensure sufficient protection the mask layer must be thicker than the penetration depth of the ions into the mask layer. For our process parameters

a minimum thickness of 500 nm and 800 nm was found for chromium and fused silica, respectively. The patterning of the mask itself can be done by photo- or electron beam lithography and standard etching processes. For the fabrication of photonic elements fused silica is used as mask material, which was structured by electron beam lithography and reactive ion etching. Holes with a diameter of 400 nm and a depth of 500 nm were fabricated in lithium niobate (Fig. 4). The image shows very vertical sidewalls which cannot be achieved with standard etching techniques.

The fabrication of the air slit was achieved using helium ions for implantation at a temperature of 100 K to avoid thermal effects on the implantation. Figure 5 shows the defect concentration at energies of 200 keV and 325 keV. The defect concentration increases with increasing depth with a maximum at a depth of 700 nm or 950 nm, respectively. Since the defect

concentration is low near the surface, there is an almost undisturbed and therefore still crystalline layer remaining at the sample surface. Its thickness depends on the ion energy and the fluency. To avoid serious damage within this layer the ion fluency must be low enough. This means that the etching rate decreases to 30 nm/min. By varying ion energy and ion fluency lithium niobate membranes with a thickness of 200 nm to 600 nm, and air slits with a thickness of 200 nm to 600 nm were fabricated (Fig. 6).

It has been impressively demonstrated how the IBEE can be used to realize small feature sized photonic structures, enabling the creation of various photonic devices. To create a structure like the wave guiding device in Fig. 1 it is necessary to combine the fabrication of the holes and the air slits. The experimental demonstration is still in progress.

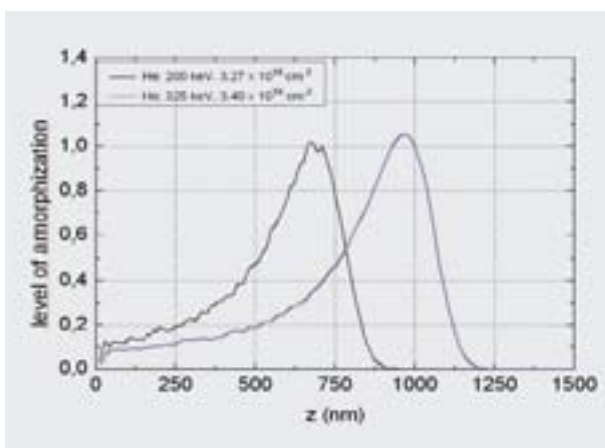


Bild 5:  
Defektkonzentration,  
verursacht durch 200 keV und 325 keV Heliumionen bei 100 K.

Fig. 5:  
Defect concentration caused by 200 keV and 325 keV helium ions at 100 K, respectively.

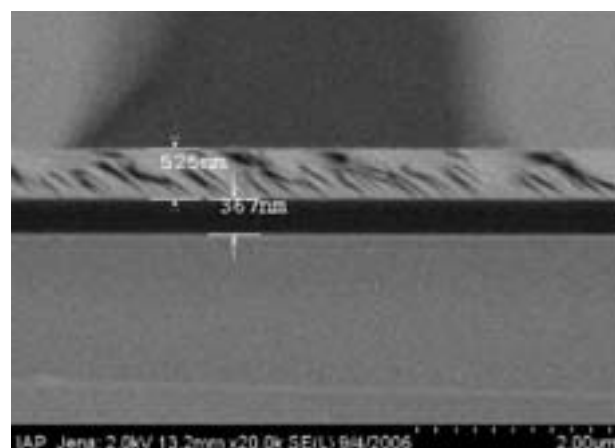


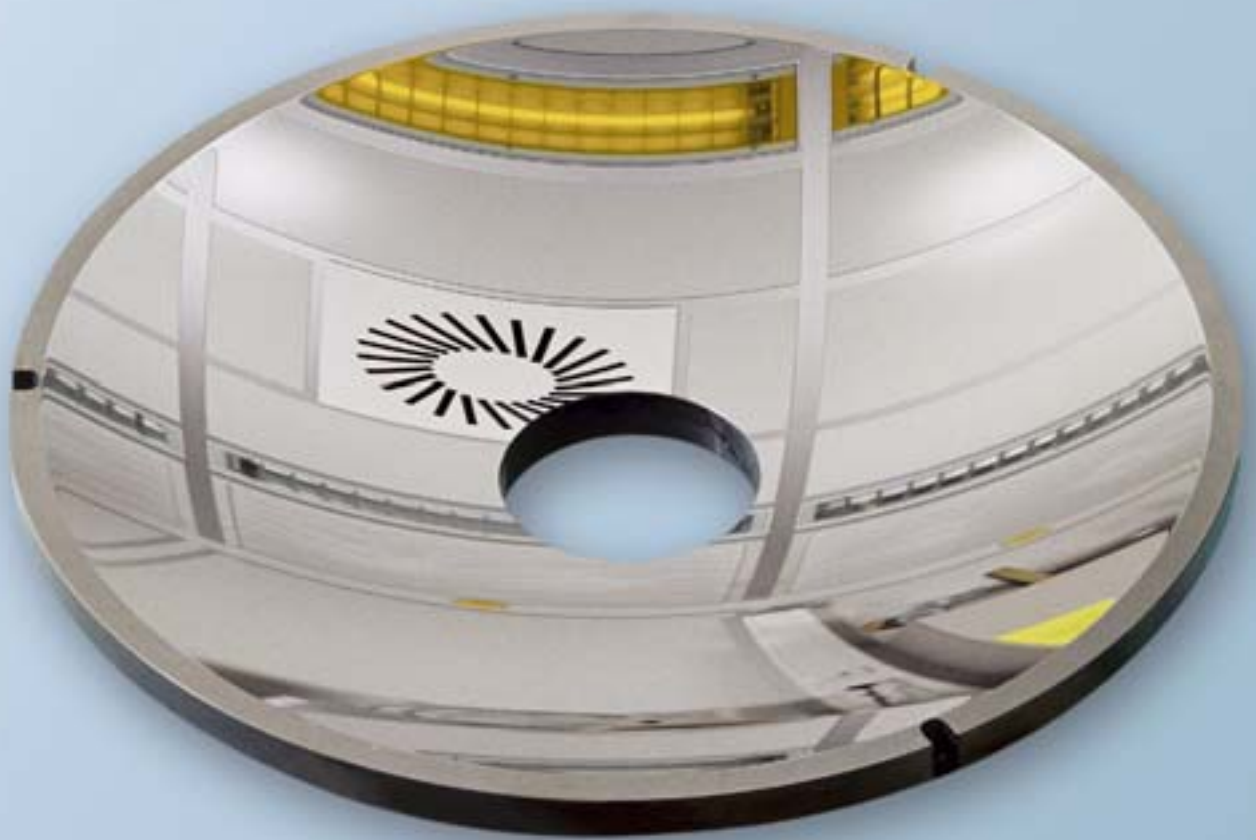
Bild 6:  
REM-Bilder der hergestellten Membran und des Luftschlitzes.

Fig. 6:  
SEM picture of the fabricated membrane and air slit.

# Multifunktionale optische Schichten

## Multi-functional Optical Coatings







Sergiy Yulin



Torsten Feigl



Nicolas Benoit



Marko Perske



Elena Taracheva



Sophie Schröder



Viatcheslav Nesterenko



Norbert Kaiser

## Einleitung

Die Optikentwicklung fokussiert sich seit einigen Jahren zunehmend auf Optikkomponenten für immer kürzere Wellenlängen  $\lambda$ . Getriggert wird dieser Trend zum einen von der Forderung nach Erhöhung des Auflösungsvermögens optischer Systeme und zum anderen von der zunehmenden Verfügbarkeit leistungsfähiger Strahlquellen im extrem ultravioletten (EUV) und weichen Röntgenbereich. Herausragende Anwendungen von Optiken im genannten Spektralbereich sind unter anderem die EUV-Lithographie ( $\lambda = 13,5$  nm), Mikroskopie im »Wasserfenster« ( $\lambda = 2,3$  nm ... 4,4 nm), Astronomie ( $\lambda = 15$  nm ... 100 nm), Spektroskopie, Plasmadiagnostik, Röntgenlaser und zukünftig XFELs /1/.

Sowohl das  $\lambda/4$ -Schichtsystem als auch das ideale Bragg-Gitter sind bekannte Design-Ansätze um durch konstruktive Interferenz eine möglichst hohe Reflexion an Grenzflächen zu erhalten. Hierbei führt das  $\lambda/4$ -Schichtsystem für nichtabsorbierende Materialien zu einer maximalen Reflexion bei minimaler Schichtanzahl. Allerdings ist wegen der im EUV und weichen Röntgenbereich nicht vernachlässigbaren Absorption die hier erreichbare Reflexion weit geringer als bei HR-Systemen im visuellen und infraroten Spektralbereich. Interferenz-Schichtsysteme für den EUV und weichen Röntgenbereich werden oft als Multilayerspiegel bezeichnet und durch Abscheidung alternierender Schichten unterschiedlicher Brechzahlen hergestellt. Die optischen Eigenschaften werden hauptsächlich durch die Wahl geeigneter Materialien bestimmt, die möglichst ideale Grenzflächen bilden sollen. Eine herausragende Eigenschaft von Multilayern ist ihre Abscheidbarkeit

auf gekrümmten Substraten, wodurch verschiedenste optische sowie spektrale Anforderungen realisiert werden können.

Während der vergangenen zehn Jahre wurden am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF Jena zahlreiche hochreflektierende Multilayerspiegel für Anwendungen im EUV und weichen Röntgenbereich entwickelt und optimiert (Abb. 1). Voraussetzungen hierfür sind ein grundlegendes Verständnis von Schichtwachstumsprozessen, die Nutzung neuer Designansätze zur Minimierung von Rauheit und Interdiffusion an den Schichtgrenzflächen sowie die Weiterentwicklung verschiedener Beschichtungstechnologien. Im Folgenden soll der erreichte Stand der Entwicklung hochreflektierender Multilayerspiegel für verschiedenste Anwendungen in einem weiten Spektralbereich im EUV und weichen Röntgenbereich am Fraunhofer IOF Jena dargestellt werden.

## Spektralbereich von 40 nm bis 120 nm

Der Spektralbereich von 40 nm bis 120 nm ist wegen seiner zahlreichen Emissionslinien von Himmelskörpern für astrophysikalische Anwendungen interessant. Aluminiumschichten mit einer schützenden Deckschicht aus Magnesiumfluorid ( $MgF_2$ ) und/oder Lithiumfluorid (LiF) erreichen hohe theoretische Reflexionen von bis zu 90 % jenseits der Absorptionskanten von  $MgF_2$  bei 115 nm bzw. LiF bei 105 nm. Dicke Einzelschichten aus Silizium (Si), Siliziumkarbid ( $SiC$ ) und Borkarbid ( $B_4C$ ) können ebenfalls als Breitbandreflektoren im Spektralbereich von 50 nm bis 120 nm eingesetzt werden.



## Introduction

The demand to enhance optical resolution has pushed the search for technological innovations and improvements. Induced mainly by this aim, optics development in recent years has been focused on components for electromagnetic radiation with increasingly shorter wavelengths  $\lambda$ . The good prospects of extreme ultraviolet radiation and soft X-rays (EUV/soft X-rays) to be applied in next generation lithography systems ( $\lambda = 13.5$  nm), microscopy in the "water window" ( $\lambda = 2.3$  nm – 4.4 nm), astronomy ( $\lambda = 15$  nm – 100 nm), spectroscopy, plasma diagnostics and EUV/soft X-ray laser research have led to considerable progress in the development of different sources and reflective optics for this spectral range [1].

The quarter-wave stack and the ideal Bragg crystal are two well-known geometrical designs using constructive interference phenomena to obtain high reflectance. For the case when absorption can be neglected for both materials, the quarter wave stack can provide maximum reflectance with a minimum number of layers. In the EUV/soft X-ray range, absorption is always present and some energy is dissipated inside the multilayer stack; therefore the ideal quarter-wave stack design cannot be as effective as it is in the visible range. Multilayer interference coatings for operation in EUV/soft X-ray range, often referred to as multilayer mirrors, are prepared by depositing alternating nanometer layers of two materials of different refractive index that form long-term stable interfaces. The optical performance of multilayer interference mirrors is mainly optimized by the selection of suitable materials that form abrupt and smooth interfaces. The great advantage of multilayer mirrors

is that they can be applied to curved substrates for use in different imaging applications and simultaneously provide a well-defined spectral bandpass.

Over the last couple of years remarkable progress (Fig. 1) has been made in the development and improvement of high-reflectance multilayer mirrors for the EUV/soft X-ray spectral region at Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF. The progress is associated with deep understanding of the multilayer growth mechanisms, application of novel interface-engineered technologies for minimization of interface defects in multilayer stack and intensive development of modern deposition techniques. These advanced high-reflectance multilayer mirrors deposited on curved substrates are believed to satisfy today's demands in various application fields. The main aim of this article is to show current state and prospects of near normal - incidence EUV/soft X-ray multilayer technology at the Fraunhofer IOF.

## Spectral range from 40 nm to 120 nm

The spectral range from 40 nm to 120 nm includes many important spectral lines for astrophysics, solar physics and atmospheric physics. Aluminum films with a protective overcoating of magnesium fluoride ( $\text{MgF}_2$ ) or/and lithium fluoride (LiF) provide a high theoretical reflectance (up to 90 %) down to the absorption cutoffs of 115 nm for  $\text{MgF}_2$  and 105 nm for LiF. The single silicon (Si), silicon carbide (SiC) and boron carbide ( $\text{B}_4\text{C}$ ) films can also be successfully used as broadband reflectors in the spectral range from 50 nm to 120 nm.

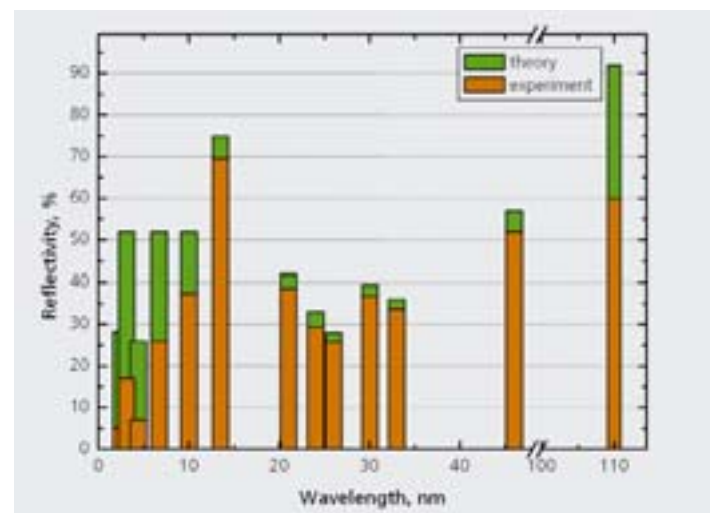


Abb. 1: Vergleich von theoretischer und gemessener Reflexion von Multilayerspiegeln in einem Spektralbereich von 2 nm bis 110 nm.

Fig. 1: Comparison of theoretical and measured reflectance in the spectral range from 2 nm to 110 nm.

Abbildung 2 zeigt das optische Spektralverhalten von Al/LiF, Al/LiF/MgF<sub>2</sub> und Si-Schichtsystemen, die für eine maximale Reflexion bei einer Wellenlänge von 110 nm und einem Einfallswinkel von 45° optimiert wurden. Für ein Al/LiF/MgF<sub>2</sub>-Schichtsystem wurde eine Reflexion von 60 % erreicht /2/. Scandium/Silizium (Sc/Si) gilt als die optimale Materialpaarung für hochreflektierende Multilayerspiegel im Wellenlängenbereich von 35 nm bis 50 nm. Bisher wurde eine maximale Reflexion von R = 52 % mit einer Bandbreite von FWHM = 4.6 nm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 46,0$  nm gemessen (Abb. 3). Wegen der hohen Absorption in diesem Wellenlängenbereich beträgt die Anzahl der Schichtperioden nur N = 20. Sowohl Reflexion

als auch thermische Stabilität können durch Minimierung von Interdiffusionsprozessen an den Schichtgrenzflächen erhöht werden. Dies wurde durch den Einsatz ultradünner Barrierschichten einer Dicke von  $d = 0,5$  nm ... 0,7 nm erreicht /3/.

### Spektralbereich von 13 nm bis 35 nm

Multilayerspiegel auf Silizium-Basis, ein Material mit geringer Absorption bei Wellenlängen jenseits der Si L-Absorptionskante bei  $\lambda = 12,4$  nm, werden vor allem bei Kollektor- und Abbildungsoptiken für die EUV-Lithographie (EUVL) eingesetzt.

So wird die derzeitige technologische Ausreizung physikalischer Grenzen von Mo/Si Multilayern für 13,5 nm durch die extremen Anforderungen an EUVL-Optiken motiviert. Die optischen Eigenschaften von Mo/Si Multilayern stehen in direktem Zusammenhang zur Struktur der Grenzflächen: Die Verbreiterung der Grenzflächen durch Interdiffusionsprozesse und Rauheitsentwicklungen tragen signifikant zu einer Reflexionsminderung bei (Abb. 4). Durch Wahl geeigneter Barrierschichtmaterialien mit nachfolgender Interdiffusionsminimierung wurde eine maximale Reflexion von 69,6 % erreicht (Abb. 5).

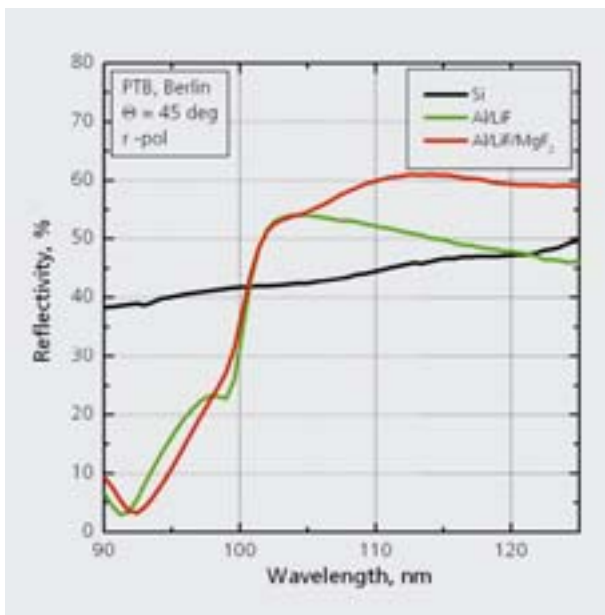


Abb. 2: Reflexion von Al/LiF, Al/LiF/MgF<sub>2</sub> und Si in einem Spektralbereich von 90 nm bis 125 nm.

Fig. 2: Reflectance of Al/LiF, Al/LiF/MgF<sub>2</sub> and Si coatings in the spectral range from 90 nm to 125 nm.

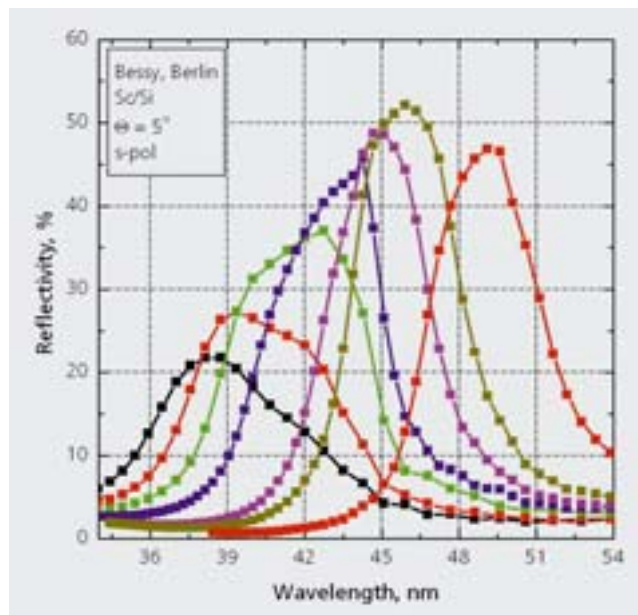


Abb. 3: Reflexion von Sc/Si Multilayerspiegeln für verschiedene Wellenlängen in einem Spektralbereich von 36 nm bis 54 nm.

Fig. 3: Reflectance of Sc/Si multilayer mirrors designed at different wavelengths in the spectral range from 36 nm to 54 nm.



Figure 2 shows the experimental optical performances of Al/LiF, Al/LiF/MgF<sub>2</sub> and Si coatings optimized for maximum reflectance at the wavelength of 110 nm and operated at the incidence angle of 45 degrees. The maximum reflectance of 60 % was achieved on Al/LiF/MgF<sub>2</sub> coatings [2].

The Sc/Si material couple is a promising candidate for high-reflectance normal incidence multilayer coatings in the wavelength range from 35 nm to 50 nm. Maximum experimental reflectance of R = 52 % with FWHM = 4.6 nm at λ = 46.0 nm is achieved by Sc/Si mirrors (Fig. 3). Due to high absorption in this spectral range, the required number of bilayers (N) in multilayer design is about 20. The

reflective properties and thermal resistance of Sc/Si multilayer mirrors can be enhanced by reduction of interdiffusion processes on interfaces. This could be accomplished by the introduction of super-thin (0.5 nm–0.7 nm) diffusion barriers between the scandium and silicon layers [3].

### Spectral range from 13 nm to 35 nm

Multilayer structures that contain silicon in particular, a material that has relatively low absorption at wavelengths longer than the Si L-absorption edge (λ = 12.4 nm), have found broad application in optics for EUV

lithography (EUVL), solar physics and plasma physics. Nowadays the optical improvement of Mo/Si multilayer mirrors for the wavelength of 13.5 nm is mainly stimulated by EUVL requirements. The reflective properties of Mo/Si multilayers are directly correlated to the structure of the interface; broadening of interface due to interdiffusion processes and roughness development (Fig. 4) significantly reduces the reflective properties. The maximum reflectance of 69.6 % is achieved through minimization of interdiffusion intermixing by the use of diffusion barriers (Fig. 5).

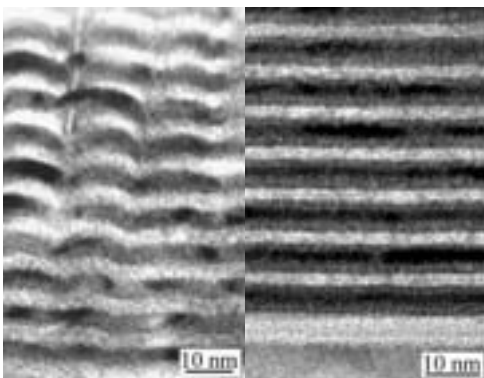


Abb. 4: Grenzflächenrauheit (links) und Interdiffusion (rechts) in Mo/Si Multilayern.

Fig. 4: Interface roughness (left) and diffusion intermixing (right) in Mo/Si multilayers.

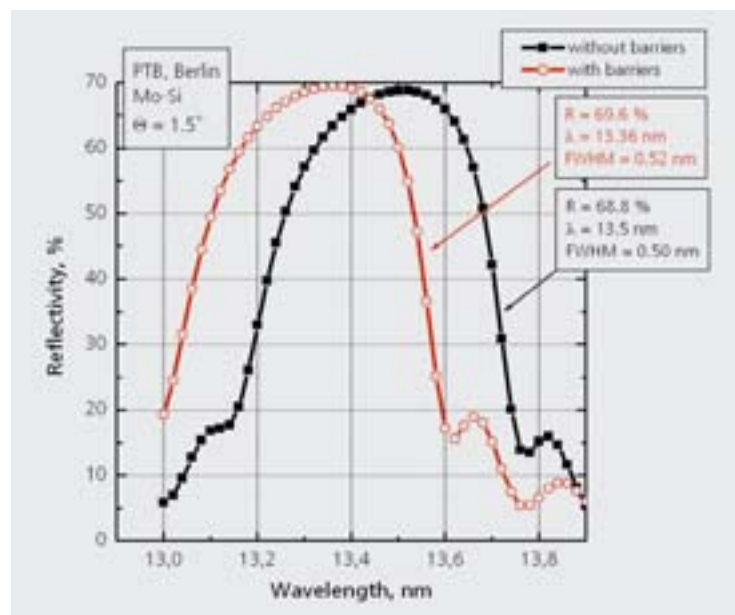


Abb. 5: Reflexion von Mo/Si ohne und mit Barrierschichten für EUVL.

Fig. 5: Reflectance of standard and interface-engineered Mo/Si multilayer mirrors for EUVL.

Abbildung 6 zeigt die maximal gemessenen Reflexionen optimierter Mo/Si Multilayerspiegel im Spektralbereich 13,5 nm ... 34,0 nm. Durch Erweiterung des Standard-Mo/Si-Designs zu einem Dreischichtsystem wurde eine Reflexionserhöhung im Bereich 25 nm ... 35 nm erreicht (Abb. 7). Neben höchstmöglicher Reflexion von Mo/Si Multilayerspiegeln ist deren Stabilität gegenüber thermischer sowie EUV-Strahlenbelastung von großem praktischen Interesse /4/.

### Spektralbereich von 6 nm bis 12 nm

Für Wellenlängen unterhalb der Si L-Absorptionskante werden gegenwärtig zahlreiche hocheffiziente Multilayersysteme entwickelt. Anwendungen sind hierbei Optiken für Freielektronen-Röntgenlaser (XFEL) und

Plasmaphysik. Wegen ihrer optischen Konstanten werden gegenwärtig vor allem Multilayer auf Basis von Bor-Verbindungen in einem Wellenlängenbereich von 6,7 nm ... 11 nm eingesetzt. Wie in Abb. 8 dargestellt, können mit B<sub>4</sub>C-Multilayerspiegeln Reflexionen von 10,2 % (N = 80) bzw. 26 % (N = 200) erreicht werden.

Die typische Bandbreite hochreflektierender B<sub>4</sub>C-Multilayerspiegel mit N = 200 beträgt FWHM ~ 0,04 nm. Eine Reflexionserhöhung ist auch hier durch den Einsatz ausgewählter Interdiffusionsbarriereschichten möglich. Für eine Wellenlänge von 10,0 nm wurden Reflexionen von R = 37,4 % bei einem Einfallswinkel von 1,5° bzw. 43,8 % bei 45° gemessen (Abb. 9).

### Spektralbereich von 2,5 nm bis 5 nm

Der Spektralbereich des sogenannten Wasserfensters erstreckt sich zwischen den K-Absorptionskanten von Sauerstoff bei  $\lambda = 2,33$  nm und Kohlenstoff bei  $\lambda = 4,37$  nm und ist besonders für die Röntgenmikroskopie von Interesse. Während der vergangenen Jahre wurden hochreflektierende Multilayerspiegel auf Basis von Scandium (Sc) sowie Titan (Ti) und Vanadium (V) entwickelt. Die optischen Eigenschaften von Multilayerspiegeln für den weichen Röntgenbereich werden vor allem von ihrer Grenzflächenstruktur bestimmt.

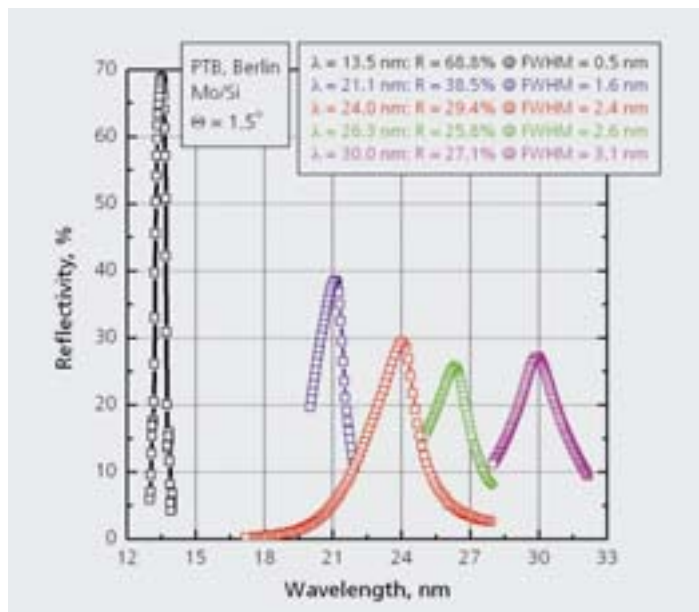


Abb. 6: Reflexion von Mo/Si im Spektralbereich von 13 nm bis 33 nm.

Fig. 6: Reflectance of Mo/Si multilayer mirrors in the spectral range from 13 nm to 33 nm.

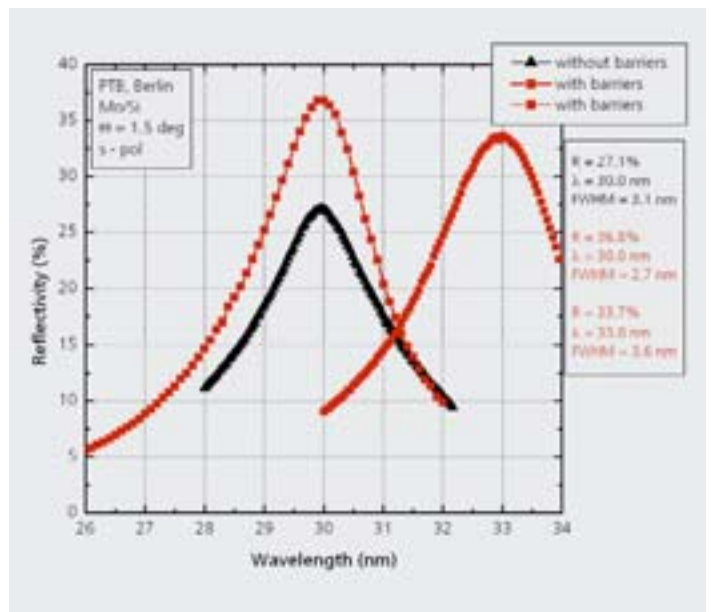


Abb. 7: Reflexion von Mo/Si ohne und mit Barrierschichten von 26 nm bis 34 nm.

Fig. 7: Reflectance of conventional Mo/Si and interface-engineered multilayer mirrors from 26 nm to 34 nm.



The common feature of EUVL multi-layer coatings is high requirements for thermal and radiation stabilities that has recently been studied and discussed [4]. The maximum achieved experimental reflectances of optimized Mo/S multilayer mirrors in the wavelength range from 13.5 nm to 34.0 nm are shown in Fig. 6. The transition from standard Mo/Si to enhanced three-layer design is frequently used to improve the coating reflectance in the spectral range from 25 nm to 35 nm (Fig. 7).

### Spectral range from 6 nm to 12 nm

At wavelengths shorter than the Si L-edge, a number of efficient new multilayer systems have currently developed mainly due to progress in free-electron X-ray lasers and physics of plasma diagnostics.

The optical constants of boron make it the best spacer material for the wavelengths from 6.7 nm to 11.0 nm. As shown 11.0 nm in Fig. 8, the reflectances of 10.2 % and 26 % can be achieved near boron K-absorption edge by B<sub>4</sub>C-based multilayer mirrors having 80 and 200 bilayers, respectively.

The typical bandpass (FWHM) of high-reflectance B<sub>4</sub>C-based coatings having N = 200 is ~ 0.04 nm. The reflective performance of B<sub>4</sub>C-based mirrors can be considerably enhanced by interface – engineered design (diffusion barriers). The reflectances of 37.4 % and 43.8 % at the wavelength of 10.0 nm were measured on interface – engineered mirrors designed at incidence angles of 1.5 and 45 degrees, respectively (Fig. 9).

### Spectral range from 2 nm to 5 nm

Much effort is being put into realizing high-reflectance multilayer coatings for the “water window” spectral range (2.33 nm–4.37 nm). The driving force is prospects of high-resolution microscopy in the “water window” and deep-space telescope. In last few years new high-reflectance multilayer structures on the basis of the Sc and 3d-transition metals (Ti and V) have been produced for operation in water window, between the carbon ( $\lambda = 4.4$  nm) and oxygen ( $\lambda = 2.4$  nm) K-edges.

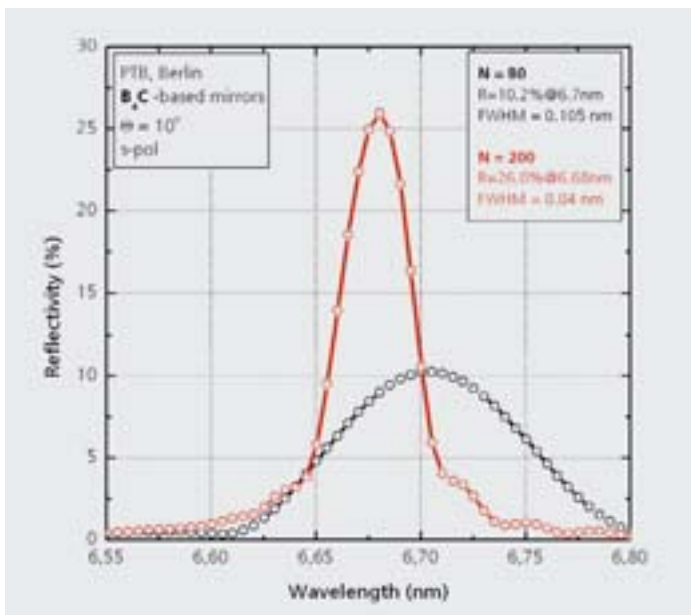


Abb. 8: Reflexion von Multilayern auf B<sub>4</sub>C-Basis an der B K-Absorptionskante.

Fig. 8: Reflectance of B<sub>4</sub>C-based multilayer mirrors close to the B K-edge.

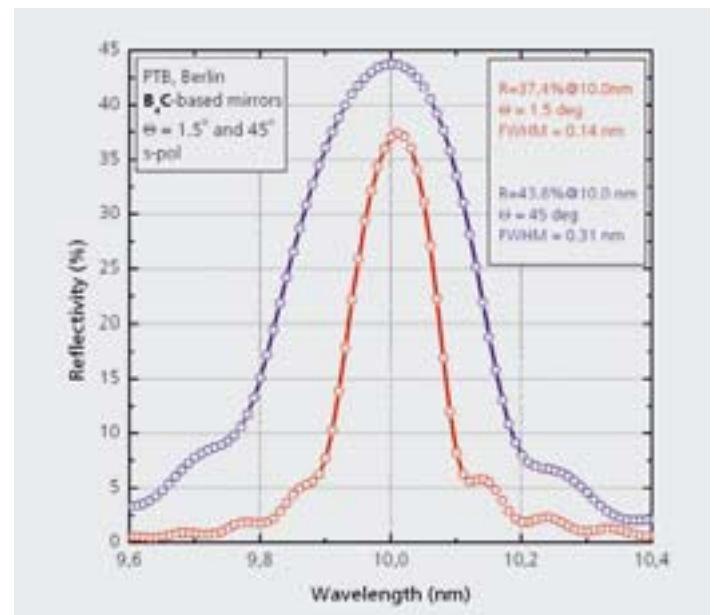


Abb. 9: Reflexion von barriereoptimierten Multilayern auf B<sub>4</sub>C-Basis für 10 nm.

Fig. 9: Reflectance of interface-engineered B<sub>4</sub>C-based multilayer mirrors designed for 10 nm.

Bisher wurde eine maximale Reflexion von  $R = 17,3\%$  bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 3,12\text{ nm}$  erreicht. Wegen der konstruktiven Interferenz von zahlreichen Grenzflächen ( $N = 400$ ) beträgt die spektrale Bandbreite nur  $\text{FWHM} = 0,008\text{ nm}$  (Abb. 10). Durch den Einsatz optimierter Barrierschichten bei Multilayerspiegeln auf Sc-Basis konnten Reflexionen von  $R = 15\%$  ( $N = 300$ ) und  $R = 20,2\%$  ( $N = 400$ ) bei einer Wellenlänge von  $3,12\text{ nm}$  nachgewiesen werden (Abb. 10). Die Reflexionserhöhung kann im Wesentlichen auf eine Glättung der Grenzflächen im Multilayer zurückgeführt werden (Abb. 11). Die Reflexion von Multilayerspiegeln auf V-Basis für eine Arbeitswellenlänge von  $\lambda = 2,44\text{ nm}$  konnte ebenfalls durch den Einsatz von Barrierschichten optimiert werden und erreicht derzeit  $R = 5,2\%$  (Abb. 11).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über sämtliche am Fraunhofer IOF Jena entwickelten EUV/Röntgen-Multilayerspiegel für einen Spektralbereich von  $2,5\text{ nm}$  bis  $130\text{ nm}$ .

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim BMBF (FKZ: 13N8917), DAAD (A/05/56634) sowie Cymer Inc. und Intel Corp. für die finanzielle Unterstützung der FuE-Arbeiten. Unser Dank gilt Ute Kaiser (Universität Ulm) für die TEM-Untersuchungen, Wieland Stöckl, Michael Scheler und Thomas Müller für die technische Unterstützung sowie dem Team um Frank Scholze und Christian Laubis (Physikalisch-Technische Bundesanstalt Berlin) für zahlreiche Reflexionsmessungen im EUV und weichen Röntgengebiet.

### Literatur:

- /1/ Yulin, S.: in N. Kaiser and H. Pulker (Eds.), Optical Interference Coatings, Springer Series in Photonics, 2003.
- /2/ Taracheva, E.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.: "High-performance multilayer coatings for  $106\text{ nm}$ ", SPIE 6705, 2007.
- /3/ Yulin, S.; Schäfers, F.; Feigl, T.; Kaiser, N.: "Enhanced reflectivity and stability of Sc/Si multilayers", SPIE 5193, 2003.
- /4/ Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.: "High-temperature multilayers", SPIE 5751, 2005.

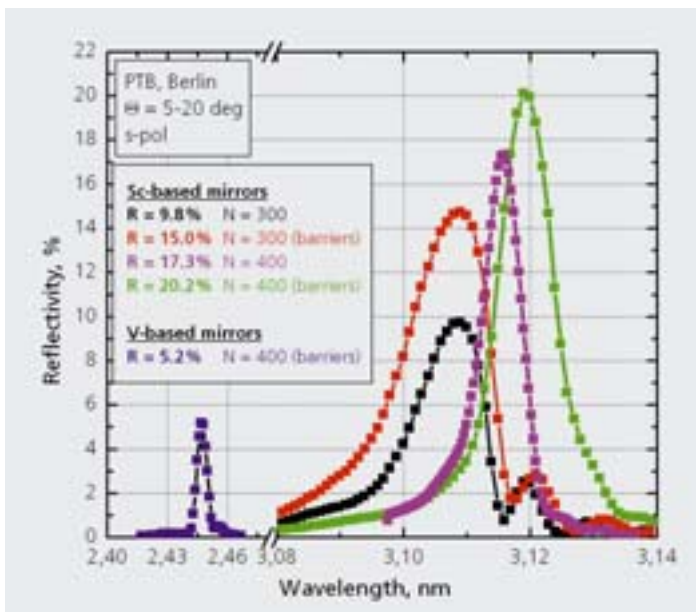


Abb. 10: Reflexionserhöhung von Multilayern auf Sc- und V-Basis durch Barrieroptimierung.

Fig. 10: Enhanced reflectance of Sc- and V-based multilayer mirrors with interface engineering.

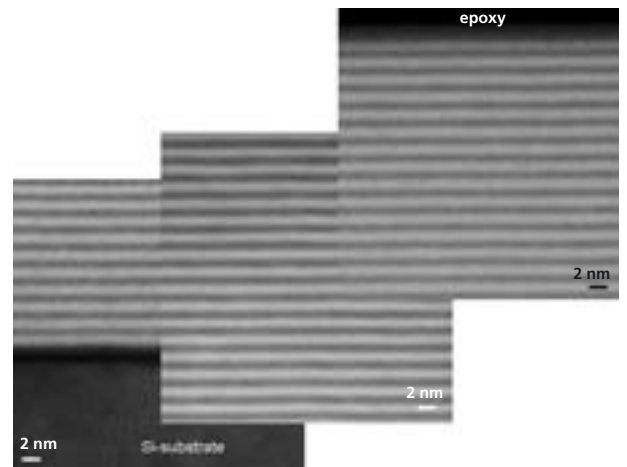


Abb. 11: Grenzflächenstruktur barrieroptimierter Multilayer auf Sc-Basis mit  $N = 300$  in Substratnähe (unten), in der Mitte des Stacks (Mitte) sowie in der Nähe der Oberfläche (oben).

Fig. 11: Interface structure of interface-engineered Sc-based multilayer having  $N = 300$  close to the substrate (down), in the middle of the stack (middle) and close to the surface (top).





The optical performance of such mirrors is extremely sensitive to the multilayer design and interface quality (mainly interface roughness). Up to now the maximum near-normal incidence reflectance of 17.3 % at the wavelength of 3.12 nm was achieved on Sc-based multilayer coating having 400 bilayers (Fig. 10).

Due to constructive interference from many interfaces, the spectral bandwidth is only 0.008 nm. To minimize interface roughness in Sc-based multilayer structures, interface-engineered designs were successfully realized. It was shown that interface-engineered Sc-based mirrors with 300 and 400 bilayers have peak reflectances of 15 % and 20.2 % at the wavelength of 3.12 nm, respectively (Fig. 10). The enhanced reflectance can be explained by interface roughness smothering inside interface-engineered multilayer stack as it is shown in Fig. 11.

Similar interface-engineered conceptions were applied to V-based multilayer mirrors designed at the wavelength of 2.44 nm and a near normal incidence reflectance of 5.2 % was achieved (Fig. 10).

Table 1 provides an overview of all EUV/Soft X-ray multilayer mirrors developed at Fraunhofer IOF Jena.

References:

- /1/ Yulin S.: in N. Kaiser and H. Pulker (Eds.), Optical Interference Coatings, Springer Series in Photonics, 2003.
- /2/ Taracheva, E.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.: "High-performance multilayer coatings for 106 nm", SPIE 6705, 2007.
- /3/ Yulin, S.; Schäfers, F.; Feigl, T.; Kaiser, N.: "Enhanced reflectivity and stability of Sc/Si multilayers", SPIE 5193, 2003.
- /4/ Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.: "High-temperature multilayers", SPIE 5751, 2005.

### Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support for this R&D work by BMBF (FKZ: 13N8917), DAAD (A/05/56634), Cymer Inc. and Intel Corp. The authors would like to thank Ute Kaiser (University of Ulm) for TEM studies, Wieland Stöckl, Michael Scheler and Thomas Müller for the technical support and the team of Frank Scholze and Christian Laubis (PTB Berlin) for the EUV/soft X-ray reflectivity measurements.

Tab. 1: EUV/Röntgen-Multilayerspiegel am Fraunhofer IOF Jena.

Tab. 1: EUV/soft X-ray multilayer mirrors at Fraunhofer IOF Jena.

Multilayer	$\lambda$ range	$\lambda$	N	R	FWHM
Al - based	70 ... 150 nm	110 nm	—	60.0 %	—
Sc - based	40 ... 50 nm	46 nm	20	52.0 %	4.6 nm
Si - based	12.4 ... 40 nm	33 nm	20	33.7 %	3.6 nm
		30 nm	20	36.8 %	2.7 nm
		26 nm	25	25.8 %	2.6 nm
		24 nm	30	29.4 %	2.4 nm
		21 nm	40	38.5 %	1.6 nm
Si - based	EUV lithography	13.5 nm	60	69.6 %	0.5 nm
B - based	6.4 ... 11.0 nm	10.0 nm	100	37.4 %	0.14 nm
		6.7 nm	200	26.0 %	0.04 nm
Sc - based	3.1 ... 4.4 nm	4.4 nm	300	7.1 %	0.021 nm
		3.1 nm	400	20.2 %	0.008 nm
V - based	2.4 ... 3.1 nm	2.5 nm	400	5.2 %	0.006 nm

# Hochtemperatur LPP Kollektorspiegel für die EUV-Lithographie



Torsten Feigl



Sergiy Yulin



Nicolas Benoit



Marko Perske



Hagen Pauer



Norbert Böwering<sup>1</sup>



Oleh Khodykin<sup>1</sup>



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



Norbert Kaiser

David Brandt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cymer Inc., 17075 Thornmint Ct., San Diego, CA 92127, United States

Die Ausgangsleistung und Lebensdauer von EUV-Quellen sowie die Lebensdauer von Kollektorspiegeln sind wesentliche Herausforderungen bei der industriellen Einführung der EUV-Lithographie. Um den industriellen Anforderungen an EUV-Kollektorspiegel gerecht zu werden, wurden am Fraunhofer IOF Jena in den vergangenen Jahren sowohl Reflexion als auch thermische Langzeitstabilität grundlegend verbessert /1/.

Elliptische Kollektorsubstrate verschiedener Materialien wie Siliziumkarbid und monokristallines Silizium mit einem Außendurchmesser von ca. 320 mm (entspricht einem Raumwinkel von 1,6 sr) wurden mit lateralen Hochtemperatur-Gradientensystemen beschichtet (Abb. 1). Design, Anforderungen, Geometrie sowie optische und opto-mechanische Spezifikationen sind in /2/ zusammengefasst. Die barriereoptimierten Mo/Si-Multilayerbeschichtungen sind für eine maximale Reflexion bei 13,5 nm und eine Arbeitstemperatur über 400 °C optimiert. Die EUV-Reflexion der Hochtemperatur-LPP-Kollektorspiegel wurde nach Tempern bei 400 °C für verschiedene Radien entlang vier orthogonaler Linien auf der Kollektoroberfläche in einem Wellenlängenbereich von 12,5 nm bis 14,5 nm

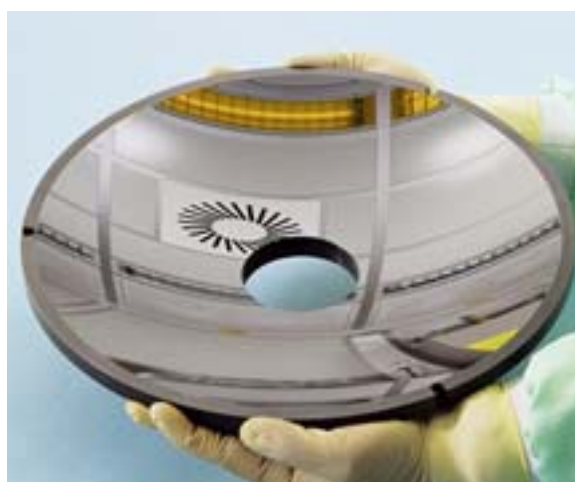
gemessen (Abb. 2). Hierbei erfolgten die Messungen jeweils unter den aus optischem Spiegeldesign und Fokus-Spiegel-Abstand berechneten Einfallswinkeln. Die gemessene Peakreflexion des Kollektorspiegels ist  $R_p \approx 57\%$ . Die thermische Stabilität der Beschichtung wurde während zahlreicher Temperzyklen bis 600 °C nachgewiesen (Abb. 3). Nach Langzeitnutzung der Kollektorspiegel im Quellenmodul konnte die ursprüngliche EUV-Reflexion durch ex-situ Reinigungsmethoden wiederhergestellt werden.

Die erfolgreiche Realisierung von Hochtemperatur-LPP-Kollektorspiegeln stellt einen wesentlichen Schritt für die industrielle Umsetzung des patentierten Hochtemperaturkollektorkonzepts dar und unterstreicht das Potential thermisch stabiler EUV-Multilayer für die EUV-Volumenproduktion.

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

Abb. 1:  
Hochtemperatur-LPP-Kollektorspiegel.

Fig. 1:  
High-temperature LPP collector mirror.





The source output power and its lifetime, including the collector optics lifetime, are key issues for EUV lithography systems. In order to meet the requirements for the EUV collector mirror both the reflectivity and the long-term thermal stability of its multilayer coating have been enhanced considerably during recent development efforts at Fraunhofer IOF Jena /1/.

Sub-aperture ellipsoidal collector substrates of different substrate materials such as silicon carbide and monocrystalline silicon with outer diameters of  $\approx 320$  mm, representing a solid collection angle of 1.6 sr, were coated with laterally graded high-temperature multilayers (Fig. 1).

Design considerations, requirements, collection geometry as well as optical and opto-mechanical design are summarized in /2/. The interface-engineered Mo/Si multilayer coatings were optimized in terms of high peak reflectivity at 13.5 nm and at working

temperatures above 400 °C. The EUV reflectivity of high-temperature mirrors after annealing at 400 °C was measured with s-polarized light for a series of points along four orthogonal lines over the collector CA within a wavelength range from 12.5 nm to 14.5 nm (Fig. 2). The respective angle of incidence was adjusted for each measurement point as calculated according to the optical mirror design and the distance from the focus to the mirror surface. The measured peak reflectance is up to  $R_p \approx 57\%$ . No degradation of the optical properties of these multilayer coatings occurred during both long-term heating tests and multiple annealing cycles (Fig. 3). After long-term operation in the source module the initial EUV reflectance of the multilayer-coated collector mirror could be recovered using ex-situ surface cleaning methods.

The successful realization of high-temperature sub-aperture collector mirrors represents a major step towards the implementation of the heated collector concept and illustrates the great potential of high-temperature-stable EUV multilayer coatings for HVM production.

We would like to thank Cymer Inc. for their financial support.

#### References:

- /1/ Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.; Böwering, N. R.; Khodykin, O. V.; Brandt, D.: High-temperature LPP collector mirror, Proceedings of SPIE Vol. 6151 (2006), ISBN 0-8194-6194-6.
- /2/ Böwering, N. R.; Ershov, A. I.; 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.

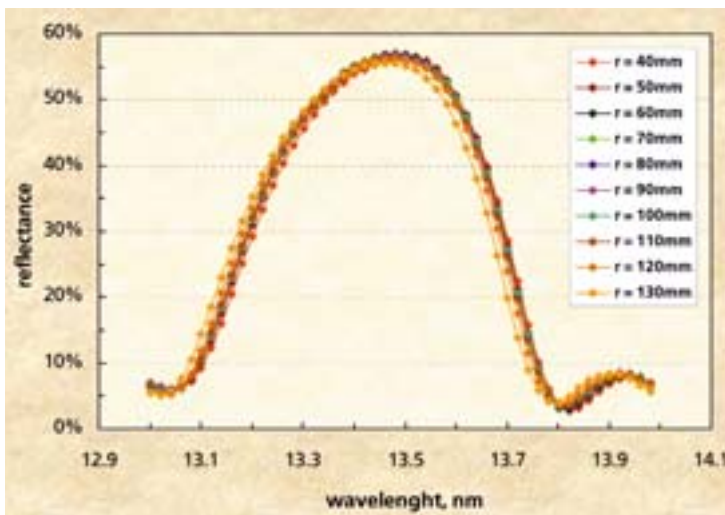
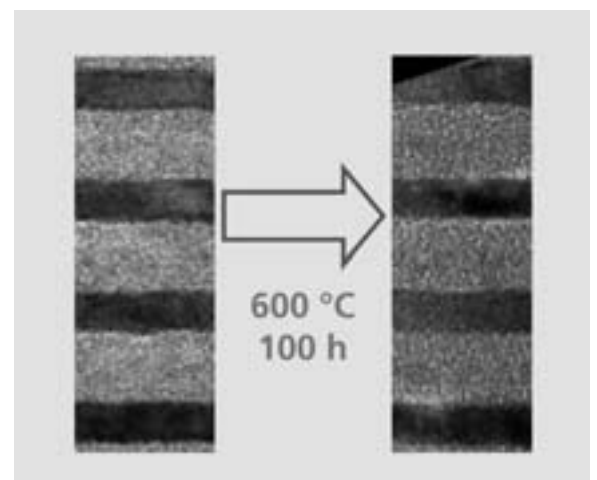


Abb. 2: Reflexionskurven bei unterschiedlichen Radien des Kollektorspiegels entlang einer Geraden. Messungen: PTB Berlin.

Fig. 2: Reflectivity curves at different collector mirror radii along one line within clear aperture. Measurements: PTB Berlin.

Abb. 3: TEM eines Hochtemperatur-Multilayers nach der Beschichtung (links) und nach Tempern bei 600 °C für 100 h (rechts). Messungen: Universität Ulm.

Fig. 3: TEM of high-temperature multilayer mirror as deposited (left) and after annealing at 600 °C for 100 hours (right). Measurements: University of Ulm.



# Hochreflektierende Beschichtungen auf Kunststoffoptiken



Peter Munzert



Ulrike Schulz



Norbert Kaiser

Die Metallisierung von spritzgegossenen und heißgeprägten Kunststoffoberflächen ist heute eine weit verbreitete Methode zur Erzeugung von Reflektoren. Für anspruchsvollere optische Systeme, wie z. B. für Projektionsanwendungen, ist es jedoch erforderlich die Lichtreflexion gegenüber dem Stand der Technik noch erheblich zu verbessern, was den Einsatz von Schichtdesigns und Beschichtungsverfahren aus der Präzisionsoptik notwendig macht. Bei der Beschichtung organischer Substratmaterialien treten aber nach wie vor vielfältige Probleme auf, deren Ursachen zumeist nicht bekannt sind /1/. Eines der Hauptprobleme ist dabei die unzureichende Haftfestigkeit der Schicht auf dem Kunststoffsubstrat /2/.

Die Entwicklung und Untersuchung von hochreflektierenden Metallschichten mit guter Haftung auf Kunststoffsubstraten war deshalb Gegenstand eines vom Land Thüringen geförderten Forschungsprojekts, an dem neben dem Fraunhofer IOF auch die Firmen JENOPTIK Polymer Systems GmbH in Triptis und Siegert TFT GmbH in Hermsdorf mitwirkten. Beispiele für dort während des Projekts beschichtete Kunststoffoptiken zeigt Abb. 1.

In Versuchen am Fraunhofer IOF Jena konnte gezeigt werden, dass Aluminium- und Silberschichten sowohl durch Vakuumbedampfung als auch durch Magnetronputtern auf vielen verschiedenen Kunststoffen durchaus haftfest abscheidbar sind, wenn bestimmte Prozessparameter eingehal-

ten werden. Die Höhe der erreichbaren Reflexion metallisierter Proben wurde bei den Kunststoffsubstraten durch die Rauigkeit der Oberfläche bestimmt. Wie in Abb. 2 dargestellt, ist die spektrale Reflexion einer aluminiumbeschichteten Zeonor®-Scheibe weitgehend mit dem beschichteten Glas identisch. Die rms-Rauigkeit dieser Scheibe betrug etwa 1,5 nm. Reflexionsverluste von bis zu 10 % zeigte dagegen eine beschichtete Tedur®-Scheibe, die aufgrund der schwierigen Verarbeitbarkeit im Spritzguss eine sehr raue Oberfläche (rms-Rauigkeit 11 nm) aufwies. Besonders hohe Reflexionswerte von über 97 % im sichtbaren Spektralbereich wurden sowohl mit geschützten Silberspiegeln als auch mit dielektrisch verstärktem Aluminium erzielt. Auch bei diesen Systemen wurde zwischen der Beschichtung auf Glas und Kunststoffproben mit guter Oberfläche kein Reflexionsunterschied festgestellt. Die dielektrischen Verstärkungsschichten erhöhen zudem die Klimastabilität der Aluminiumbeschichtung.

#### Literatur:

- /1/ Schulz, U.; Kaiser, N.: Vacuum coating of plastic optics, Progress in Surface Science 81 (2006) 387–401.
- /2/ Burkstrand, J. M.: Chemical interactions at polymer-metal interfaces and the correlation with adhesion, J. Vac. Sci. Techn. B20 No. 3 (1982) 440–441.



Nowadays the metallization of injection molded and of hot embossed polymer surfaces is a widely-used method for the fabrication of reflectors. Complicated optical systems, e.g. as used for projection applications, require much better light reflection than the current state of the art. Therefore special coating designs as well as vacuum coating processes typically used for precision optics are necessary. Coating organic substrate materials is still a task that is associated with multiple problems /1/. Insufficient adhesion of coatings on polymer substrates represents one of the main difficulties /2/.

A research and development project on highly reflective metal coatings with good adhesion on polymer substrates was carried out at the Fraunhofer IOF in collaboration with JENOPTIK Polymer

Systems (Triptis) and Siegert TFT GmbH (Hermisdorf), financially supported by the free state of Thuringia. Examples for coated optical parts are shown in Fig 1.

Test series that were coated at the Fraunhofer IOF demonstrated that aluminum and silver layers indicate good coating adhesion on many different polymers if they are deposited by vacuum evaporation as well as by magnetron sputtering, with consideration for certain process parameters. Maximum reflection values for metallized polymer samples were limited by the polymer's surface roughness. The spectral reflection of an aluminum coated Zeonor®-sample turned out to be equal to that of a coated glass substrate as shown in Fig. 2. The rms-roughness of this sample was about 1.5 nm. Reflection losses up to 10 % were measured for a Tedur®-sample that

was coated in the same run. Because of the unfavorable molding behavior of this high temperature polymer the surface roughness of this sample was up to rms 11 nm. Particularly high reflectance above 97 % was realized with a protected silver mirror as well as with dielectric enhanced aluminum. Applying these layer systems, excellent reflection properties have been obtained on several plastic substrates with smooth surfaces comparable to those on glass mirrors. Furthermore the dielectric layers used for reflection enhancement showed the ability to protect the aluminum coating against climatic influences.

#### References:

- /1/ Schulz, U.; Kaiser, N.: Vacuum coating of plastic optics, Progress in Surface Science 81 (2006) 387–401.
- /2/ Burkstrand, J.M.: Chemical interactions at polymer-metal interfaces and the correlation with adhesion, J. Vac. Sci. Techn. B20 No. 3 (1982) 440–441.

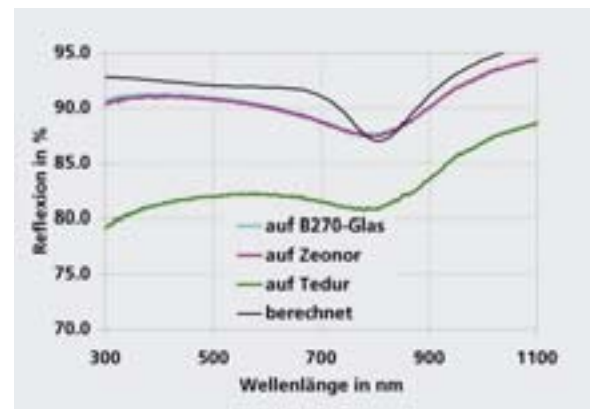


Abb. 1: Hochreflektierende optische Bauteile aus Kunststoff (©JENOPTIK Polymer Systems GmbH).

Fig. 1: High-reflective optical components of plastics (©JENOPTIK Polymer Systems GmbH).

Abb. 2: Vergleich der spektralen Reflexion gedampfter Aluminiumschichten auf Glas, Zeonor® und Tedur® mit der theoretisch erreichbaren Reflexionskurve.

Fig. 2: Comparison of the spectral reflection of evaporated aluminium coatings on glass, Zeonor® and Tedur® with the theoretical reflection curve.



# Gesputterte Spiegelschichten für die Optik und Beleuchtungstechnik



Wieland Stöckl



Michael Scheler



Mark Schürmann



Norbert Kaiser

Reflektoren werden in der Beleuchtungstechnik eingesetzt, um Räume besser auszuleuchten oder eine Bündelung des Lichts zu erreichen. Die Ministar® von OSRAM, bei der der Reflektor bereits in die Lampe integriert ist, folgt dem Leuchtentrend zur Miniaturisierung und ermöglicht völlig neue und revolutionäre Leuchtendesigns. Der Reflektor kann axial (sog. Axial-Reflector) oder seitlich (sog. Side-Reflector) aufgebracht sein (Abb. 1). Lampen mit Axial-Reflector können alle Aufgaben heutiger Spotbeleuchtung erfüllen und das in noch nie gezeigter Kompaktheit. Deckeneinbauleuchten und flexible Lichtsysteme sind nur zwei Beispiele, bei denen die Produktvorteile besonders zum Tragen kommen. Lampen mit Side-Reflector eröffnen z. B. eine völlig neue Designwelt für Möbeleinbauleuchten oder Schreibtischleuchten. Darüber hinaus wirkt die Reflektorschicht auch auf die Verteilung der abgestrahlten Wärme (Abb. 2).

Am Fraunhofer IOF wurde in Zusammenarbeit mit der Firma OSRAM eine Spiegelschicht entwickelt und patentiert, die direkt auf eine Halogenlampe als Reflektorschicht aufgebracht werden kann. Die Anforderungen an diese Schicht sind hoch: hohe Reflexion der Schicht im gesamten sichtbaren Spektralbereich, gute Haftung auf dem gekrümmten Glaskörper der Lampe, Korrosionsbeständigkeit über die Lebensdauer der Lampe. Eine besondere Herausforderung stellt die hohe Betriebstemperatur einer Halogenlampe dar. Die Reflektorschicht muss im Betrieb kontinuierlich Temperaturen von über 600 °C aushalten.

Eine Lösung für all diese Anforderungen stellen Spiegelschichten dar, die auf Silber als Reflektormaterial basieren. Silber erfüllt die optischen Anforderungen an die Reflektorschicht sehr gut. Um eine verbesserte Haftung des Silbers auf dem Lampenkörper zu erzielen, wird zunächst eine haftvermittelnde Schicht aufgebracht. Damit es nicht zur Absorption in dieser Schicht kommt, besteht sie aus einem dielektrischen Material. Auf die Außenseite der Silberschicht wird eine metallische Deckschicht aufgebracht. Diese Metallschicht ist chemisch sehr stabil und weist eine hohe Härte auf. So schützt sie die Silberschicht zum einen vor Atmosphäreneinflüssen und verleiht ihr zum anderen eine hohe Kratzfestigkeit. Obwohl der Schmelzpunkt von Silber bei 961 °C liegt, sind Silberschichten bei Temperaturen oberhalb von 600 °C nicht stabil. Die Einbettung zwischen die dielektrische Schicht und die Metallschicht, die beide einen deutlich höheren Schmelzpunkt besitzen als Silber, sorgt jedoch für eine Stabilisierung der Silberschicht. Die Reflektorschicht wird so auch dann nicht beschädigt, wenn sie für lange Zeit Temperaturen von über 600 °C ausgesetzt ist.

# Sputtered mirror coatings for optics and lighting technology



In lighting technology reflectors are commonly applied to achieve a better illumination of rooms or a bundling of the light. The Ministar® by OSRAM has a reflector already integrated into the lamp, thereby following the trend towards miniaturization in luminaires and opening up new horizons for revolutionary luminaire designs. The reflector can be applied axially (so-called axial reflector) or on the side (so-called side reflector) (Fig. 1). The lamp with axial reflector meets all the demands of modern spot lighting in a form that is more compact than ever before. Recessed ceiling luminaires and flexible lighting systems are just two examples in which the benefits of these products really shine through. The lamp with side reflector opens up new design possibilities for furniture luminaires or table lights. Furthermore, the reflector coating has considerable influence on the distribution of thermal radiation (Fig. 2).

At the Fraunhofer IOF a mirror coating was developed and patented in collaboration with OSRAM. This coating can be directly applied to a halogen lamp to act as a reflector. It has to meet high requirements: high reflectivity in the whole visible spectral range, good adhesive strength to the curved glass tube of the lamp, and corrosion resistance over the lifetime of the lamp. The high operating temperature of the lamp poses a special challenge: the reflector coating has to continuously withstand temperatures above 600 °C during operation.

Mirror coatings based on silver as reflecting material represent a solution to all these requirements. Silver fulfills the optical requirements for the reflector film. First, an adhesive layer is applied to enhance the adhesion of the silver layer on the glass tube of the lamp. This layer consists of a dielectric material to avoid absorption losses in this layer. The exterior side of the silver

film is protected by a metallic capping layer. This metal film is chemically very stable and has a high hardness. Therefore, it protects the silver film from the atmosphere and provides scratch resistance to the coating. In general, silver films are not stable at temperatures above 600 °C, although the melting point of silver is 961 °C. However, the imbedding between the dielectric layer and the metallic capping layer (both with a higher melting point than silver) stabilizes the silver film. Therefore, the reflector coating can be exposed to temperatures of 600 °C for considerable periods of time without suffering any damage.

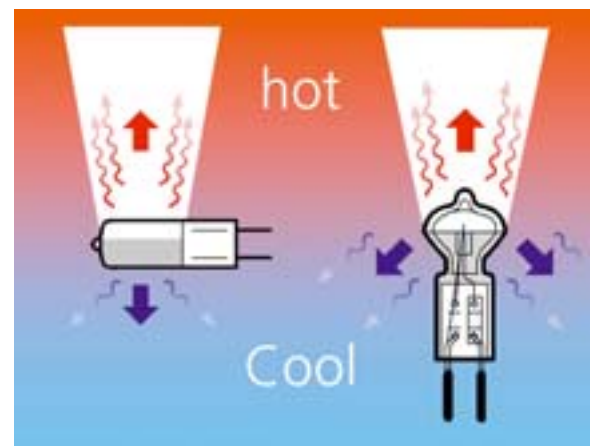


Abb. 1:  
Ministar® von OSRAM.  
Versionen mit Axial-  
Reflector und Side-  
Reflector.  
© OSRAM GmbH.

Fig. 1:  
Ministar® by OSRAM.  
Versions with axial  
reflector and side  
reflector.  
© OSRAM GmbH.

Abb. 2:  
Einfluss der Reflektorschicht auf die Wärmeabstrahlung  
© OSRAM GmbH.

Fig. 2:  
The reflector coating has also considerable impact  
on the thermal radiation © OSRAM GmbH.



# Online-Fehlerkorrekturen bei der plasmagestützten Abscheidung von Interferenzschichtsystemen



Olaf Stenzel



Steffen Wilbrandt



Manuela Holz



Christoph Gödeker



Norbert Kaiser

Heutige industrielle PVD-Beschichtungsverfahren für die Optik weisen noch immer eine eingeschränkte Reproduzierbarkeit auf. Die häufig eingesetzten einfachen Kontrolltechniken (Schwingquarz, optische Einwellenlängenmessung) haben eine Abschaltgenauigkeit in den Einzelschichtdicken von nur ca. 1 % zur Folge. Andererseits führen die ständig steigenden Anforderungen bei den optischen Übertragungseigenschaften zu einem verstärkten Bedarf an Schichtsystemen mit immer mehr Einzelschichten, die mit einer gesteigerten Genauigkeit und Reproduzierbarkeit sowohl der Schichtdicken als auch der optischen und nicht-optischen Materialeigenschaften auf unterschiedlichsten Trägermaterialien aufgebracht werden müssen. Grundsätzlich führen die oftmals immer noch zum Einfahren des Beschichtungsprozesses notwendigen Iterationszyklen zwangsläufig zu einem drastischen Anstieg der benötigten Prozessoptimierungszeit sowie zu einem bestimmten Satz an Fehlchargen, der außerdem durch nicht korrigierbare Prozessfehler gemehrt wird.

Im Rahmen des INNONET-Verbundprojekts »Tailored Automated Coating« (TACo) erarbeitet das IOF neuartige Lösungsstrategien für plasma-ionengestützt aufgedampfte Schichtsysteme, die unter anderem auf verbesserter in-situ-Überwachung des Beschichtungsprozesses und – falls notwendig – der Möglichkeit des gezielten Eingreifens in den Beschichtungsprozess basieren (sogenannte online-Fehlerkorrektur). Dabei wird unter Nutzung des am Fraunhofer IOF neuentwickelten online-Spektrometers »OptiMon« das Transmissionsspektrum der wachsenden

Schicht fortlaufend erfasst. Auf Basis der gemessenen Transmissionsspektren ermittelt eine in Kooperation mit der Staatlichen Universität Moskau von Prof. A. V. Tikhonravov entwickelte Software die tatsächlich erreichten Konstruktionsparameter des Schichtsystems, die permanent mit den Sollwerten verglichen werden. Sofern Abweichungen vom originalen Design (grüne Kurve in Abb. 2) auftreten, erfolgt (hier unter Nutzung der Designsoftware »Optilayer« /1/) eine online-Fehlerkorrektur durch Anpassung der Schichtdicken des noch abzuschneidenden Teils des Schichtdesigns, so dass die Zielspezifikation noch erreicht wird und eine Fehlcharge vermieden werden kann, die in einer konventionellen Prozessumgebung unvermeidlich gewesen wäre.

Erste Erfahrungswerte zeigen, dass insbesondere anspruchsvolle Spezifikationen, die Amplituden- und Phasentargets in Kombination beinhalten, durch Einsatz der online-Fehlerkorrekturen deutlich sicherer getroffen werden können. Die geschilderte Prozessführungsstrategie ist auch auf anderen Vakuumanlagen umsetzbar, soweit sie eine Kommunikation mit dem OptiMon-Prozessphotometer unterstützen.

Literatur:  
/1/ [www.optilayer.com](http://www.optilayer.com).



# Plasma-ion assisted deposition of interference coatings with online error compensation



The reproducibility of today's PVD deposition techniques is still limited by stochastic and systematic errors in film thickness values. Simple deposition control as accomplished by quartz or single wavelength optical monitoring results in typical relative thickness errors of around 1 %. The increased demand in coatings with improved optical properties leads, on the other hand, to the deposition of coatings with a permanently growing number of individual layers, with enhanced requirements concerning accuracy and reproducibility in film thickness and material properties. These requirements typically result in long-winded process optimization cycles and are necessarily connected with a certain amount of waste-charges. The latter naturally occur during the optimization period, but unfortunately also in normal production cycles when small process errors, which cannot be detected by conventional monitoring techniques, accumulate to an error level that disturbs the optical performance of the whole coating.

To comply with these problems, the IOF is participating in the joined INNONET-project "Tailored Automated Coating" (TACo). The task is to develop novel process monitoring strategies for plasma-ion assisted evaporation processes. Key components of the developed strategies include in-situ optical measurements at the growing film, real-time re-engineering and adaptation of the not yet deposited part of the design in order to compensate for deposition errors, if necessary (so-called online error compensation). Optical measurements are performed with the OptiMon transmission spectrometer, developed at IOF for deposition process control. The measured data are directly used for current film thickness determination by a software developed in collaboration with Moscow State University group of Professor Alexander Tikhonravov. The calculated thickness values are permanently compared to the required values, the latter corresponding to the green transmission curve in Fig. 2. Error compensation is performed by means of a thickness refinement procedure for the remaining

part of the design with OPTILAYER design software /1/, which leads to a somewhat modified design but with an optical performance still satisfying the original specification.

Our experience confirms that particularly demanding coating specifications, which include both amplitude and phase targets in combination, are more reliably satisfied with a deposition strategy which includes the possibility for permanent error compensation. The method and particularly the corresponding software and hardware may be transferred to any deposition system, as long as it satisfies minimum requirements on system interfaces to support communication with the OptiMon process photometer.

References:  
/1/ www.optilayer.com.

Abb. 1: Schematische Darstellung des Zusammenspiels der einzelnen Hard- und Softwarekomponenten bei der online-Fehlerkorrektur.

Fig. 1: Sketch of the interaction between the relevant soft- and hardware components for online error compensation.

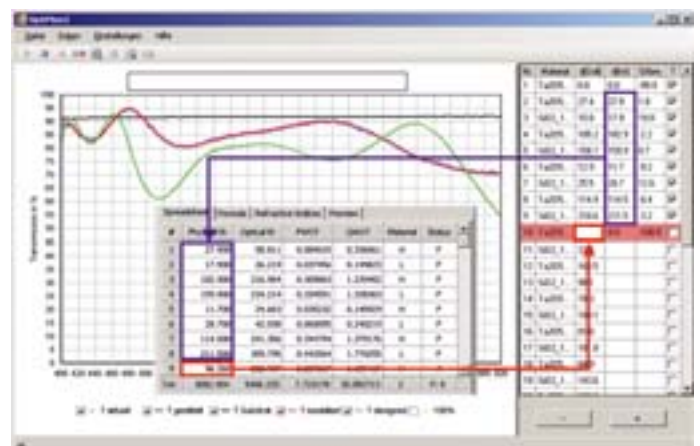
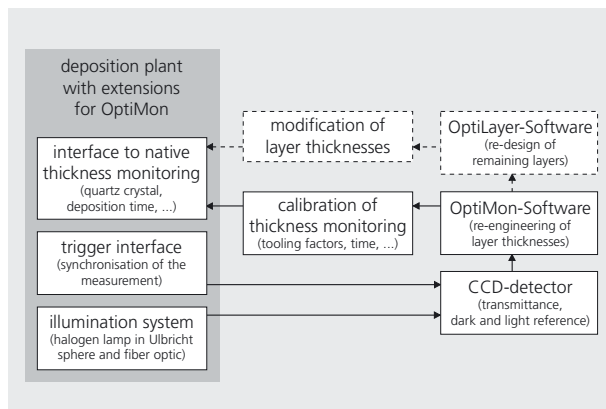


Abb. 2: Screenshot zur Verdeutlichung der Wechselwirkung des Analysemoduls (OptiMon) und des Designmoduls (Optilayer).

Fig. 2: Screenshot for visualizing the interaction between the characterization tool (OptiMon) and the design modul (Optilayer).

# Benetzungsanalyse an mikro- und nanostrukturierten Oberflächen



Marcel Flemming



Luisa Coriand



Angela Duparré

Das Benetzungsverhalten optischer und technischer Oberflächen (z. B. Fensterscheiben, Maschinenteile) spielt für deren Reinigungseigenschaften sowie bei unterschiedlichsten Applikationen eine entscheidende Rolle. Die Benetzung einer Oberfläche wird neben ihrer chemischen Natur wesentlich durch ihre Rauheit bestimmt. Daher muss z. B. bei der technologischen Realisierung ultra-hydrophober selbstreinigender Oberflächen eine spezifische Oberflächenstruktur erzeugt werden. Um deren Benetzungswirkung geeignet zu bewerten und gezielt anzupassen, ist die Kenntnis der relevanten Rauheitskomponenten der Struktur erforderlich. Dazu wurde am Fraunhofer IOF eine Methode entwickelt, die durch spezielle Rauheitsanalyse und Datenauswertung einen neuartigen Benetzungsparameter  $\kappa_b$  liefert, der sowohl die vertikale als auch laterale Ausdehnung stochastischer Rauheitsstrukturen widerspiegelt /1/. Dies können die gängigen Rauheitsparameter ( $R_q$ ,  $R_a$  etc.) nicht leisten.

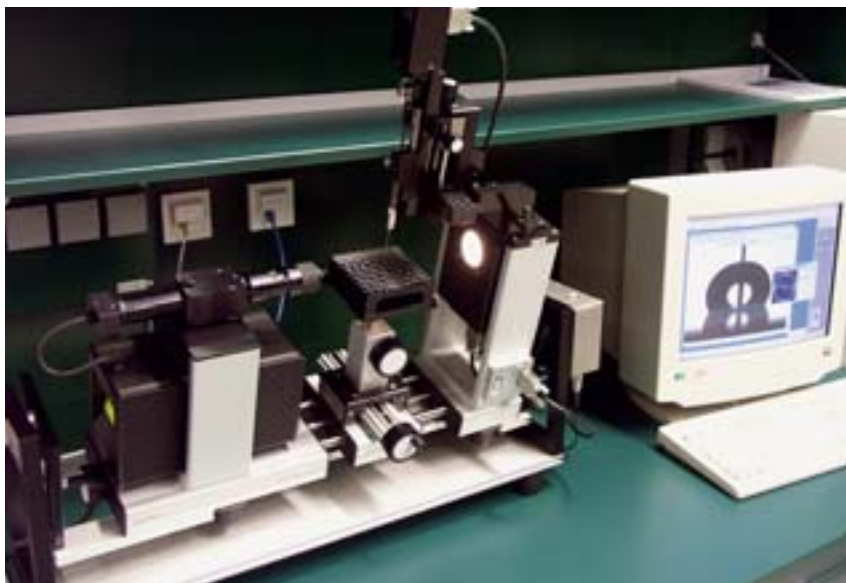
Für intrinsisch (chemisch) hydrophobe Oberflächen wurde durch empirische Korrelation von Rauheits- und Benetzungseigenschaften ein Wert  $\kappa_b > 0,3$  als notwendiges Kriterium für Ultra-Hydrophobie gefunden (zum Vergleich: Das Lotusblatt als Beispiel für Ultra-Hydrophobie schlechthin weist einen  $\kappa_b$ -Wert von 0,7 auf). Die Struktur-Eigenschafts-Korrelation ergab weiterhin, dass eine umfassende Benetzungscharakterisierung nur mittels dynamischer Kontaktwinkelmessungen, d. h. Bestimmung des Fortschreite- und Rückzugswinkels, sowie durch Abgleit- bzw. Abrollwinkelmessungen möglich ist (Abb. 1).

Im Folgenden sind beispielhaft Ergebnisse an laserstrukturierten hydrophobisierten Stahloberflächen /2/ dargestellt. Die Analyse der  $\mu\text{m}$ - und  $\text{nm}$ -Rauheitsstruktur von Oberfläche A (Abb. 2) zeigt, dass die erzielten ultra-hydrophoben Eigenschaften, d. h. Fortschreite- und Rückzugswinkel  $> 140^\circ$  (Abb. 3) und Abrollwinkel  $< 10^\circ$ , mit einem  $\kappa_b$ -Wert von 0,5 korrelieren. Im Gegensatz dazu wurde die Oberfläche B (Abb. 4) anhand eines zu niedrigen Benetzungsparameters von  $\kappa_b = 0,14$  als nicht ultra-hydrophob bewertet. Die dann gemessene hohe Kontaktwinkelhysterese (Differenz zwischen Fortschreite- und Rückzugswinkel) bestätigte den Befund (Abb. 5).

Im Gegensatz zur  $\mu\text{m}$ - und  $\text{nm}$ -Strukturierung bei ultra-hydrophoben technischen Oberflächen erfolgt bei optischen Oberflächen mittels »Steuerung« durch  $\kappa_b$  eine Fokussierung auf  $\text{nm}$ -Strukturen, um optische Verluste kontrolliert niedrig zu halten. Dies wird gegenwärtig im Förderprojekt KRONOS realisiert /3/.

Abb. 1: Kontakt- und Abrollwinkelmessung (Gerät: OCA 20, Dataphysics).

Fig. 1: Measurement of dynamic contact angles and sliding /roll-off angles (instrument: OCA 20, Dataphysics).





The wetting behaviour of optical and technical surfaces (e.g. architectural glass, engineering components) is of great importance for cleaning processes and various applications. Wetting properties are considerably determined by surface roughness in addition to the chemical nature of the liquid and solid. The technology for the realization of e.g. ultra-hydrophobic self-cleaning surfaces has to generate a specific surface structure. In order to adapt the technological process and hence the wetting properties of these surfaces, knowledge about wetting relevant surface structures is important. For that purpose, a novel method for the quantification of wetting relevant surface roughness was developed at the IOF. Specific roughness analysis based on power spectral density functions leads to a wetting parameter  $\kappa_B$  /1/. Unlike simple roughness parameters (e.g. rms roughness)  $\kappa_B$  considers both the vertical and lateral dimensions of roughness structures.

Empirical correlation between the roughness and wetting properties of samples with various degrees of roughness but identical intrinsic hydrophobicity revealed that ultra-hydrophobicity is essentially associated with  $\kappa_B$  values above 0.3 (for comparison: for the well known ultra-hydrophobic lotus leave, a  $\kappa_B$  value of 0.7 was determined). Appropriate correlation between the roughness and wetting properties also requires advanced wetting characterization by dynamic contact angle (advancing and receding contact angles) and sliding/roll-off angle measurements (Fig. 1).

The following examples show results obtained on laser-structured steel surfaces with hydrophobic top coatings /2/. The analysis of micrometer- and nanometer-sized roughness components of the ultra-hydrophobic

sample A (Fig. 2) yielded a  $\kappa_B$  value of 0.5 which was associated with advancing and receding contact angles  $> 140^\circ$  (Fig. 3) and a roll-off angle  $< 10^\circ$ . In comparison, a  $\kappa_B$  value of 0.14 predicted non-ultra-hydrophobicity for sample B (Fig. 4) which was confirmed by a measured high contact angle hysteresis (difference of advancing and receding contact angle; Fig. 5).

The ultra-hydrophobicity of optical surfaces is necessarily based on nanometer-sized roughness structures in order to maintain optical quality (low

scatter losses). Systematic roughness design by means of the parameter  $\kappa_B$  constitutes a key to a cost-efficient technological process and is currently part of the BMBF joint project KRONOS /3/.

#### References:

- /1/ Flemming, M.; Duparré, A.: Design and characterization of nanostructured ultra-hydrophobic coatings, Applied Optics 45 (2006) 1397–1401.
- /2/ Herstellung: IWS Dresden.
- /3/ BMBF-Verbund KRONOS: Kratz- und schmutzresistente geformte Glasoberflächen durch steuerbar nanostrukturierte Sputterschichten.

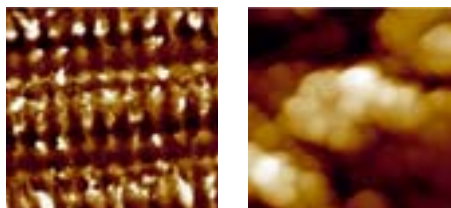


Abb. 2:  
Laserstrukturierte ultra-hydrophobe Stahloberfläche (Probe A)  
links: LSM-Messung 460 x 460  $\mu\text{m}^2$  (Höhenskala: 30  $\mu\text{m}$ ); rechts: AFM-Messung 1 x 1  $\mu\text{m}^2$ , (Höhenskala: 700 nm).

Fig. 2:  
Laser-structured ultra-hydrophobic steel surface (sample A);  
left: LSM measurement 460 x 460  $\mu\text{m}^2$  (height scale: 30  $\mu\text{m}$ ); right: AFM measurement 1 x 1  $\mu\text{m}^2$  (height scale: 700 nm).

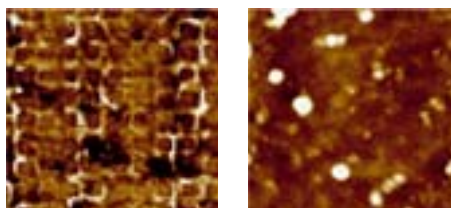


Abb. 4:  
Laserstrukturierte hydrophobe Stahloberfläche (Probe B);  
links: LSM-Messung 460 x 460  $\mu\text{m}^2$  (Höhenskala: 5  $\mu\text{m}$ ); rechts: AFM-Messung 1 x 1  $\mu\text{m}^2$  (Höhenskala: 30 nm).

Fig. 4:  
Laser-structured hydrophobic steel surface (sample B); left: LSM measurement 460 x 460  $\mu\text{m}^2$  (height scale: 5  $\mu\text{m}$ ); right: AFM measurement 1 x 1  $\mu\text{m}^2$  (height scale: 30 nm).

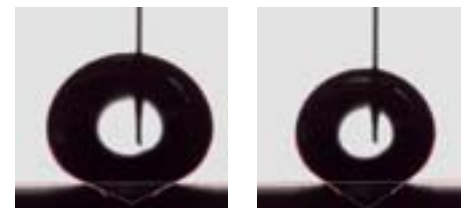


Abb. 3:  
Dynamische Kontaktwinkelmessung an laserstrukturierter ultra-hydrophober Stahloberfläche (Probe A);  
links: Fortschreitewinkel; rechts: Rückzugswinkel.

Fig. 3:  
Dynamic contact angle measurement on laser-structured ultra-hydrophobic steel surface (sample A);  
left: advancing contact angle; right: receding contact angle.

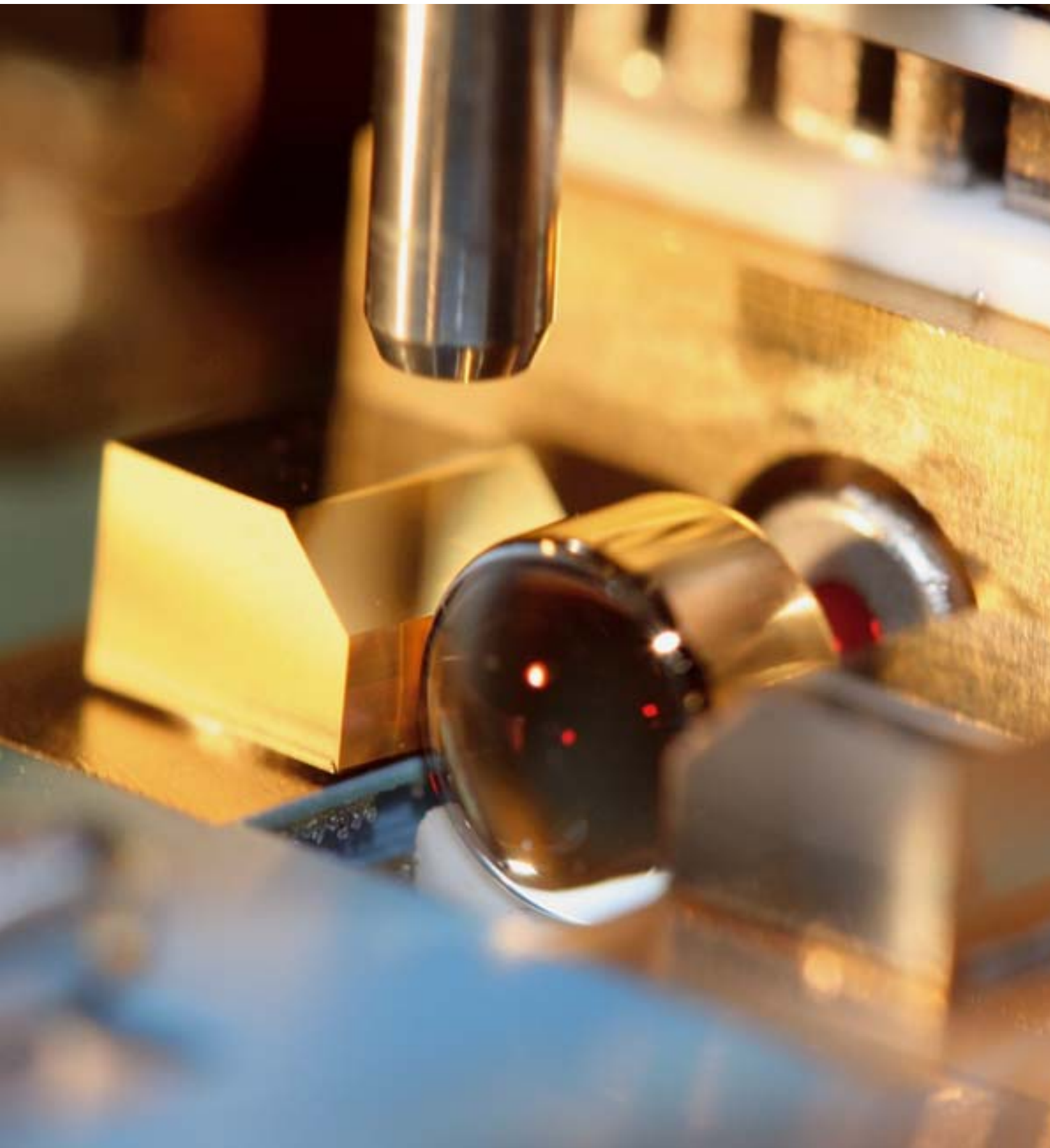


Abb. 5:  
Dynamische Kontaktwinkelmessung an laserstrukturierter hydrophober Stahloberfläche (Probe B);  
links: Fortschreitewinkel; rechts: Rückzugswinkel.

Fig. 5:  
Dynamic contact angle measurement on laser-structured hydrophobic steel surface (sample B);  
left: advancing contact angle; right: receding contact angle.

# Integrationsverfahren

## Integration Technologies



# Solder Bumping – ein neues, flexibles AVT-Verfahren für optoelektronische Systeme



Erik Beckert



Thomas Burkhardt



Ghassem Azdasht<sup>1</sup>



Thomas Oppert<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pac Tech GmbH, Nauen

Das präzise Fügen ist neben dem Justieren der wichtigste Teilprozess im Aufbau optischer und optoelektronischer Systeme, da in diesem letzten Schritt der Montageprozesskette wesentliche Funktionsparameter der montierten Komponente wie Position sowie elektrische und thermische Kontaktierung innerhalb des Mikrosystems dauerhaft fixiert werden. Das in der Optik und in der Mikrosystemtechnik verbreitete Standardfügeverfahren Kleben ist bezüglich bestimmter Einsatzbedingungen limitiert, da polymerbasierte Klebstoffe in der Regel eine eingeschränkte elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie eine begrenzte Temperatur- und Langzeitstabilität aufweisen. Das bedeutet, dass Klebstoffe ungeeignet für Anwendungen im Vakuum, unter Strahlenlast oder in kryogener Umgebung sind. Eine Alternative zum Kleben sollte ähnliche Freiheitsgrade bezüglich der einfachen Applizierung des polymerfreien Fügehilfsstoffs innerhalb geometrisch komplexer Mikrosysteme zur Verfügung stellen.

## Laserstrahllöten als alternatives Fügeverfahren

Das Löten als stoffschlüssiges Fügeverfahren erfüllt die Forderung nach einem mechanisch stabilen und strahlungsresistenten Fügehilfsstoff, der darüber hinaus elektrisch und thermisch leitend ist. Im Gegensatz zu Reflow-Prozessen der Elektronikfertigung ist eine Metallisierung der Fügeflächen auf den optischen Komponenten z. B. aus Glas notwendig. Zur Vermeidung

der Kontamination optischer Funktionsflächen ist es erforderlich, flussmittelfrei (Flussmittel dienen der Verbesserung der Benetzung) zu arbeiten. Weiterhin ist die Reflow-Energie räumlich und zeitlich diskret einzutragen, um Beschädigungen der empfindlichen Bauelemente zu vermeiden.

## Solder Bumping

Das laserbasierte Solder Bumping nach /1, 2/ ist eine Technologie, die in einem Gerät die Teilprozesse der Bereitstellung, des Umschmelzens und der Applizierung von Lot an beliebigen Fügestellen vereint und sich deshalb besonders zur flexiblen Applizierung von kleinen Lotvolumina in komplexen Montageumgebungen eignet. Der Verfahrensablauf des laserbasierten Solder Bumping ist in Abb. 1 dargestellt. In einem Vorratsbehälter werden als Schüttgut Lotkugeln gleichen Durchmessers bereitgestellt, wobei gegenwärtig Durchmesser im Bereich von 100 µm bis 760 µm genutzt werden können. Die Lotlegierung ist weitgehend frei wählbar aus einer Palette von niedrigschmelzenden BiSn-Loten über Standard SnAgCu-Lote der Bleifrei-Elektronik bis hin zum bekannten hochschmelzenden AuSn-Lot der Optoelektronik. Eine aus dem Vorratsbehälter vereinzelt Lotkugel wird zu Beginn des Lötprozesses in eine Platzierkapillare gefördert und mittels Stickstoff-Überdruck gegen deren Ausgang gepresst, welcher einen geringfügig kleineren Durchmesser als die Lotkugel selbst aufweist.

# Solder Bumping – a new and flexible packaging technology for optoelectronic systems



Precise joining is, apart from the optical alignment itself, the most crucial sub-task when assembling optoelectronic systems. Within this last task of the assembly process chain, important functional parameters of the packaged components such as position, but also electrical and thermal connections, have to be fixed precisely and long term stable. Polymeric adhesive bonding, the most commonly used joining technology in micro optics and micro system technology, is in certain application environments limited due to the fact that polymer based adhesives exhibit disadvantages in terms of electrical and thermal conductivity as well as temperature and long term stability. Adhesives are therefore not suitable for applications in vacuum, cryogenic or radiation environments. Alternatives should exhibit the same degree of freedom for easy application of a polymer free joining media within miniaturized and geometrically complex micro systems.

## Laser based soldering

Soldering as an adhesion based technology offers the advantages of a mechanically, thermally and radiation stable metallic joining media that is also electrically and thermally conductive. But in contrast to reflow technology in electronics manufacturing it is a prerequisite to create metallization for wetting of the solder on optical components that are usually made of glass. To prevent contamination of optically functional surfaces it is further necessary to work in a fluxless regime, resulting in difficult wetting behaviour. A local and time-restricted reflow energy input is also required in order to prevent damage to the sensitive and brittle components.

## Solder bumping

Laser based solder bumping /1, 2/ is a technology that offers all these capabilities and unites the tasks of solder feeding, its reflow and application on various wetting geometries and thus is particularly suitable for flexible application of small solder volumina in complex assembly environments. The process regime of laser based solder bumping is shown in Fig. 1. From a reservoir solder spheres with a very tight tolerated diameter are fed to the bumping device. Currently solder sphere diameters range from 100  $\mu\text{m}$  to 760  $\mu\text{m}$ , while the alloy can be chosen from the wide range of low melting BiSn solders to standard SnAgCu solders known from Pb-free electronics manufacturing to the high melting AuSn solder of optoelectronics. At the beginning of the process the singulated solder sphere gets transferred into a bumping capillary, where it is pressed by nitrogen pressure against the capillary outlet, which is slightly smaller in diameter than the solder sphere.

Abb. 1:  
Prinzip des laserbasierten Solder Bumping.

Fig. 1:  
Basic principle of laser based solder bumping.



Wird nach dem Bereitstellen der Lotkugel durch die Kapillare ein Laserimpuls (Dauer bis zu 25 ms) auf das Lotvolumen fokussiert, absorbiert dieses die applizierte Energie weitgehend, schmilzt um und wird durch den Stickstoff-Überdruck aus der Platzierkapillare ausgestoßen. Im flüssigen Zustand legt das Lotvolumen mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 m/s einen Weg zwischen 1 mm und max. 6 mm im Freiflug in der Inertgasatmosphäre (Stickstoff) zurück. Gleichzeitig trifft der durch die nun freie Kapillare austretende Laserstrahl die anvisierte Benetzungsfläche und wärmt diese lokal kurzzeitig vor. Trifft das flüssige Lotvolumen auf der Benetzungsfläche auf, gibt dieses aufgrund des extrem guten thermischen Kontakts (Flüssigphase des Lots) die im Volumen gespeicherte Energie an die zu benetzende Oberfläche ab und formt bei Erstarrung die zur Verbindungsbildung notwendigen intermetallischen Phasen.

Durch die Dynamik des Vorgangs gelingt es, die zur Verbindungsbildung notwendige Energieverteilung sehr lokal zu konzentrieren und Wärmeleitung von der Fügestelle weg weitgehend zu vermeiden. Mit der Parametrisierung der im Lotvolumen gespeicherten Energie kann weiterhin flexibel auf verschiedene Benetzungsverhältnisse (Wärmesenken-Verhalten der Fügepartner) wie auch empfindliche Komponenten (z. B. spröde Glasbauteile mit Metallisierung) reagiert werden. Da lediglich der Vereinzelungs-

vorgang auf der Schwerkraft beruht, kann die Platzierkapillare nach der Vereinzelung einer Lotkugel prinzipiell frei im Raum, z. B. durch einen Roboter, bewegt und geschwenkt werden. Dies erlaubt es, Lot in komplexe und schwer zugängliche Geometrien oder auch an senkrecht stehende Benetzungsflächen (Abb. 2) zu applizieren. Mit der in Abb. 3 gezeigten Gerätekonfiguration konnten Bump-Richtungen erfolgreich erprobt werden, die bis zu 45° von der Vertikalen abwichen. Freifluglängen des flüssigen Lots im Bereich 1 mm bis maximal 6 mm wurden realisiert mit dabei erreichten Zielgenauigkeiten von  $\pm 30 \mu\text{m}$  bis  $\pm 150 \mu\text{m}$ . Weiterhin ist es möglich, mit Lotkugeldurchmessern von 400  $\mu\text{m}$  Fügespalte bis zu ca. 100  $\mu\text{m}$  zu überbrücken. Damit ist eine ausreichende Flexibilität gewährleistet, um auch in komplexen Geometrien oder variablen Justierzuständen den Fügehilfsstoff zu applizieren.

## Montage von FAC-Linsen vor Diodenlaserbarren

Hauptziel der Montage in der optoelektronischen Mikrosystemtechnik ist es, den oft mit viel Aufwand eingestellten Justierzustand während des Fügens und anschließend innerhalb der Produktlebensdauer im Rahmen der vorgegebenen Toleranzgrenzen zu erhalten. Die durch das aus der Flüssigphase erstarrende und auf Raumtemperatur abkühlende Lot eingetragene thermomechanischen Spannungen beeinflussen den Justierzustand. Dies kann durch kleine Fügespalte und minimale Lotvolumina reduziert werden.

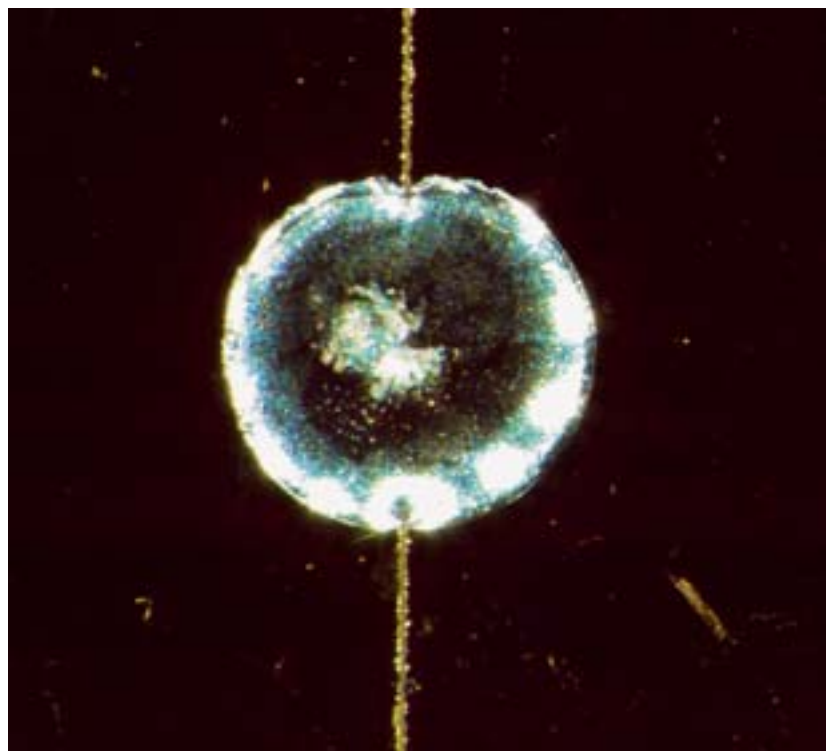


Abb. 2:  
Lot-Bump, appliziert an senkrecht stehenden Fügeflächen.

Fig. 2:  
Solder bump, applied to a vertical arranged joining area.





Then a laser pulse (length ranging up to 25 ms) focuses onto the solder sphere, which absorbs the reflow energy, melts and is pushed out of the capillary by the nitrogen pressure. Now liquid, the solder volume moves with a speed of approx. 1 m/s along a free flow path with lengths ranging from 1 mm up to 6 mm and within an inert nitrogen atmosphere, while in parallel the laser focus now heats up the target wetting area. When the liquid solder volume hits the wetting area, it transfers its energy, due to the very good thermal contact of the liquid solder and the wetting surface, to the metallization, where during resolidification and formation of intermetallic phases a strong bump bond is created.

This process is fast, thus it is possible to restrict the thermal energy transfer to the wetting area itself and limit energy transfer to the surrounding bulk material even in case of high

thermal conductivities. By parametrizing the reflow energy the process can thus flexibly be adapted to different wetting properties due to varying heat sink behaviours of the components to be joined as well as to the components' brittleness (glass parts with metallizations). And since only the singulation of the solder spheres relies on gravity forces the bumping capillary can in principle be moved around and tilted in space in all six degrees of freedom after the sphere is singulated and pressed against the capillary outlet. When this is done e.g. by a robot this feature enables the application of solder on complex, hard to reach, even vertically arranged wetting surfaces (Fig. 2).

Using the bumping device environment shown in Fig. 3 bumping direction angles up to 45° were demonstrated. Moving on free flow paths up to 6 mm the target wetting area can be hit by the molten solder with an accuracy

of  $\pm 30 \mu\text{m}$  to  $\pm 150 \mu\text{m}$ , depending on the actual distance. It was further shown that solder spheres with a diameter of 400  $\mu\text{m}$  can bridge joining gaps up to approx. 100  $\mu\text{m}$ . This enables for enough flexibility to apply the solder in complex geometries or within different alignment states.

### Mounting FAC lenses in front of diode laser bars

The main goal of the assembly of optoelectronic micro systems is usually to maintain the precise and often with high technological effort aligned position of the component during joining and also during the life time cycle of the product itself within tolerable limits. But during resolidification of the liquid solder and its downcooling to room temperatures thermomechanical stress is introduced into the assembly and thus the alignment state is affected. This can be minimized by a small joining gap and using reduced solder volumina.

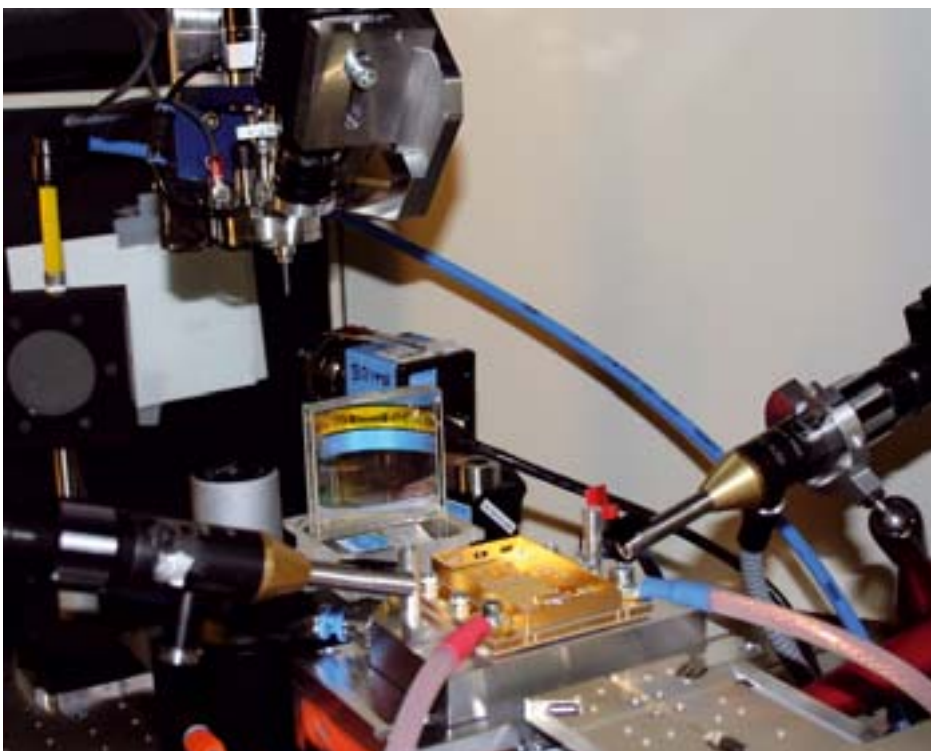


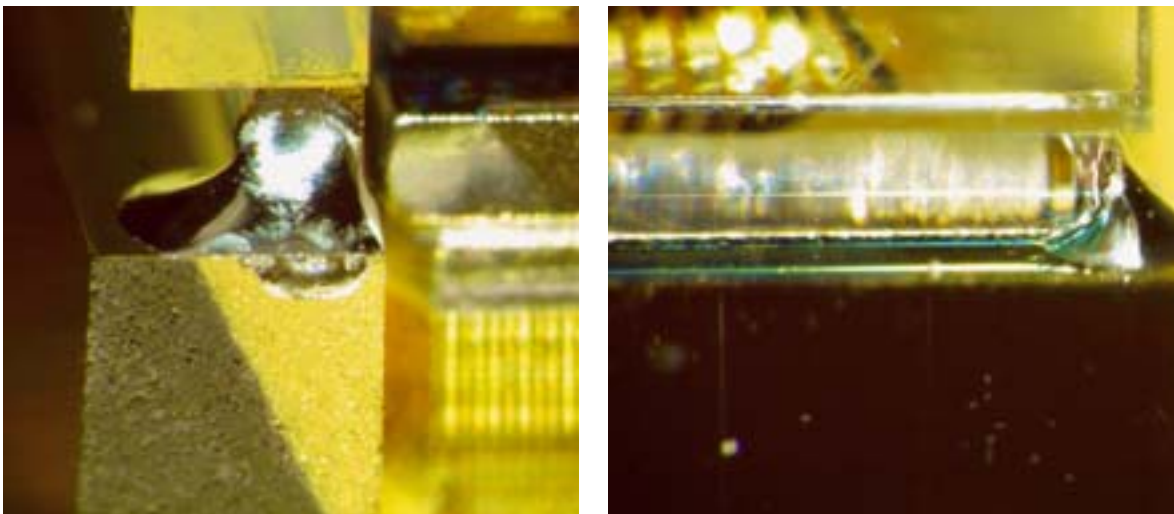
Abb. 3: Bump-Vorrichtung, montiert an einem Knickarm-roboter, in Montageumgebung.

Fig. 3: Bump device, assembled on a robot and within the assembly environment.

Beispielhaft kann dies anhand des Fügevorgangs asphärischer zylindrischer FACs (Fast Axis Collimator) von Diodenlaserbarren gezeigt werden. Zum Einsatz kommen Bottom-Tabs, die bei Wahrung der notwendigen Justierfreiheitsgrade für die FAC minimale Fügespalte zwischen FAC, Bottom Tab und der Wärmesenke des Lasers als Montagereferenz bereitstellen. Das Justieren und Fügen dieser Baugruppe ist ein komplexer Vorgang, insgesamt werden vier Solder Bumps appliziert, u. a. an den metallisierten Stirnflächen der FAC (Abb. 4). Ein typischer Verlauf der FAC-Dejustierung senkrecht zur Strahlrichtung des Laserbarrens während des gesamten Montagevorgangs ist in Abb. 5 dargestellt. Deutlich wird, dass für die Dejustierung nicht allein die Applizierung des Lots verantwortlich ist, sondern diese sich aus der Gesamtheit der durch Handhabung, Justierung und Fügen der jeweiligen Komponenten eingetragenen mechanischen Spannungen zusammensetzt. Nach einer ersten Prozessoptimierung wurden hier Dejustierungen im Bereich  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  nachgewiesen.

Abb. 4:  
Front- und Seitenansicht einer an den Stirnseiten verlöteten FAC-Linse.

Fig. 4:  
Front and side view of an FAC lens that is joined by solder bumps at its end faces.



## Zukünftige Entwicklungen

Neben einer Evaluierung des nutzbaren Parameterfeldes des Solder Bumping unter Berücksichtigung verschiedener Materialkombinationen und Fügegeometrien sollen in Zukunft statistisch auswertbare Experimentaldaten zur Festigkeit der Lötverbindung generiert werden. Hauptgegenstand weiterer Untersuchungen wird die Reproduzierbarkeit der Verbindungsbildung hinsichtlich der sich einstellenden Dejustierung sein, um geeignete Strategien zur Kompensation im Submikrometerbereich ableiten zu können. Weiterhin wird eine Erweiterung des Anwendungsbereiches des Solder Bumping hin zu extrem empfindlichen Baugruppen durch den Einsatz niedrigschmelzender Lote oder zu extremen Einsatzbedingungen wie kryogenen Temperaturen durch die entsprechende Materialqualifikation von Lotlegierungen und eine FEM-basierte Optimierung der Fügegeometrien angestrebt. Damit wird die Prozess- und Produktionsreife des vorgestellten Fügeverfahrens erreicht und nachgewiesen.

## Danksagung

Teile der vorgestellten Arbeiten wurden durch das BMBF im Rahmen des Projektes BRIMO (FKZ 13N8616) gefördert.

### Literatur:

- /1/ DE 10132567: Verfahren und Vorrichtung zum Aufbringen eines Lötmittels auf einem Substrat.
- /2/ Zakel, E.; Oppert, T.; Azdasht, G.: Laser assisted Wafer Level Packaging for MEMS. In: Proceedings of the Semicon Europa (Munich, Germany), April 19, 2004.
- /3/ Banse, H.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Stöckl, W.: Laser Beam Soldering – a New Assembly Technology for Microoptical Systems. In: Microsystems Technologies 11, 2005, pp.186–193.



An example are cylindrical aspheric Fast Axis Collimator (FAC) lenses that need to be assembled in front of diode laser bars. The usage of Bottom Tabs allows for all necessary six degrees of freedom for alignment while simultaneously creating virtually zero joining gaps between FAC and Bottom tab as well as Bottom Tab and heat sink of the diode bar, which is the assembly reference in this case. Alignment and joining of this assembly is a complex process in which overall four solder bumps are applied, inter alia at the end faces of the FAC lens (Fig. 4). A typical development of the dealignment of the FAC lens vertically to the beam and in the fast axis direction during the whole assembly process is shown in Fig. 5. It is evident that dealignment not only occurs due to application of the solder, but also due to overall handling, alignment and joining and the resulting mechanical and thermomechanical stress. After basically optimizing the process first results indicate that it is possible to reach a dealignment of the FAC lens in the range of  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ .

## Future developments

Besides the further evaluation of usable parameter fields for the solder bumping process, taking different material combinations and joining geometries into account, in future it is planned to generate statistical experiment data e.g. for mechanical strength of the bumped solder joints. The main subject for subsequent evaluations will be the reproducibility of the bumping process in terms of dealignment, in order to deduce potential strategies for compensation in the sub-micron range. Further application fields for the solder bumping technology will include the usage of low melting solder alloys for very sensitive assemblies or for extreme usage in assemblies for cryogenic environments by a respective material qualification and an accompanying FEM simulation. As a result the process and production stability of the solder bumping technology will have been attained and proven.

## Acknowledgements

This research and development project was partially funded by the German federal ministry of education and research (BMBF) within the project "BriMo" (fund number 13N8616) and managed by the Project Management Agency VDI-Technologiezentrum (VDI-TZ) within the framework "Optische Technologien".

### References:

- /1/ DE 10132567: Verfahren und Vorrichtung zum Aufbringen eines Lötmittels auf einem Substrat.
- /2/ Zakel, E.; Oppert, T.; Azdasht, G.: Laser assisted Wafer Level Packaging for MEMS. In: Proceedings of the Semicon Europa (Munich, Germany), April 19, 2004.
- /3/ Banse, H.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Stöckl, W.: Laser Beam Soldering – a New Assembly Technology for Microoptical Systems. In: Microsystems Technologies 11, 2005, pp.186–193.

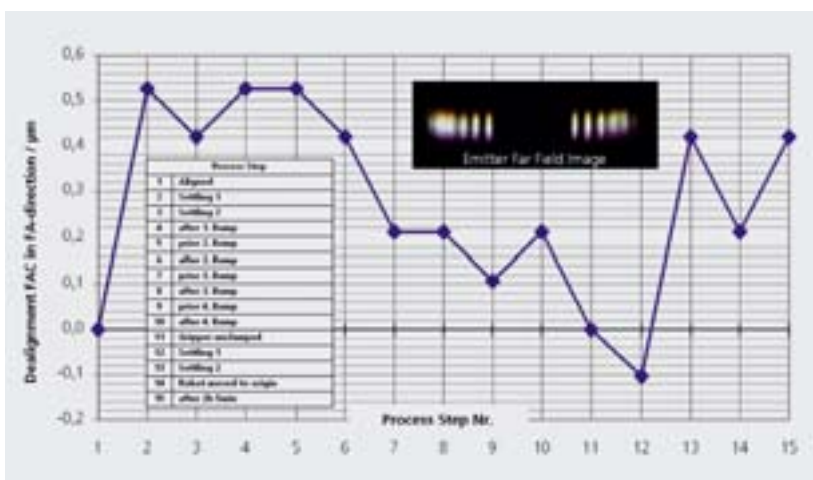


Abb. 5: Verlauf der Dejustierung der FAC senkrecht zur Strahlrichtung während des gesamten Montagevorgangs.

Fig. 5: Dealignment development of the FAC lens in fast axis direction during a whole assembly process.

# Justierdrehen – eine Schlüsseltechnologie für die Montage von Präzisionsobjektiven



Andreas Gebhardt



Volker Guyenot



Gerhardt Weidner



Mathias Rohde



Dieter Frerking<sup>1</sup>



Bernhard Wellinger<sup>2</sup>

Die Qualität von Präzisionsobjektiven wird entscheidend von der Zentrierung und Positionierung der Objektivlinsen bestimmt. Während in den vergangenen Jahren die Herstellungstechnologie der Einzellinsen durch deterministische Schleif- und Polierverfahren höchstes Niveau erreicht hat, ist die Objektivmontage ein aufwendiger, iterativer Prozess. Hier setzt das Verfahren »Justierdrehen« an: Durch die Bearbeitung der Linsenfassungen in Bezug zur optischen Achse der Linse kann die Präzision der Einzellinsen im Objektiv optimal umgesetzt werden. Die Montage erfolgt systematisch, aufwendige Nachjustierungen können vermieden werden (Abb. 1).

Diese Überlegungen waren für die Linos Photonics GmbH & Co KG der Ausgangspunkt, das Fraunhofer IOF mit der Entwicklung einer Justierdrehmaschine zu beauftragen. Adressiert ist die Entwicklung an Objektive für den ultravioletten Spektralbereich (Abb. 2), bei denen Montagetoleranzen von wenigen Mikrometern erforderlich sind. Zunächst wurden in einer Studie alternative Ansätze zur Realisierung einer Justierdrehmaschine verglichen und bewertet /1, 2/. Im Ergebnis entstand ein Maschinenkonzept, welches auf einer hochgenauen Vertikaldrehmaschine, der Justierung eines elektromagnetischen Spannfutters durch Einleitung mechanischer Impulse sowie einer speziellen Zentrierfehlererkennung basiert.

Dieses Konzept wurde in enger Kooperation mit der Firma Lehmann Präzision GmbH umgesetzt. Basis ist eine Vertikaldrehmaschine mit einem kompakten und schwingungsarmen Natursteinaufbau, hochpräzisen vorgespannten Linearführungen und einer hydrostatischen Spindel /3/. Das im Fraunhofer IOF entwickelte Justierfutter wird unter Rotation durch Justier-

hämmer so verschoben, dass optische Achse und Spindelachse in Koinzidenz gebracht werden. Dazu wird die Dezentrierung der Linse von einem Reflexbildgerät erfasst und dessen Messsignal zur Phase der Drehbewegung in Beziehung gesetzt. Justierschläge werden bei jeder Umdrehung so lange ausgelöst, bis das Signal der Dezentrierung ein Minimum erreicht. Ist die Linse oder Kittgruppe zentriert, erfolgt die CNC-Bearbeitung der oberen und unteren Planfläche sowie des Außendurchmessers der Fassung (Abb. 3).

Die entwickelte Justierdrehmaschine erreicht folgende Parameter:

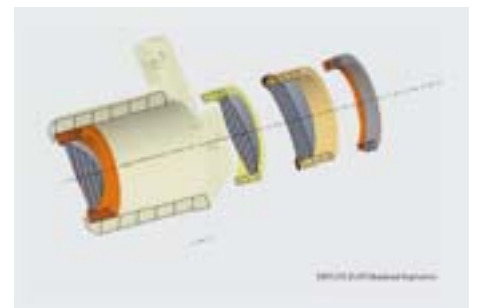
- Zentriergenauigkeit:  
Flächenkipfung 0,1 Bogenminute,  
Dezentrierungen  $< 2 \mu\text{m}$ ,
- Fertigungstoleranzen für Scheitelhöhe und Außendurchmesser:  
 $< 2 \mu\text{m}$ ,
- Ebenheit der Planflächen,  
Zylindrizität des Außendurchmessers:  $< 1 \mu\text{m}$ .

#### Literatur:

- /1/ Ergebnisbericht BMBF-Verbundprojekt »FERMI«, 2007.
- /2/ Patent DE 103 22 587.
- /3/ <http://www.hyprostatik.de>.

Abb. 1:  
Füllfassungsmontage.

Fig. 1:  
Lens assembly.



# Lens centering – key technology for the assembly of high precision optics



The quality of high precision optics strongly depends on centering and positioning of the lenses. On the one hand there are highly developed deterministic grinding and polishing technologies for single lenses, on the other hand assembly is a complex and iterative process. "Lens centering" starts off there. By machining the lens housing in respect to the optical axis the precision of the single lens can be ideally implemented into the objective. The assembly follows systematically – extensive adjustments are not required.

Considering this the Linos Photonics GmbH & Co KG commissioned the Fraunhofer IOF with the design and development of a lens centering machine. The development is mainly directed towards optics for the ultraviolet wavelength (Fig. 2). This application requires assembly tolerances in the range of a few microns. At first, alternative proposals for lens centering machines were compared and reviewed /1, 2/. The result was

a concept based on a highly precise vertical lathe, the adjustment of an electromagnetic support by an impulse drive and sophisticated centering error recognition.

This concept was put into practice in close collaboration with Lehmann Präzision GmbH. The basis was a vertical lathe with a compact and stiff natural granite base, high precise linear slideways and a hydrostatic spindle /3/. The adjustment support – developed at Fraunhofer IOF – will be adjusted by impulse drives during rotation until the coincidence between the optical axis and the spindle axis is reached. Therefore decentration of the lens is measured by an autocollimator.

The measurement signal is set in relation to the phase of rotation and stroke impulses are applied as long as the signal of decentration achieves a minimum. If the lens is centered the lens housing will be machined CNC-controlled (Fig. 3).

The developed centering machine achieves:

- centering accuracy:  
tilt 0.1 arcmin, decenter < 2  $\mu\text{m}$ ,
- machining tolerances regarding vertex height and outer diameter:  
< 2  $\mu\text{m}$
- flatness of plane surfaces, cylindricity of outer diameter:  
< 1  $\mu\text{m}$ .



Abb. 2:  
UV-Objektiv. © Linos.

Fig. 2:  
UV objective. © Linos.



Abb. 3:  
Justierdrehen einer gefassten Linse.

Fig. 3:  
Machining of a housed lens.



# Kompakte Pickup-Optik für mobile Blue-Ray-Datenspeicher – Montagekonzept



Matthias Mohaupt



Erik Beckert



Erik Förster



Peter Schreiber



Ramona Eberhardt

Die nächste Generation mobiler Datenspeicher stellt bei zunehmender Integrationsdichte extrem hohe Anforderungen an die Montage und die Justierung der mikrooptischen Bauteile der gesamten Detektionseinheit. Das hybride optische System (Abb. 1) zum Datenlesen und -schreiben arbeitet bei einer Laserwellenlänge von 407 nm. Die Strahlquelle des Pickups ist eine Laserdiode, die auf eine mikrooptische Bank aus thermisch leitfähigem Material zur effektiven Wärmeableitung gelötet ist. Der Laserstrahl wird in einen Lichtleitstab eingekoppelt, über ein 90° Prisma zur Objektivlinse umgelenkt und in die Disk fokussiert. Ein Halbwellenplättchen (HWP) mit einer Blende zur Reduktion des Streulichts dreht die Polarisation um 90°. Das von der Disk reflektierte Licht wird von einem polarisierenden Strahlteiler (PBS) auf zwei Detektoren gelenkt. Dazu wird die Polarisation des Lichts auf dem Hin- und Rückweg mit einem Viertelwellenplättchen (QWP) um jeweils 45° gedreht. Mit den Detektoren wird neben dem eigentlichen Datensignal auch ein Signal zur Spur- und Fokusregelung generiert.

Die Fertigungsschritte zum Aufbau des mikrooptischen Systems wurden entsprechend der im Prozess auftretenden Temperaturbelastungen evaluiert, ein Justier- und Fixierkonzept wurde entwickelt. Die Laserdiode wird im ersten

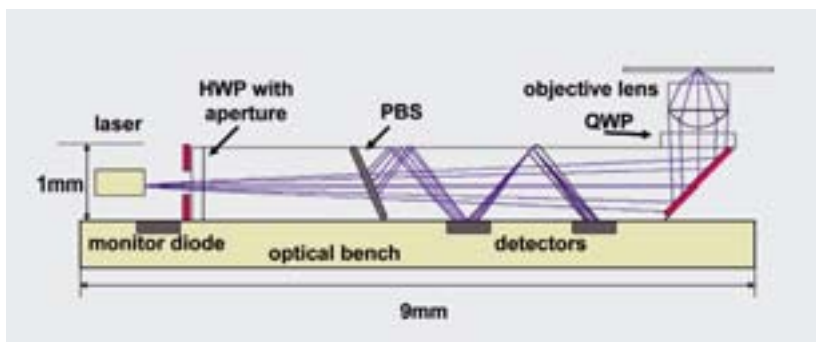
Fertigungsschritt zentriert zum Substrat gelötet, damit wird die Strahlrichtung entlang der Längsachse der mikrooptischen Bank eingestellt. Anschließend werden die Prismenstäbe an der Trennstelle, an der eine Reflexionsschicht appliziert wurde, geklebt. Um einen definierten Strahlquerschnitt im Optiksystem einzustellen, werden Blendenstrukturen in Form von strukturierten Plättchen auf den Prismenlichtleitstab mit einer Positionstoleranz von  $\pm 25 \mu\text{m}$  aufgebracht. Nach dem Fügen der Blende auf den Lichtleitstab wird dieser in seiner Lage zur mikrooptischen Bank justiert und fixiert (Abb. 2). Die Ausrichtung erfolgt dabei zum Substrat und zur Strahlrichtung der Laserdiode. Im finalen Montageschritt erfolgt die Justierung der Objektivlinse zum Lichtleitstab (Abb. 3). Mit der Justierung der Objektivlinse während des Betriebs der Laserdiode sind die optimale Einstellung der Fokusslage und der Ausgleich von Fehlern vorhergehender Montageprozesse möglich.

Basierend auf Präzisionsvorrichtungen (spezielle Greifer, mechanische Anschläge), angepasst an mikrooptische Aufgabenstellungen, wurde ein Montagekonzept umgesetzt, welches die hohen Anforderungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich erfüllt. Erste funktionale Prototypen der Optikbaugruppe liegen vor, es gilt nun im nächsten Schritt die Konzepte auf die Serienfertigung zu übertragen.

Die Arbeiten wurden durch das BMWi im Rahmen des Projektes »4GOOD« (AMSAS) (Unterauftrag von OSRAM Opto Semiconductors GmbH an Fraunhofer IOF) gefördert. Besonderer Dank gilt Herrn Knittel (Deutsche Thomson OHG) und Herrn Behringer (OSRAM) für die konstruktive Diskussion.

Abb. 1: Prinzipaufbau der Pickup-Optik.

Fig. 1: Optical scheme of the pickup-optic.



# Compact pickup-optic for mobile blue-ray-data storage systems – assembly concept



The next generation of mobile data storage devices requires extremely precise assembly and adjustment technologies during the assembly of the micro-optical pickup. The hybrid optical system (Fig. 1) works at a wavelength of 407 nm. The laser source of the pickup is a blue laser diode, which is soldered on a base made of thermal conductive material for reasons of thermal management. The generated laser beam is coupled into a prism assembly, reflected by a 90° prism to an objective lens and focused into the optical disc. A half wave plate (HWP) with a structured aperture for stray light reduction on it rotates the polarization at 90°. The reflected light is focused into an arrangement of two detectors using a polarizing beam splitter (PBS) layer which is deposited onto one prism. The polarization of the laser beam is rotated in a range of 45° two times passing the quarter wave plate (QWP). The used detector detects the high frequent data signal and can also be used for controlling the track and focus determination.

The manufacturing steps of the micro-optical system were evaluated because of the thermal behaviours of the manufacturing process, an alignment and fixation strategy was developed. At first the laser diode is soldered to the substrate, whereby the direction of the laser beam is given by the orientation of the gap of the laser diode. After that the prisms are fixed by adhesive bonding at the prisms' surface on which a polarizing beam splitter layer is deposited. An aperture is structured onto the surface of the half wave plate (HWP), which is assembled to the surface of the first prism, to define a special diameter of the optical beam. The aperture has to be aligned with an accuracy of  $\pm 25 \mu\text{m}$  perpendicular to the optical axis (x- and y-direction). The prism assembly is aligned and fixed by adhesive bonding to the optical bench in the next assembly step (Fig. 2). The alignment of the prism assembly takes place in respect of the optical axis (beam) given by the assembled laser diode. The alignment of the objective lens to the prism assembly is the final

assembly step (Fig. 3). By the alignment of the objective lens to the laser beam the correction of further assembly steps is possible.

The developed and manufactured handling devices such as grippers and mounting plates with integrated alignment structures were adapted to the special requirements of micro- and micro-optical-assembly with alignment uncertainties in a micron range. The first functional assemblies of the micro-optical pickups have been realized. The next step will be the adaption of the assembly technology to mass production.

The work is supported by the German BMWi funding the project "4GOOD" (AMSAS) (sub-order by the OSRAM Opto Semiconductors GmbH to IOF). We would like to thank Mr. Knittel (Deutsche Thomson OHG) and Mr. Behringer (OSRAM) for support and discussions.

Abb. 2: Montage des Lichtleitstabes.

Fig. 2: Mounted prism assembly.

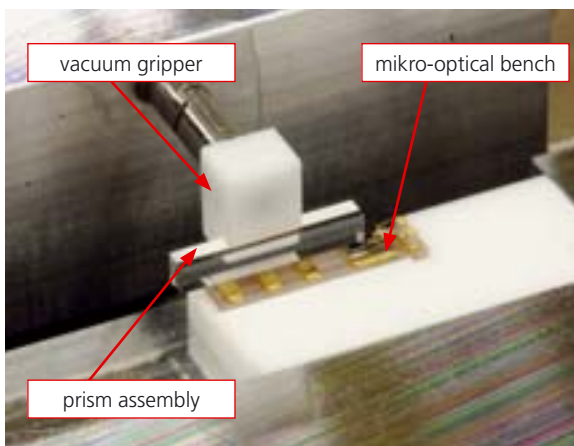
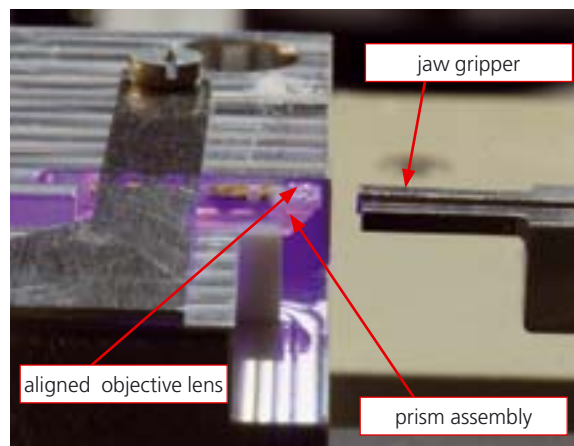


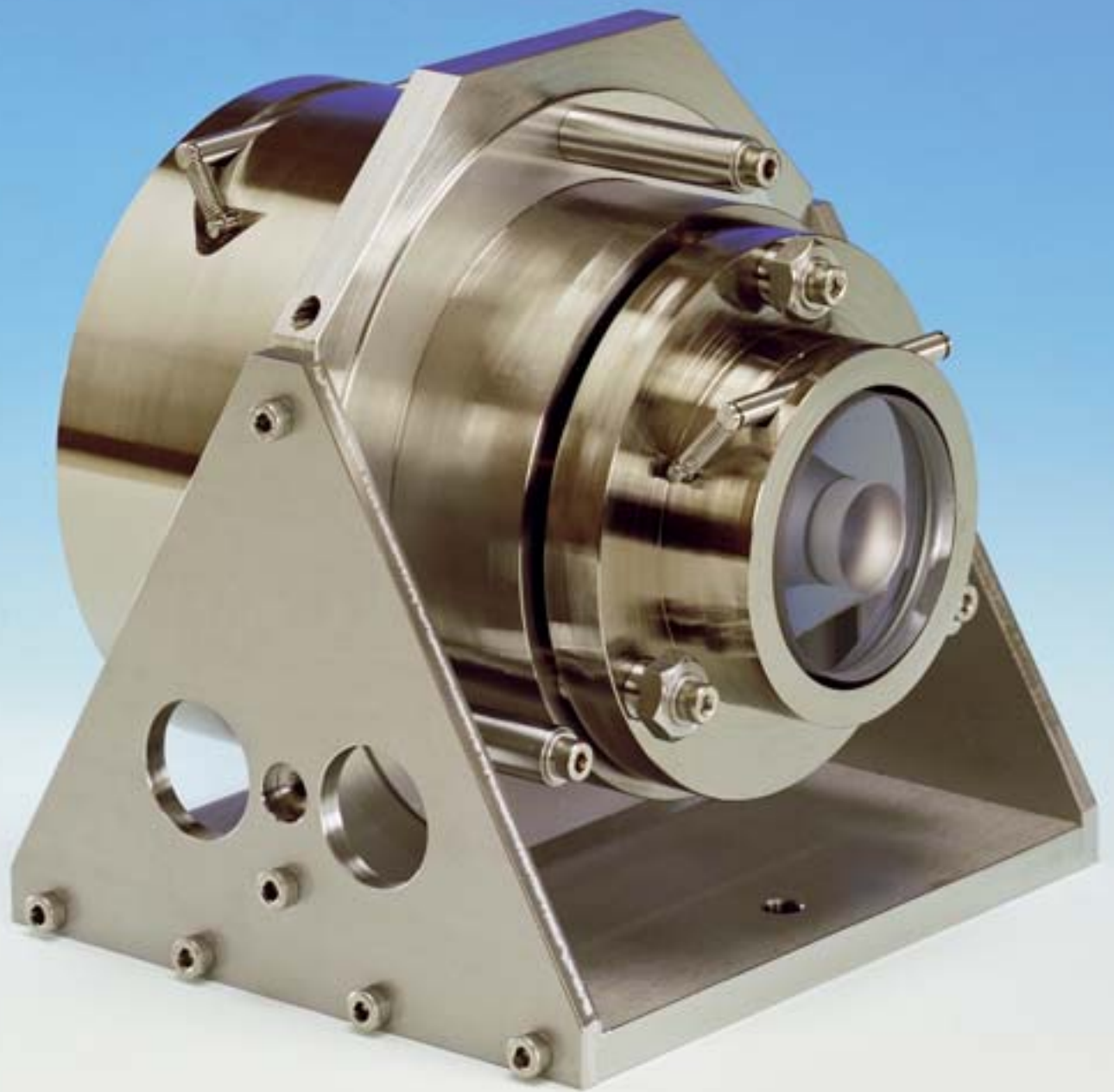
Abb. 3: Aufbau zur Justierung der Objektivlinse.

Fig. 3: Device for objective lens assembly.



Optomechanische Präzisionssysteme  
Opto-mechanical Precision Systems







Gerhard Kalkowski



Stefan Risse



Sandra Müller

Im weltweiten Wettlauf um die Verringerung der Strukturbreite in Halbleiter-Bauelementen gilt unvermindert das »Moorsche Gesetz«. Es besteht kein Zweifel, dass die Extreme-Ultraviolet-Lithography (EUVL) eine der aussichtsreichsten Technologien zur Ablösung der gegenwärtigen Immersions-Lithographie darstellt. Um EUVL-Masken – voraussichtlich bei kritischen Dimensionen  $\leq 32$  nm – einzusetzen /1/, sind elektrostatische Chucks höchster Genauigkeit und Stabilität erforderlich.

Nur spezifische Werkstoffe mit sogenannter »Null-Ausdehnung« gewährleisten die erforderliche Form- und Lage-Stabilität bei unvermeidlichen Temperaturschwankungen. Am Fraunhofer IOF werden seit vielen Jahren Lithographie-Tools aus diesen Materialien entwickelt und hergestellt. Zum Chucken von EUVL-Masken werden – neben hoher Steifigkeit – besondere Ansprüche an Ebenheit und elektrostatische Kraft gestellt /2, 3/. So muss die Chuck-Ebenheit über die »quality area« von  $(142 \text{ mm})^2$  besser als 50 nm (PV) sein und die Kraft pro Flächeneinheit soll 15 kPa betragen, um die 6,35 mm dicke Maske beim chucken hinreichend »einebnen« zu können.

Im Rahmen technologischer Studien wurde ein erster Chuck-Prototyp realisiert, der die geforderte Spezifikation nach SEMI erfüllt. Abbildung 1 zeigt die Oberfläche im Bereich der »quality area«, wie sie mit einem  $\lambda/30$  Normal ( $\lambda = 633$  nm) an einem Fizeau-Interferometer vor der Pin-Strukturierung gemessen wurde.

Eine umfassende Charakterisierung dieses Prototypen wurde im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit mit Partnern der University of Wisconsin (USA) und der SEMATECH (USA) gestartet. Nach Vorgaben der SEMATECH ist

ein Teststand entstanden, mit dem ein präzises Auflegen und Abnehmen der Maske im Vakuum möglich ist (Abb. 2). Aus den interferometrischen Messungen im Vakuum-Prüfstand in den USA werden endgültige Aussagen zur Eignung für EUVL erwartet.

Das Einsatzgebiet von Chucks ist nicht nur auf Lithographie begrenzt, auch in der Messtechnik sind präzise Chucks erforderlich. Ein herausragendes Beispiel ist ein Unterdruck-Chuck für den Einsatz in einem Large-Range-Atomic-Force-Microscope (AFM) mit Verfahrensbereich 300 mm, welcher mit der Firma SURFACE IMAGING SYSTEMS GmbH (Herzogenrath) realisiert wurde. Abbildung 3 zeigt den Chuck, der für Messungen an Normalatmosphäre verwendet wird.

Der Chuck wurde aus Glaskeramik mit minimaler thermischer Ausdehnung ( $2 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ) als monolithischer Körper hergestellt und ermöglicht Höhenauflösungen im sub-nm Bereich über Messfelder von einigen  $\mu\text{m}^2$ . Durch eine zonale, mikrostrukturierte Oberfläche kann der Chuck für ein breites Spektrum von Substraten (Wafer: 1 bis 12 Zoll und Masken: 5 bis 12 Zoll) eingesetzt werden. Zur Reduzierung von unerwünschten Partikeleinflüssen ist die Oberfläche mit einem Pin-Muster strukturiert und besitzt nur ca. 5 % Kontaktfläche zum Substrat.

#### Literatur:

- /1/ International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), <http://public.itrs.net>.
- /2/ Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.; Harnisch, G.: Electrostatic chuck for EUV masks, Microelectronic Engineering 83 (2006) 714.
- /3/ SEMI P40-1103 Specification for EUV Mask Substrate Chucking, <http://www.semiatech.org>.

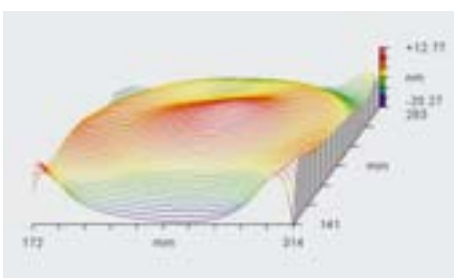


Abb. 1: Ebenheit des EUV-Mask-Chucks (vor Pin-Strukturierung).

Fig 1: Flatness of EUV mask chuck (before surface structuring).



In the world-wide race for reduced feature sizes in semiconductor circuits "Moore's Law" still prevails. There is no doubt that Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) is one of the most promising technologies to replace current Liquid Immersion Lithography. The use of EUVL masks is expected to take place at critical dimensions  $\leq 32$  nm and requires electrostatic chucks of extreme flatness and stability /1/.

Only materials with "zero" thermal expansion can provide the necessary shape and placement stability for such an application, since inevitable drifts in temperature have to be accounted for. At Fraunhofer IOF, various lithography tools from such materials have been designed and manufactured in the past. For the chucking application – besides high stiffness – notably a high flatness and high force are mandatory /2, 3/. In fact, chuck flatness within the central 142 mm by 142 mm "quality area" must be better than 50 nm (PV) and electrostatic force per area must reach 15 kPa to "flatten" a bended 6.35 mm thick EUVL mask.

Within technological investigations at Fraunhofer IOF, a chuck prototype has been realized that fulfils these demanding SEMI requirements. Figure 1 shows the chuck surface in the region of the quality area as measured before pinstructuring with a Fizeau interferometer using a  $\lambda/30$  reference flat ( $\lambda = 633$  nm).

In a cooperative effort, together with partners from the University of Wisconsin (USA) und SEMATECH (USA), a broad characterization of this prototype has been started. According to specifications from SEMATECH, a test setup was created that allows for a repeated mounting and demounting of a probe mask on the chuck in

vacuum (Fig. 2). From the projected interferometric measurements in a vacuum chamber in the USA, conclusive results for EUVL suitability of the chuck are expected.

Clearly, the application field of high precision chucks is not limited to lithography. In many measurement applications, similar needs exist. A prominent example is a new vacuum chuck for use in a large range Atomic Force Microscope (AFM) with a measurement range of 300 mm. Figure 3 shows this chuck, which is used under ambient atmosphere and operated by applying vacuum to the substrate backside. This prototype has been developed and put into practice in cooperation with SURFACE IMAGING SYSTEMS GmbH (Herzogenrath), Germany.

The chuck represents a monolithic block manufactured from a glass ceramic material with extremely low thermal expansion ( $2 \cdot 10^{-8} \text{K}^{-1}$ ). It allows for topography analysis in the sub-nm range for measurement fields of a few  $\mu\text{m}^2$  and can be used for a broad range of substrates, i. e. wafers from 1 to 12 inch diameter and masks from 5 to 12 inch edge length due to zonal surface structuring. To minimize any distortion effects from contaminating particles on the substrate backside, the chuck surface is provided with a regular pin pattern of several  $\mu\text{m}$  height, that supports the substrate on about 5 % of its area.

References::

- /1/ International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), <http://public.itrs.net>.
- /2/ Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.; Harnisch, G.: Electrostatic chuck for EUV masks, *Microelectronic Engineering* 83 (2006) 714.
- /3/ SEMI P40-1103 Specification for EUV Mask Substrate Chucking, <http://www.semitech.org>.



Abb. 2: Versuchsaufbau zur SEMI-Charakterisierung.

Fig 2: Experimental set-up for characterization according to SEMI standards.



Abb. 3: Unterdruck-Chuck für Large Range AFM.

Fig. 3: Vacuum chuck for a large range AFM.

# Echtzeit-Bildverarbeitung für den ultra-dünnen Bildsensor



Raúl Tudela



Andreas Brückner



Jacques Duparré



Andreas Bräuer

Das große Gesichtsfeld bei geringer Baugröße macht das Appositions-Facettenauge der Insekten zu einem evolutionären Erfolgsmodell. Das zumeist geringe Auflösungsvermögen wird durch Signalverarbeitung und Verschaltung in den ersten Nerven-ebenen teilweise kompensiert. Inspiriert von diesen Eigenschaften wurde ein Bildsensor nach dem Prinzip künstlicher Facettenaugen entwickelt [1], welcher im Wesentlichen aus einem planaren Mikrolinsenarray besteht, in dessen Brennweite sich ein optoelektronischer Sensor befindet (Abb. 1). Der Aufbau ist so gestaltet, dass jeder Kanal einen individuellen Teil des Gesichtsfelds überträgt. Diese Optiken besitzen das Potenzial zu höchster Miniaturisierung und Integration mit der Optoelektronik (Abb. 2).

Zur Verbesserung des Auflösungsvermögens gehen wir der Fragestellung nach, ob herkömmliche Bildverarbeitungsmethoden bei einem flachen Sensor anwendbar sind. Der erste Bearbeitungsschritt besteht darin, jene Pixel auszuwählen, die durch die jeweilige Mikrolinse beleuchtet werden, da der Sensor einen gegenüber dem Mikrolinsenarray meist höheren Füllfaktor besitzt. Eigens dafür wurde ein Programm entworfen, welches die beleuchteten Pixel einer homogen ausgeleuchteten Objektfläche erkennt und in einem Register speichert. Dabei wird eine eventuelle Falschausrichtung des Linsenarrays zum Pixelraster (Abb. 3) ausgeglichen.

Ein zweites Programm verwendet die gespeicherten Daten, um das Bild so anzuzeigen, wie es durch das Facettenaugenobjektiv gesehen werden würde. Verschiedene Modi, wie die Anzeige von einem oder mehreren Pixeln pro Kanal, sind ebenso möglich wie das Abziehen des Dunkelstroms und die Kontrasterhöhung durch eine Normierung des Grauwertistogramms.

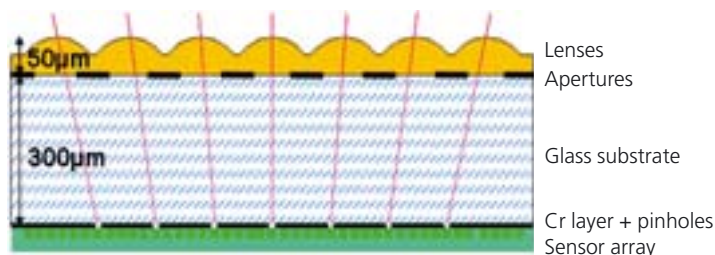
Des Weiteren kann aufgrund der geringen Pixelzahl ein Wiener Filter in Echtzeit auf das Bild angewendet werden. Diese Art der inversen Filterung wird zur Bildwiederherstellung benutzt, wenn die Punktbildverwaschungsfunktion bekannt ist. Das durch den Detektionsprozess eingebrachte Rauschen wird dabei additiv modelliert.

Um den Wiener Filter einsetzen zu können, muss die Übertragungsfunktion des Systems bekannt sein. Diese kann aus der Fourier Transformation der Winkelempfindlichkeitsfunktion (ASF) eines Kanals gewonnen werden. Der entstehende analytische Ausdruck ist kompliziert, es ist jedoch möglich, eine Gausse Näherung zu verwenden, die für natürliche Facettenaugen abgeleitet wurde.

Die vorgestellten Bildverarbeitungsmethoden ermöglichen die Verbesserung des Bildkontrasts (Abb. 4). Unter Verwendung des Wiener Filters wurde für eine schräge Kante eine Erhöhung der Kontrastübertragung von 48 % bei einer Frequenz von 0,4 Cycles/Pixel gemessen (Abb. 5).

Abb. 1:  
Funktionsweise eines künstlichen  
Facettenaugenobjektivs.

Fig. 1:  
Working principle of a planar artificial  
apposition compound-eye objective.



## Literatur:

- [1] Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.: Thin compound-eye camera, Appl. Opt. 44 (15), pp. 2949–2956 (2005).



In nature many small invertebrates present apposition compound eyes, which combine small size with a large field of view but also low spatial resolution. Based on these principles an artificial compound-eye imaging system has been developed [1] consisting of one planar array of microlenses positioned on a spacing structure (Fig. 1) and coupled to a commercial CMOS optoelectronic detector array of different pitch, providing different viewing directions for the individual optical channels. These sensors are designed for a minimum total track length, a high degree of integration with the optoelectronics which makes them potentially low cost (Fig. 2).

We implemented image processing methods to further increase the resolution of the images captured with the thin compound-eye sensor. The first step is to select the pixels of the sensor that correspond to the different channels of the microlens array, which exhibit a lower fill factor than the CMOS sensor used. A program

automatically selects the pixels which correspond to the channels of the microlens array taking into account possible misalignment between the sensor pixels and the lenslets (Fig. 3). The coordinates of useable pixels are then saved in a look-up-table.

Then another program uses the look-up-table to display the image as it is seen through the compound-eye objective. We implemented different modes to display the image: using one or more pixels per channel, removing the dark signal noise or increasing the contrast by a normalization using a histogram stretching method.

As another option a Wiener filter can be used to process the image in real time. This is one of the more extended methods for linear image restoration, which allows restoring the image when the degradation introduced by the optical system is known while taking into account the noise introduced in the detection step. For computing the Wiener filter it is necessary to know the frequency response of the system.

This can be obtained by performing the Fourier transform of the angular sensitivity function (ASF) of the system. The expression of this term can be analytical complex, but it is possible to use a Gaussian approximation derived for natural compound eyes.

The processing methods allow increasing the contrast of the images (Fig. 4). In particular, when using the Wiener filter, with the image of a slanted edge, the spatial frequency response of the system is increased over a 48 % for a frequency of 0.4 cycles/pixel (Fig. 5).

Abb. 2: Ultra-dünner Bildsensor.

Fig. 2: Ultra-thin compound-eye sensor.



Abb. 3: Schematische Darstellung des Kalibrierungsvorgangs.

Fig. 3: Scheme of the channel selection.

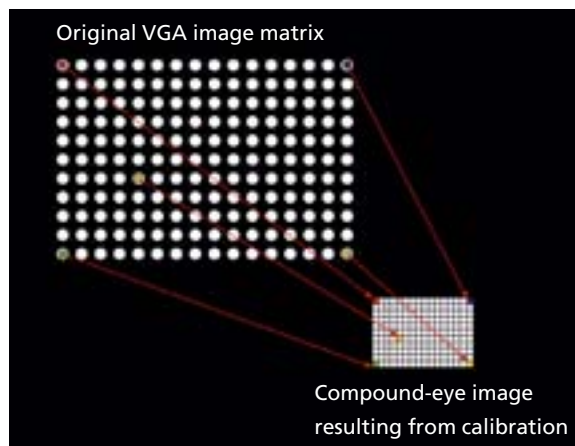


Abb. 4: Mit dem Facettenaugensensor aufgenommene Bilder ohne (links) und unter Verwendung der Bildverarbeitungsmethoden (rechts).



Fig. 4: Images captured with the thin compound camera without (left) and using the image processing methods (right).

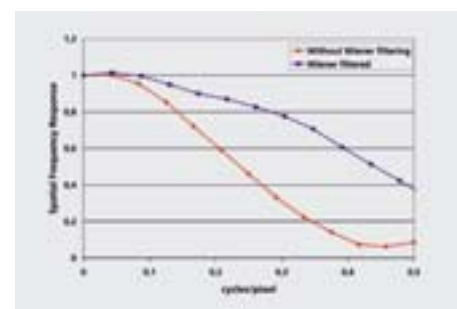


Abb. 5: Gemessene Modulationstransferfunktion mit und ohne Wiener Filter.

Fig. 5: Spatial frequency response of a slanted edge with and without using the Wiener filter.



Mirosław Rekas



Eva Mehner



Christian Wirth



Christoph Damm



Thomas Schreiber

Im Rahmen eines internen Forschungsprogramms der FhG wurde ein gepulstes (ns) Hochleistungsfaserlasersystem hoher Puls wiederholrate aufgebaut.

Der Faserlaser besitzt einen gütegeschalteten Resonator. Das aktive Element ist eine spezielle photonische Doppelkernfaser mit hoher Pumplichtabsorption (30 dB/m) /1/. Der damit mögliche kurze Resonator erlaubt eine kurze Pulsdauer im gütegeschalteten Betrieb. Weiterhin erlaubt die Faser hohe mittlere Leistungen und damit hohe Puls wiederholraten. Die mikrostrukturierte Faser verfügt über einen Pumpkern mit einem Durchmesser von 200  $\mu\text{m}$  bei einer numerischen Apertur (NA) von 0,55 und einem Laserkern mit einem Durchmesser von 70  $\mu\text{m}$  bei einer NA von nur 0,03. Damit kann nahezu beugungsbegrenzte Strahlung erzeugt werden. Der Aufbau wurde experimentell erfolgreich im Labor des IAP der FSU Jena demonstriert /2/. Für die Umsetzung in einen Prototyp wurden ein optimiertes Optikdesign für die Strahlgeometrie im Resonator sowie eine optimierte Pumplichteinkopplung entworfen. Weiterhin wurden eine thermische Analyse und das Kühlkonzept für die Faser und Pumpdioden erstellt und das mechanische Design und die Elektroniksteuerung erarbeitet (Abb. 1). Die thermische Analyse war aufgrund der durch den Laserprozess in der Faser erzeugten und abzuführenden Wärme nötig. Zum Abführen der Wärme wurde die Faser in einen passiv gekühlten Aluminiumkörper eingebettet.

Durch das mechanische Design wurde der optische Aufbau von den Schwingungen und thermischen Lasten der Versorgungseinheit (Lüfter, Netzteile etc.) entkoppelt, sodass die Integration aller Bauteile in einem Gehäuse vollzogen werden konnte (Abb. 2).

Damit weist das System nur zwei elektrische Schnittstellen auf: Stromversorgung und USB-Steuerung.

Die wichtigsten Kenndaten des Lasersystems (Abb. 3, Abb. 4) sind:

- Abmessungen (WHL): 230 mm x 310 mm x 950 mm,
- linear polarisiertes Licht,
- $M^2_{x/y} = 1,65/1,5$ ;  
Messmethode: 90/10 (spiricon™ M<sup>2</sup>-200),
- $\lambda = 1031 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 1,7 \text{ nm}$  (Abb. 3),
- Pulsdauer, Pulsenergie: 15 ns @ 0,5 mJ (Abb. 4),
- Wiederholfrequenz: 30 kHz–100 kHz,
- Mittlere Leistung: max. 25 W.

Der Laser wurde zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Werkstoff und Strahltechnik Dresden in eine Beschriftungseinheit integriert. Diese wurde funktionstüchtig auf der Laser 2007 in München vorgestellt. Eine weitere Skalierung der Ausgangsparameter im aktuellen Aufbau wird angestrebt.



Abb. 1: Systemaufbau (Explosionsdarstellung).

Fig. 1: Exploded view of the system.



In the framework of the internal research program (MAVO) of the Fraunhofer-Gesellschaft a high power fiber laser system operating in ns-, high repetition rate regime was constructed.

The fiber laser consists of a q-switched resonance cavity. A fiber of special design (high absorption 30 dB/m, double clad, photonic crystal fiber) was chosen for the active medium of the laser. Short absorption length allows for small pulse duration in the q-switched mode. Additionally, the fiber design enables high average power and, as a consequence, higher repetition rates. The micro-structured fiber consists of a pump core with a 200  $\mu\text{m}$  diameter and a numerical aperture (NA) of 0.55 as well as laser core with 70  $\mu\text{m}$  diameter and an NA of only 0.03. These parameters made it possible to achieve a nearly diffraction limited beam. The laboratory model of the system was successfully demonstrated at the Institute for Applied Physics (IAP) /2/. During the prototype realization, the optimized optical design of the beam in the resonator cavity and optimized pump coupling were developed. Furthermore, a thermal analysis and cooling concept for both, the fiber as well as for the pump diode, were developed; the mechanical design and electronic control of the device were also elaborated (Fig. 1). The thermal analysis of the system was necessary because of the heat generated in the fiber itself (a consequence of laser process occurring in the active medium). In order to dissipate the heat, the fiber was incorporated into a passively cooled aluminum heat sink.

The mechanical design provides both vibrational and thermal isolation from the supply part (fans, power supply etc.) of the system. It made the integration of all system components into one unit possible (Fig. 2), so that the device features two electrical interfaces only: power supply and USB-based control.

The most important features of the laser system (Fig. 3, Fig. 4)

- dimensions (WHL):  
230 mm x 310 mm x 950 mm,
- linear polarized light,
- $M^2_{x/y} = 1.65 / 1.5$
- measurement method:  
90/10 (spiricon™ M<sup>2</sup>-200),
- $\lambda = 1031 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 1.7 \text{ nm}$  (Fig. 3),
- pulse width/energy:  
15 ns @ 0.5 mJ (Fig. 4),
- repetition rate:  
30 kHz–100 kHz,
- average power:  
max. 25 W.

In collaboration with the Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS, Dresden) the laser was integrated into marking system unit. The fully functional system was exhibited at the Laser 2007 tradeshow in Munich. Further scaling of the laser output parameters is intended.

#### References:

- /1/ Limpert, J.; Deguil-Robin, N.; Manek-Hönninger, I.; Salin, F.; Röser, F.; Liem, A.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.: High-power rod-type photonic crystal fiber laser, *Opt. Express* 13, 1055–1058 (2005).
- /2/ Schmidt, O.; Rothardt, J.; Röser, F.; Linke, S.; Schreiber, T.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Ermeneux, S.; Yvernault, P.; Salin, F.; Tünnermann, A.: Millijoule pulse energy Q-switched short-length fiber laser, *Opt. Lett.* 32, 1551–1553 (2007).



Abb. 2:  
Faserlasersystem.

Fig. 2:  
Fiber laser system.

Abb. 3:  
Ausgangsspektrum.

Fig. 3:  
Output spectrum.

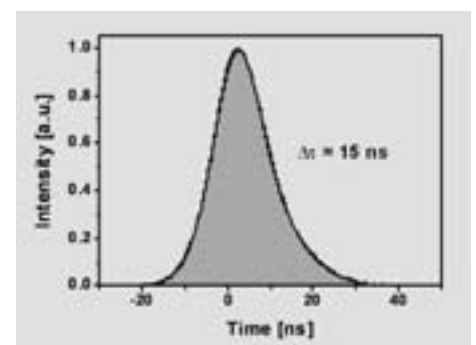
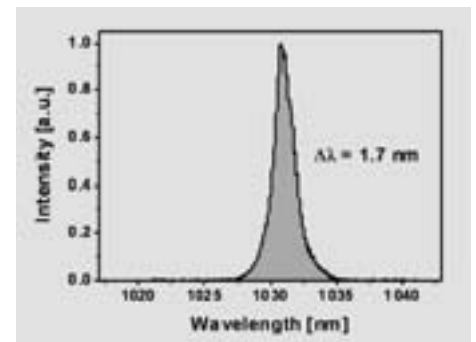


Abb. 4:  
Zeitliches Pulsprofil.

Fig. 4:  
Temporal pulse profile.

# 1 mJ Ultrakurzpuls-Faserverstärker hoher Leistung



Jens Limpert



Fabian Röser



Tino Eidam



Jan Rothhardt



Oliver Schmidt



Damian Schimpf

Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Ultrakurzpulslaser haben sich in den letzten Jahrzehnten als Basis für viele wichtige Anwendungen in der fundamentalen Forschung wie auch in der alltäglichen Praxis etabliert. Möglich wurde dies durch die rapide Entwicklung der Festkörperlaser-Technologie. Durch neuartige Designs des Verstärkungsmediums in Form des Scheiben- oder des Faserkonzepts konnten thermo-optische Probleme bewältigt und neue Leistungsklassen erreicht werden. Zusätzlich dazu müssen zur Erzeugung intensiver kurzer Pulse einige grundlegende Limitierungen überwunden werden. An der Entwicklung von Lasersystemen mit hohen Ausgangsleistungen und hohen Pulsenergien auf Basis des Faserkonzepts hatte das Institut für Angewandte Physik in den letzten Jahren einen signifikanten Anteil /1/.

Grundlage dieser Systeme ist die Reduzierung der Pulsspitzenintensität während der Verstärkung zur Vermeidung von nichtlinearen Effekten, die zu Einbußen in der Pulsqualität führen. Einerseits geschieht das über eine zeitliche Streckung der Pulse mit Hilfe dispersiver Elemente (chirped pulse amplification = CPA), andererseits kann die Pulsintensität in der Verstärkerfaser auch über eine größere Modenfläche reduziert werden. Besonders große Modenflächen können über spezielle Designs sogenannter photonischer Kristallfasern erzeugt werden. Den schematischen Aufbau des Faser-CPA-Systems zeigt Abb. 1.

Mit diesem Konzept wurde ein Kurzpulsfasersystem mit 100  $\mu\text{J}$  Pulsenergie am Institut für Angewandte Physik aufgebaut /2/. Die Pulse des »long-cavity« Kurzpulsoszillators werden mit Hilfe dielektrischer Gitter auf ca. 2,0 ns gestreckt. Ein akustooptischer Modulator bietet die Möglichkeit, die Pulsfrequenz flexibel zwischen 10 kHz und 10 MHz einzustellen. Ein Vorverstärker basierend auf einer polarisationserhaltenden photonischen Kristallfaser mit einem Modenfelddurchmesser von 35  $\mu\text{m}$  erhöht die mittlere Leistung auf bis zu 6 W, welche als Seed-Signal für den Hauptverstärker desselben Fasertyps dient. Die 100  $\mu\text{J}$  Pulsenergie wurde bei einer Pulsfrequenz von 0,9 MHz demonstriert, wodurch sich eine hohe mittlere Leistung von 90 W ergibt. Die Pulsdauer betrug dabei 500 fs. Der negative Einfluss der Nichtlinearität auf die Pulsqualität wurde hier schon deutlich und somit eine weitere Steigerung der Pulsenergie nicht möglich. Ziel der weiteren Untersuchungen war eine Auslotung der maximal extrahierbaren Pulsenergie des Faser-CPA-Systems /3/. Ein Teil des hierfür verwendeten Aufbaus ist in Abb. 2 dargestellt.

Dazu wurde die Hauptverstärkerfaser durch eine »rod-type« photonische Kristallfaser ersetzt. Dieses am IAP mitentwickelte Faserdesign /4/ zeichnet sich dadurch aus, dass die eigentliche Faserstruktur mit einem dicken Glas-mantel umgeben ist.

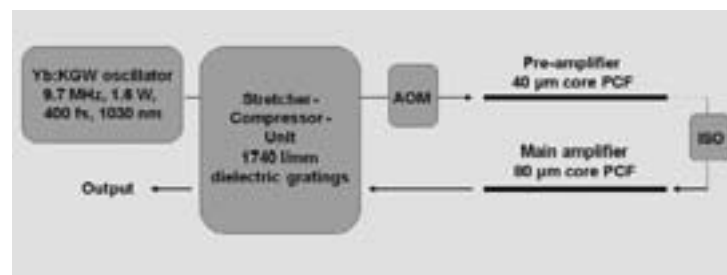


Abb. 1:  
Schematischer Aufbau des Faser-CPA-Systems.

Fig. 1:  
Schematic setup of the fiber CPA system.



# 1 mJ ultra-short pulse fiber amplifier with high average power



In recent decades ultra-short pulse lasers have been established as the basis for many important applications in fundamental research as well as in everyday practice. This was possible due to the rapid development of solid-state laser technology. Through innovative designs of the gain medium in the form of the disc or the fiber concept thermo-optical problems could be overcome and new performance classes could be achieved. In addition to this a couple of fundamental limitations have to be overcome to produce intense short pulses. A significant proportion of the development of laser systems with high output power and high pulse energies on the basis of the fiber concept was contributed by the Institute of Applied Physics in the last years /1/.

The basis of these systems is the reduction of the pulse peak intensity during amplification to avoid non-linear effects which lead to losses in the pulse quality. Firstly, this is done through a temporal elongation of the pulses using dispersive elements (chirped pulse amplification = CPA), on the other hand, the pulse intensity in the fiber amplifier can be reduced through a larger mode area. Particularly large mode areas can be achieved with specific designs of so-called photonic crystal fibers (Fig. 1).

Following this approach, a short-pulse fiber laser system with 100  $\mu\text{J}$  pulse energy was developed at the Institute of Applied Physics /2/. The pulses of the „long-cavity“ ultrashort pulse oscillator are stretched to about 2.0 ns using dielectric gratings. An acousto-optical modulator enables a flexible pulse repetition rate between 10 kHz and 10 MHz. A preamplifier based on a polarization maintaining photonic crystal fiber with a mode field diameter of 35  $\mu\text{m}$  increases the average power up to 6 W, which serves as seed signal

for the main amplifier consisting of the same fiber type. The 100  $\mu\text{J}$  pulse energy was demonstrated at a pulse repetition frequency of 0.9 MHz, resulting in a high average power output of 90 W. The pulse duration was 500 fs. The negative influence of non-linearity on the pulse quality was already considerable and therefore a further increase in pulse energy not possible. The goal of further investigations was to explore the maximum extractable pulse energy of the fiber CPA system /3/.

For this purpose the main amplifier fiber was substituted with a „rod-type“ photonic crystal fiber. This fiber design /4/, co-developed at the IAP, is characterized by the fact that the actual fiber structure is surrounded by a thick glass cladding.

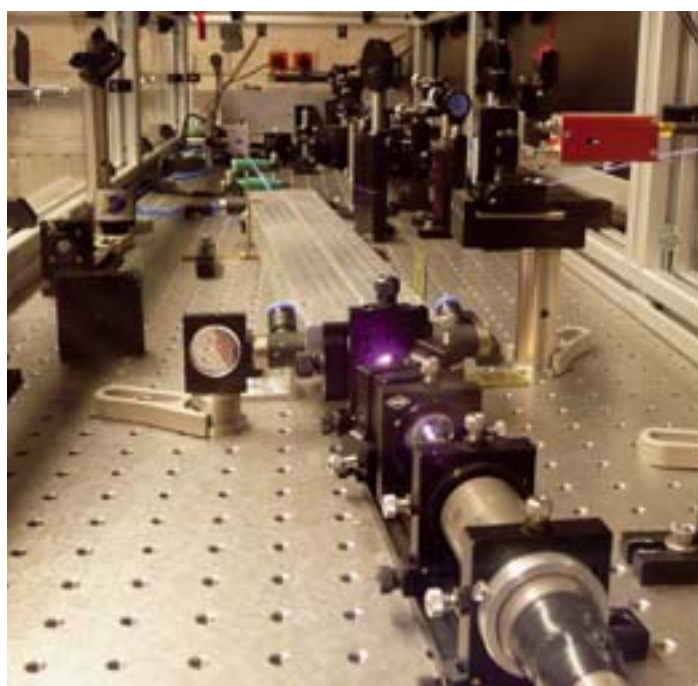


Abb. 2:  
Ultrakurzimpuls-Faserverstärkersystem  
am IAP.

Fig. 2:  
Ultra-short pulse fiber amplifier  
system at the IAP.

Zum Einen führt das zu einer erhöhten mechanischen Stabilität, es wird kein Polymerschutzmantel mehr benötigt, was im Hochleistungsbetrieb thermische Vorteile hat. Zum anderen wird durch die erhöhte Steifigkeit eine Biegung verhindert und die Propagationsverluste für den nur schwach geführten Lasermode werden minimiert.

Die Faser ist durch folgende Parameter gekennzeichnet:

- Kerndurchmesser: 80  $\mu\text{m}$ ,
  - Pumpkerndurchmesser: 200  $\mu\text{m}$ ,
  - Außendurchmesser: 1,5 mm,
  - Pumplichtabsorption @ 976 nm:  $\sim 30 \text{ dB/m}$ ,
  - Genutzte Faserlänge: 120 cm.
- Der Grundmode der Faser konnte stabil, auch bei hohen Leistungen, angeregt werden. Als Modenfelddurchmesser wurde 70  $\mu\text{m}$  bestimmt (Abb. 3).

Diese Faser zeigt eine interessante Verstärkercharakteristik, d. h. mittlere Ausgangsleistung als Funktion der Pumpleistung und der Seedleistung. Zu beobachten ist eine Sättigung der Ausgangsleistung bei geringen Seedleistungen. Dieses Verhalten ist zurückzuführen auf die Sättigung der

Pumplichtabsorption, d. h. es wird nur ein bestimmter Teil der in der Faser gespeicherten Energie extrahiert, die Inversion erreicht ihr Maximum und eine weitere Erhöhung der Pumpleistung führt zu keiner Steigerung der Ausgangsleistung, da das Material vollständig gebleicht ist (Abb. 4).

In Verbindung mit der kurzen Absorptionslänge bietet diese Faser eine extrem geringe Nichtlinearität und eignet sich somit zur Erzeugung von Femtosekunden-Pulsen mit mehr als 1 mJ Pulsenergie (Abb. 5).

Durch das oben beschriebene Phänomen der Pumplichtsättigung wurde ein Kompromiss zwischen maximal erreichbarer Verstärkung durch hohe Seedleistung und verbesserter Pulsqualität durch geringere Nichtlinearität nötig. Bei einer Puls-wiederholrate von 200 kHz und 0,5 W Seedleistung ergab eine Pumpleistung von 230 W eine mittlere Ausgangsleistung des Hauptverstärkers von 145 W. Diese Pulse konnten mit einer Effizienz von 70 % auf eine Pulsdauer von 780 fs komprimiert werden. Nach der Kompression betrug die Pulsenergie

500  $\mu\text{J}$  (100 W mittlere Leistung). Bei 50 kHz und 70 mW Seedleistung waren 180 W Pumpleistung für 71 W Ausgangsleistung nötig, was einer Pulsenergie von 1,45 mJ entspricht. Nach der Kompression ergab das eine Pulsenergie von 1 mJ bei 50 W mittlerer Leistung. Die Pulsdauer entsprach 800 fs, eine leichte Verschlechterung der Pulsqualität mit steigender Energie ist zu beobachten. Die entsprechende Pulsspitzenleistung betrug 1 GW, ein Wert der sonst mit keinem anderen Faserlasersystem erreicht werden konnte.

Literatur:

- /1/ Limpert, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.: High-power ultra-fast fiber laser systems, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 12, 233–244 (2006).
- /2/ Röser, F.; Schimpf, D.; Schmidt, O.; Ortaç, B.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: 90 W average power 100  $\mu\text{J}$  energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system, Opt. Lett. 32, 2230–2232 (2007).
- /3/ Röser, F.; Eidam, T.; Rothhardt, J.; Schmidt, O.; Schimpf, D. N.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: Millijoule Pulse Energy High Repetition Rate Femtosecond Fiber CPA System, Opt. Lett. 32, 3495–3497 (2007).
- /4/ Limpert, J.; Schmidt, O.; Rothhardt, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.; Ermeneux, S.; Yvernault, P.; Salin, F.: Extended single-mode photonic crystal fiber lasers, Optics Express 14, 2715–2720 (2006).

Abb. 3: Nahfeld-Intensitätsprofil der rod-type Faser.

Fig. 3: Nearfield-Intensity profile of the rod-type fiber.

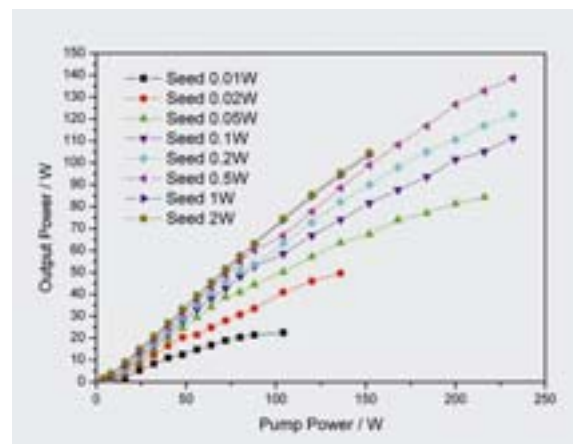
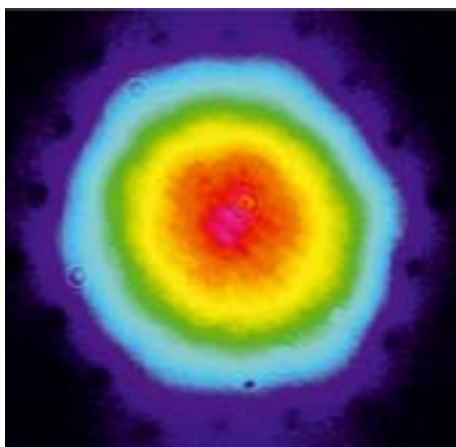


Abb. 4: Verstärkungscharakteristik der rod-type Faser als Hauptverstärker im Faser-CPA-System.

Fig. 4: Gain characteristics of the rod-type fiber as main amplifier in the fiber CPA system.



Firstly, this leads to a higher mechanical stability, as a protective polymer coating is no longer needed, which has thermal advantages in the high-performance operation. Secondly, the increased stiffness prevents bending and the propagation losses for the weakly guided laser mode are minimized.

The fiber is characterized by the following parameters:

- core diameter: 80  $\mu\text{m}$ ,
- pump core diameter: 200  $\mu\text{m}$ ,
- outer diameter: 1.5 mm,
- pumping light absorption @ 976 nm:  $\sim 30$  dB/m,
- used fiber length: 120 cm.

The fundamental mode of the fiber could be excited steadily, even at high powers. The mode field diameter was measured to be 70  $\mu\text{m}$ .

This fiber amplifier shows an interesting gain characteristic, i.e. average output power as a function of pump and seed power. Observable is a saturation of output power at low seed powers. This behaviour is due to the saturation of the pump light absorption, i.e. only a

certain part of the energy stored in the fiber is extracted, the inversion reaches its maximum and a further increase in pump power leads to no increase in power output because the material is completely bleached.

In connection with the short absorption length, this fiber has an extremely low non-linearity, and thus is suitable for the generation of femtosecond pulses with more than 1 mJ pulse energy.

Due to the above-described phenomenon of pump light saturation a compromise between maximum achievable amplification through high seed power and improved pulse quality through lower non-linearity was necessary. At a pulse repetition rate of 200 kHz and 0.5 W seed power a pump power of 230 W resulted in an average power output of the main amplifier of 145 W. These pulses could be compressed down to a pulse duration of 780 fs with an efficiency of 70 %. After compression, the pulse energy measured 500  $\mu\text{J}$  (100 W average power). At 50 kHz and 70 mW seed power 180 W of pump power were needed for 71 W output

power, corresponding to a pulse energy of 1.45 mJ. After compression this meant pulse energy of 1 mJ at 50 W average power. The pulse duration was 800 fs, a slight deterioration in pulse quality with increasing energy is observed. The corresponding pulse peak power was 1 GW, a value not reached by any other fiber laser system.

References:

- /1/ Limpert, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.: High-power ultra-fast fiber laser systems, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 12, 233–244 (2006).
- /2/ Röser, F.; Schimpf, D.; Schmidt, O.; Ortaç, B.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: 90 W average power 100  $\mu\text{J}$  energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system, Opt. Lett. 32, 2230–2232 (2007).
- /3/ Röser, F.; Eidam, T.; Rothhardt, J.; Schmidt, O.; Schimpf, D. N.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: Millijoule Pulse Energy High Repetition Rate Femtosecond Fiber CPA System, Opt. Lett. 32, 3495–3497 (2007).
- /4/ Limpert, J.; Schmidt, O.; Rothhardt, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.; Ermeneux, S.; Yvernault, P.; Salin, F.: Extended single-mode photonic crystal fiber lasers, Optics Express 14, 2715–2720 (2006).

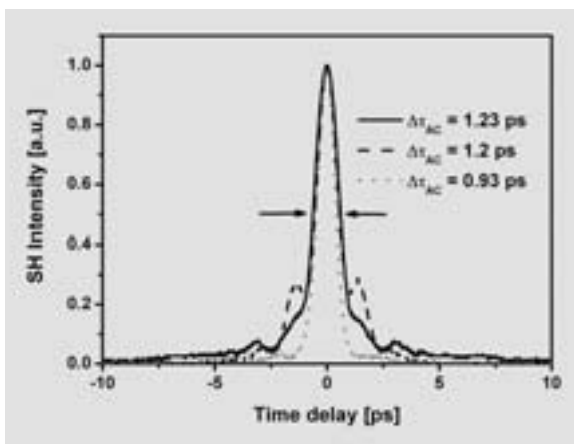


Abb.5: Autokorrelation der komprimierten Pulse bei verschiedenen Pulsenergien; gepunktet: bei kleinen Pulsenergien, gestrichelt: 200 kHz und 500  $\mu\text{J}$ , durchgezogen: 50 kHz und 1 mJ.

Fig. 5: Autocorrelation trace of the compressed pulses at different pulse energies; dotted: at small pulse energies, dashed: 200 kHz and 500  $\mu\text{J}$ , solid: 50 kHz and 1 mJ.

# Ein akkommodierendes opto-mechanisches Augenmodell zur Beschreibung von Laserimpulseinträgen in das Auge



Stefan Riehemann



Martin Palme



Thomas Peschel



Kathleen Kunert<sup>1</sup>



Marcus Blum<sup>1</sup>



Gunther Notni

Im Rahmen des Verbundprojektes SOMIT-CoHS (BMBF Förderprogramm »Sanftes operieren mit innovativen Techniken«, Projekt »Center of Head Surgery«) soll ein Prototyp zur Presbyopie-Therapie für den Einsatz im Operationssaal realisiert werden /1/. Presbyopie ist die meist altersbedingte Einschränkung der Akkommodationsfähigkeit des Auges. Das Auge ist nicht mehr in der Lage, sich auf unterschiedliche Sehentfernungen einzustellen (zu akkommodieren). Das Fraunhofer IOF hat im Rahmen dieses Projekts grundlegende optische und mathematische Simulationen durchzuführen. Hierzu war als erster Schritt die Erstellung eines opto-mechanischen Augenmodells notwendig, welches sowohl Alterseffekte als auch die Akkommodation vollständig parametrisch beschreibt. Dieses Modell dient dann der Simulation des Eintrags von fs-Laserimpulsen zur Presbyopie-Therapie.

Basierend auf klinischen Messdaten des Helios Klinikums Erfurt (Daten von 146 Augen) und Literaturangaben zu inneren Parametern der Augenlinse wurde mit dem Optikdesignprogramm ZEMAX ein entsprechendes optisches Augenmodell sowie mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS ein entsprechendes mechanisches Augenmodell erstellt. Optisches und mechanisches Modell wurden über die Geometrieparameter des Auges miteinander verbunden, so dass ein gemeinsames opto-mechanisches Augenmodell entstand /2/ (Abb. 1). Dieses Augenmodell kann sowohl die Funktion gesunder als auch presbyoper Augen vollständig simulieren.

Zur Behandlung der Presbyopie soll die verhärtete Augenlinse durch Bestrahlung mit fs-Laserimpulsen wieder beweglich gemacht werden. Die hierzu notwendigen Simulationen mit dem erstellten Augenmodell können Aussagen zur erreichbaren mechanischen Beweglichkeit, zur Lasersicherheit der Behandlung (Abb. 2) oder zur rekonstruierten Akkommodationsfähigkeit machen. Diese Simulationen sind die Grundlage für alle Voruntersuchungen sowie für die klinische Zulassung des Prototyps zur Presbyopie-Therapie im SOMIT-CoHS Projekt.

Gefördert durch das BMBF (Förderkennzeichen 13N8830).

#### Literatur:

- /1/ Blum, M.; Kunert, K.; Nolte, S.; Riehemann, S.; Palme, M.; Peschel, T.; Dick, M.; Dick, H. B.: Presbyopietherapie mit Femtosekundenlaser, Ophthalmologie 103,1014–1019 (2006).
- /2/ Riehemann, S.: The accommodating, aging eye – actual ideas on a joint opto-mechanical eye model, 105. Kongress der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft (DOG), Berlin (2007)

<sup>1</sup> Klinik für Augenheilkunde, Helios Klinikum Erfurt

# An accommodating opto-mechanical eye model to describe the propagation of fs-laser pulses inside the eye



Within the research network SOMIT-CoHS (Gentle surgery with innovative techniques – Center of Head Surgery) a prototype for clinical laser surgery of presbyopia will be realized /1/. Presbyopia is an age-related degradation of the eye's ability to accommodate. As a consequence, the eye is no longer able to adjust for different viewing distances (to accommodate). Within this project the IOF performed fundamental and applied optical and mechanical simulations of the human eye. For this purpose a joint opto-mechanical eye model was established, which parametrically describes accommodation and aging effects. This eye-model is used for the simulation of fs-laser treatment of presbyopia.

Based on clinical data from 73 patients (146 eyes), acquired by the Helios Clinical Center Erfurt, and on literature data on the inner parameters of the eye lens, an optical model of the eye was generated with the optical design software ZEMAX. The corresponding mechanical eye model was realized within the finite element software ANSYS. Optical and mechanical model were combined via the geometrical parameters of the eye /2/ (Fig. 1). This joint opto-mechanical eye model can simulate the complete function of healthy as well as presbyopic eyes.

For treatment of presbyopia the hardened eye lens will be made flexible again by treatment with fs-laser radiation. The simulations necessary for this purpose are performed with the created eye model, resulting in findings on laser safety (Fig. 2), mechanical flexibility, or reconstructed accommo-

dation amplitude. These results are necessary for all clinical preliminary examinations within the SOMIT-CoHS project and for the admission of the clinical prototype for presbyopia therapy.

Supported by the German federal ministry for education and research (BMBF, grant 13N8830).

#### References:

- /1/ Blum, M.; Kunert, K.; Nolte, S.; Riehemann, S.; Palme, M.; Peschel, T.; Dick, M.; Dick, H. B.: Presbyopietherapie mit Femtosekundenlaser, Ophthalmologie 103,1014–1019 (2006).
- /2/ Riehemann, S.: The accommodating, aging eye – actual ideas on a joint opto-mechanical eye model, 105. Kongress der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft (DOG), Berlin (2007)

Abb. 1:  
Opto-mechanisches Augenmodell:  
Optische (links) und mechanische (rechts)  
Simulation des Auges.

Fig. 1:  
Opto-mechanical eye-model:  
optical (left) and mechanical (right) simulation of  
the human eye.

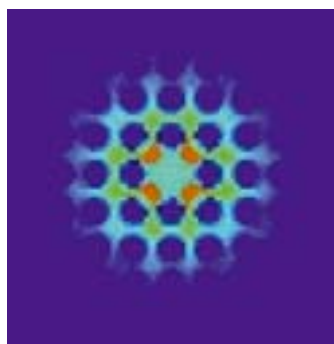
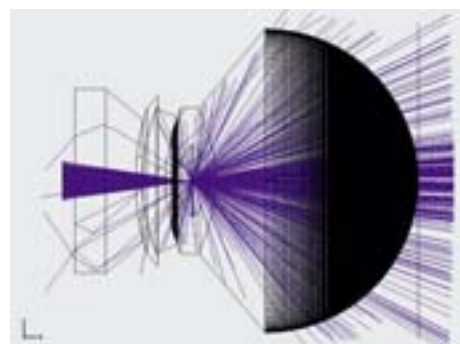
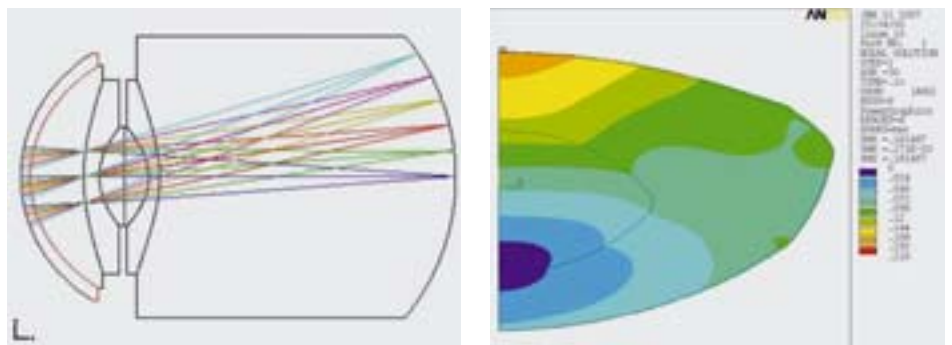


Abb. 2:  
Simulation der fs-Bestrahlung des Auges:  
Modell (links) und Bestrahlungsstärke-  
verteilung auf der Retina (rechts).

Fig. 2:  
Simulation of fs-laser treatment of the eye:  
optical model (left) and irradiance on  
the retina (right).

# Next-Generation Streulichtmesssysteme eröffnen neue Anwendungsfelder



Angela Duparré



Stefan Gliech



Sven Schröder

## Motivation

»Everyone engaged in the study of light or its industrial applications meets the problem of scattering« schrieb bereits vor 50 Jahren H. C. Van de Hulst in der Einleitung zu seinem grundlegenden Buch über Streulichtphänomene /1/.

Seither haben sich die optischen Technologien rasant entwickelt und neuartige Anforderungen an die Qualität von Materialien, Oberflächen, Komponenten und Systemen zur Folge. Dies erstreckt sich über ganz unterschiedliche Problem- und Applikationsfelder, wie beispielsweise die sich ständig verkleinernden Strukturgrößen in der Halbleitertechnologie, hochpräzise komplexe Oberflächen in der Astronomie oder nanostrukturierte Funktionsflächen für Consumer-Optiken. Allen Gebieten gemeinsam aber ist das Problem der Lichtstreuung an rauen Strukturen, Defekten und anderen Irregularitäten – aus sehr vielfältigen Gründen: Während z. B. bei optischen Hochleistungs-Bauelementen Streulicht als Ursache von Verlusten und reduzierter Abbildungsqualität /2/ unterdrückt werden muss, stört bei Consumer-Optiken meist die Beeinträchtigung des ästhetischen Eindrucks. Als besondere Herausforderungen für moderne Streulichtmesssysteme ergeben sich daraus unter anderem ein extrem ausgedehnter Wellenlängenbereich (EUV bis IR), höchste Sensitivitäten sowie die Eignung für komplex geformte Bauteile. Darüber hinaus etablieren sich Streulichtmessverfahren zunehmend auch generell als effiziente Methoden zur berührungslosen und schnellen Bestimmung von Rauheiten und Defekten /3/.

## Messsysteme

Am Fraunhofer IOF wurde in jüngster Zeit eine neue Generation von Streulichtmesssystemen entwickelt (Abb. 1), in denen exklusive Funktionen wie

- Überdeckung des gesamten 3D-Raums,
- höchste Sensitivität (Dynamikbereich bis 15 Größenordnungen, Untergrund < 0,05 ppm),
- Rauheitsbestimmung bis 0,1 nm (rms),
- Verknüpfung verschiedener Messmodi (Streulicht, Reflexion, Transmission, Gittereffizienz,  $2\theta$  etc.),
- Wellenlängenbereich 13,5 nm bis 10,6  $\mu\text{m}$ ,
- Messung von Oberflächen-, Grenzflächen- und Volumenstreuung realisiert sind. Die Messsysteme bestimmen in Leistungsumfang und Leistungsparametern den internationalen Stand.

Das System ALBATROSS arbeitet bei verschiedenen Laserwellenlängen vom ultravioletten bis infraroten Bereich, in allen drei Raumrichtungen, winkelaufgelöst (ARS-Angle Resolved Scatter), polarisationsabhängig und ist auch für komplex geformte sowie sehr große Bauteile mit Kantenlängen bis zu 500 mm geeignet. Raue technische bis superpolierte optische Oberflächen können untersucht werden. Im gleichen Wellenlängenbereich wird das System TScatt eingesetzt, das die totale Streuung (TS) sowohl in Rückwärts- als auch in Vorwärtsstreuung nach ISO 13696 misst.

# Next generation light scattering techniques enter new application areas



## Motivation

“Everyone engaged in the study of light or its industrial applications meets the problem of scattering” was written by H. C. Van de Hulst 50 years ago in the introduction to his fundamental monograph on light scattering phenomena /1/.

Since then, there has been a tremendous development in optical technologies, generating novel challenges for the quality of materials, surfaces, components, and systems. This holds for very different problems and fields of applications extending from e.g. the ever decreasing structure sizes in semiconductor lithography to high-precision and complex surfaces for astronomy or to nanostructured functional surfaces for consumer optics. All these areas, however, face the common problem of light scattering from rough structures, defects, and other irregularities. The reasons are manifold: Whereas e.g. in high performance optical components light scattering is a critical source of losses and reduced imaging quality /2/, in

consumer optics the impairment of visual appearance must be avoided. As a consequence, particular challenges for modern light scattering techniques arise such as an extremely wide wavelength range (from EUV to IR), very high sensitivity, and the applicability to components with complex geometries. In addition, light scattering techniques become more and more established as an efficient and rapid method for roughness and defect detection altogether /3/.

## Measurement techniques

Next generation light scattering measurement techniques have recently been developed at the Fraunhofer IOF (Fig. 1).

Exclusive functionalities were accomplished such as

- measurement in full 3D space,
- high sensitivity (dynamic range up to 15 orders of magnitude, background scatter < 0.05 ppm),
- roughness determination down to 0.1 nm (rms),

- combination of different operation modi (scattering, reflectance, transmittance, grating efficiency,  $2\theta$  etc.),
  - wavelength range from 13.5 nm to 10.6  $\mu\text{m}$ ,
  - measurement of surface, interface and volume scattering.
- These measurement systems head the international state-of-the-art concerning both scope and parameters of performance.

The instrument ALBATROSS can be operated at various laser wavelengths from the ultraviolet to infrared spectral regions, in 3 spatial directions, angle resolved (ARS-Angle Resolved Scattering), and polarization dependent. The arrangement is suitable even for components with complex geometries and large dimensions up to 500 mm. Rough engineering to supersmooth optical surfaces can be investigated. In the same wavelength regions, the system TScatt is employed for total scatter (TS) measurement in the backscatter and forward scatter directions according to ISO 13696.

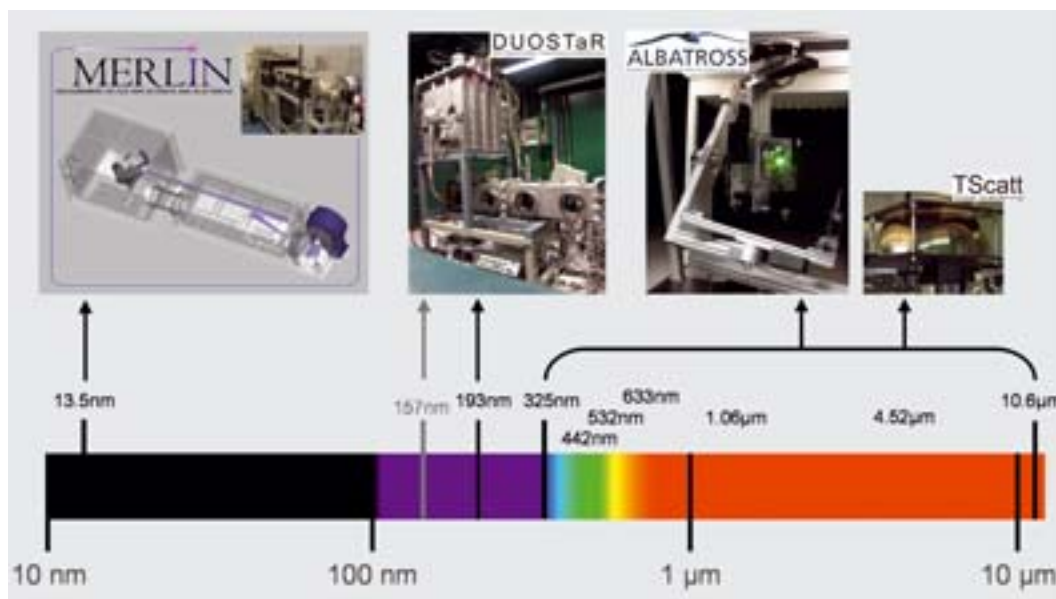


Abb. 1:  
Am Fraunhofer IOF entwickelte Streulichtmesssysteme im Überblick.  
© Albatros-Bild im Logo  
ALBATROSS: Brian Lockett,  
[www.air-and-space.com](http://www.air-and-space.com).

Fig. 1:  
Overview on the scattering measurement techniques developed at Fraunhofer IOF.

In der Halbleiterlithographie wird gegenwärtig massiv die Optimierung im tiefen UV-Bereich (DUV) bei 193 nm bis an ihre Grenzen vorangetrieben. Für die Streulichtanalyse bedeutet dies, dass optische Komponenten von superglaten Substraten bis zu nanostrukturierten Schichtsystemen sowie hochreine Materialien bei dieser Einsatzwellenlänge sensitiv und effizient charakterisiert werden müssen. Das System DUOSTaR mit seinen verschiedenen Messmodi ist weltweit das Einzige, das diese Anforderungen erfüllt.

Um EUV-Optiken anwendungsnah hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zu charakterisieren, wurde das Messsystem MERLIN entwickelt. Es basiert auf einer Labor-Strahlungsquelle (Xe Gasentladungsplasma) und ist weltweit das erste Laborsystem zur Messung von Reflexion und Streulicht bei der Einsatzwellenlänge 13,5 nm. Der gegenwärtige Dynamikbereich von fünf Größenordnungen ermöglicht winkelaufgelöste Streulichtmessungen sowie Reflexionsmessungen bei belie-

bigen Einfallswinkeln. Mit dem Messsystem können EUV-Komponenten schnell und umfassend direkt vor Ort charakterisiert werden. Dies war bisher nur an Synchrotron-Zentren möglich. Die vor Ort durchführbare Qualitätskontrolle bietet so eine wichtige Grundlage für die EUV-Komponenten- und Systementwicklung.

Die Laborsysteme werden direkt in verschiedenen Anwendungsgebieten eingesetzt und bilden gleichzeitig die Grundlage zur Entwicklung kundenspezifischer Table-Top-Geräte für den industriellen Einsatz.

### Anwendungsbeispiele

Im visuellen Bereich haben unter anderem die Möglichkeiten zur Messung im 3D-Raum ein neues Anwendungsspektrum eröffnet. Abbildung 2 zeigt die bei 633 nm gemessene winkelabhängige Streulichtverteilung einer diamantgedrehten Aluminiumober-

fläche mit Beugungseffekten an den Drehrillen. Solche Messungen gestatten es, die in UP-Bearbeitungsprozessen entstehenden Rauheiten direkt entsprechend ihrer optischen Wirkung zu charakterisieren und den Prozess gezielt zu optimieren. Das ist beispielsweise für die Abbildungsqualität von Astronomie-Spiegeln wesentlich. Das 2D-Diagramm des totalen Streulichts einer UP-Oberfläche, die mittels Slow-Tool-Servo-Drehen (Anpassung der Z-Achsenposition des Drehmeißels bei Probenumdrehung) hergestellt wurde, ist in Abb. 3 dargestellt. In Abhängigkeit von der Probenposition ergibt sich eine unterschiedlich schnelle Z-Bewegung des Drehmeißels, deren Auswirkung auf die lokale Rauheit und optische Abbildungsqualität die TS-Messung aufzeigt.

Ein in letzter Zeit auffallend wachsendes Anwendungsfeld im Consumer-Bereich stellt die Quantifizierung des visuellen Eindrucks von Oberflächen dar. So können bei Schmucksteinen aus der Reflexions- und Streulichtverteilung (Abb. 4) mit hoher Genauigkeit sowohl Rückschlüsse auf die Winkelgenauigkeit zwischen den Facetten getroffen als auch Defekte detektiert werden. Im Brillenglasbereich, wo z. B. nanostrukturierte Oberflächen für Anti-Reflexeigenschaften interessant sind /4/, wird die Kontrolle des strukturbedingten Streulichts notwendig.

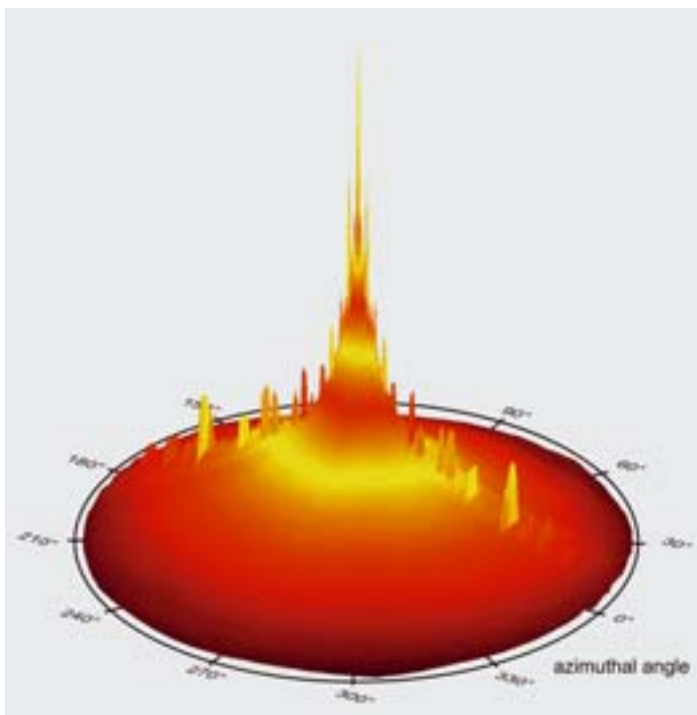


Abb. 2:  
ARS-Messung (ALBATROSS, 633 nm) im gesamten rückwärtigen Halbraum an einer diamantgedrehten Aluminiumoberfläche  
(Herstellung: Fraunhofer IOF, A. Gebhardt).

Fig. 2:  
ARS measurement (ALBATROSS, 633 nm) in the entire backward hemisphere on a diamond turned aluminum surface  
(sample fabrication: IOF, A. Gebhardt).





Semiconductor lithography is currently boosting the optimization in the deep UV region (DUV) to its very limits. In terms of scattering analysis, this implies the sensitive and efficient characterization of optical components extending from supersmooth substrates to nanostructured thin films. The DUOSTaR technique with its various operation modi is the only system worldwide to comply with these requirements.

The measurement system MERLIN was developed to characterize the capability of EUV optical components close to their application. The instrument is based on a Xe discharge plasma source. It is the first laboratory-size equipment to measure reflectance and light scattering at the wavelength of application 13.5 nm. A current dynamic range of 5 orders of magnitude enables both angle resolved scattering and reflectance measurements at arbitrary angles of incidence.

In this way, on-site, fast, and comprehensive characterization of EUV components becomes possible, which so far had been restricted to synchrotron centres. This on-site quality control provides a significant basis for the development of EUV components and systems.

The laboratory systems described are employed directly for various applications while at the same time they serve as a basis for the development of custom designed table top instruments for industry and research.

## Examples of applications

In the visible spectral range, it was in particular the capability of measurements in full 3D space that opened new application areas. The angle resolved light scattering distribution at 633 nm of a diamond turned aluminum surface (Fig. 2) displays diffraction effects from the turning grooves. Such measurements allow the characterization of UP process-related roughness directly according to its optical impact and, hence, a targeted process optimization. This is essential e.g. regarding the imaging quality of mirrors for astronomy. Figure 3 shows the 2D total scattering diagram of a UP surface fabricated by Slow Tool Servo Turning. The velocity of the Z-movement of the turning chisel varies as a function of sample position. The resulting local roughness variation and its impact on the optical imaging quality are disclosed by the TS measurement.

For consumer optics, quantification of the visual appearance of surfaces becomes an increasingly critical issue. As an example, reflectance and light scatter characteristics can be utilized to sensitively assess the quality of gemstones with respect to their facet angle accuracy and the occurrence of defects (Fig. 4). Another field concerns eye glasses, where e.g. nanostructured surfaces are interesting for anti reflection properties /4/. Here, control of structure related light scattering effects is necessary.

Abb. 3: TS-Messung (TScatt, 532 nm) an einer Slow-Tool-Servo-gedrehten Oberfläche, Pos. A / B: langsame/schnelle Z-Bewegung; aus TS berechnete RMS-Rauheiten: 8 nm (Pos. A), 23 nm (Pos. B).

Fig. 3: TS measurement (TScatt, 532 nm) on a Slow Tool Servo turned surface, Positions A/B: slow/ fast Z-movement; RMS roughness calculated from TS: 8 nm (Pos. A), 23 nm (Pos. B).

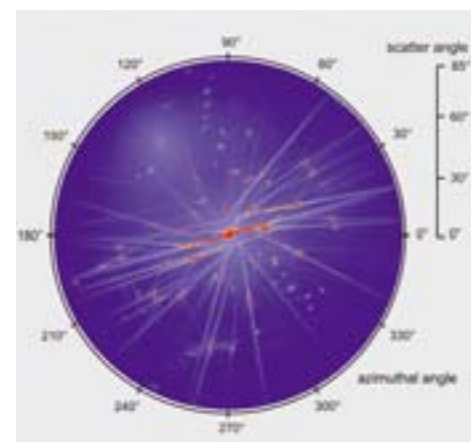
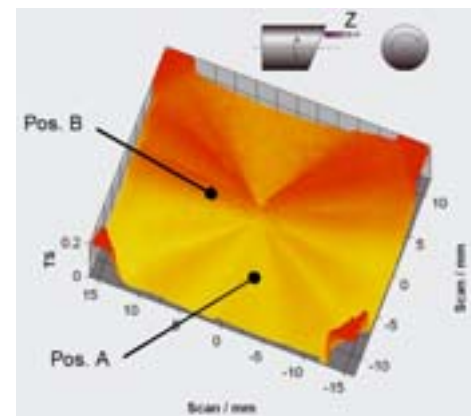


Abb. 4: ARS-Messung (ALBATROSS, 532 nm) an einem geschliffenen Edelstein (Saphir).

Fig. 4: ARS measurement (ALBATROSS, 532 nm) on a ground gemstone (sapphire).

Abbildung 5 zeigt die bei 532 nm an einer Kunststoffoberfläche mit Mottenaugenstrukturen gemessene totale Vorwärtsstreuung.

Mit dem System DUOSTaR wurden die Streulichteigenschaften verschiedener Schichtsysteme bei der Einsatzwellenlänge 193 nm bestimmt /5/. Durch Kombination von Messung und Modellierung konnten erstmals auch die Streulichteigenschaften von AR-Schichten für die 193 nm-Immersionolithographie unter Anwendungsbedingungen charakterisiert werden.

Der Einfluss der Substratpolitur auf die Eigenschaften von EUV-Spiegeln wurde durch Reflexions- und Streulichtmessungen mit dem System MERLIN untersucht. Die Ergebnisse der ARS-Messungen sind in Abb. 6 dargestellt. Die unterschiedlichen Substratrauheiten setzen sich in den EUV-Schichten fort und führen zu Streuverlusten zwischen 1 % und 4 %. Durch die quantitative Verknüpfung von Streulicht und Rauheit können Spezifikationen für die Substratherstellung gegeben werden, die nach der Beschichtung zu reduzierten Streuverlusten und optimierten Reflexionseigenschaften führen /6/. An EUV-Schichtsystemen, die Bestrahlungstests unterzogen worden waren /7/, erfolgte eine umfangreiche Charakterisierung der Degradationseffekte durch winkelabhängige Reflexionsmessungen (Abb. 7). Dabei konnte sowohl die Reflexionsänderung als auch deren Ursache – zunehmende Oxidation der oberen Schichten – quantitativ bei der Einsatzwellenlänge nachgewiesen werden /8/.

#### Literatur:

- /1/ Van de Hulst, H.C.: Light Scattering by Small Particles, Chapman & Hall, London, 1957.
- /2/ Duparré, A.: Light Scattering techniques for the inspection of microcomponents and microstructures, in: Optical Methods for the Inspection of Microsystems, Editor: Osten W., Taylor & Francis, Boca Raton (2006) S. 103–119.
- /3/ Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: Bewertung von Nanorauheiten durch Streulichtmessung, Technisches Messen 73 (2006) 35–42.
- /4/ Schulz, U.; Munzert, P.; Leitel, R.; Wendling, I.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.: Antireflection of transparent polymers by advanced plasma etching procedures, Opt. Express 15, 13108–13113 (2007).
- /5/ Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: Roughness Evolution and Scatter Losses of Multilayers for 193 nm Optics, Appl. Opt. 47 (2007) in print.
- /6/ Schröder, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: EUV reflectance and scattering of Mo/Si multilayers on differently polished substrates, Opt. Express 15, 13997–14012 (2007).
- /7/ Benoit, N.: Radiation stability of EUV multilayer mirrors, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena (2007).
- /8/ Benoit, N.; Schröder, S.; Yulin, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.: EUV-induced oxidation of Mo/Si multilayers, Appl. Opt. (2007) submitted for publication.

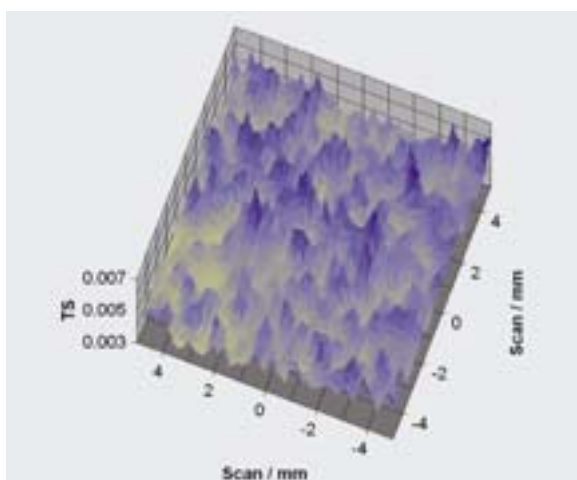


Abb. 5:  
Mapping der totalen Vorwärtsstreuung (TScatt, 532 nm) an einer Kunststoffoberfläche mit Nano-Mottenaugenstruktur (Herstellung: Fraunhofer IOF, U. Schulz).

Fig. 5:  
Mapping of total forward scattering (TScatt, 532 nm) on a polymer surface with nano-moth-eye structures (sample fabrication: IOF, U. Schulz).



Figure 5 shows the result of total forward scattering measurements at 532 nm of a polymer surface with moth-eye structures.

The DUOSTaR technique was used to determine the scattering properties of thin film multilayers at their design wavelength 193 nm /5/. Combining measurement and modeling for the first time enabled the scattering properties of AR coatings for 193 nm-immersion lithography to be characterized at their application conditions.

Reflection and scattering measurements using the system MERLIN demonstrate the impact of substrate roughness onto the performance of EUV mirrors. Results of ARS measurements are shown in Fig. 6. The different substrate qualities are replicated throughout the EUV multilayers, leading to scatter losses between 1 % and 4 %. Linking roughness and scattering enables to define substrate specifications. This results in reduced scatter losses and optimized reflectance of the coated component /6/.

The degradation effects of EUV coatings after irradiation tests /7/ were characterized by angle resolved reflectance measurements (Fig. 7). In this way, decrease of normal incidence reflectance as well as its origin – increased oxidation of the upper layers – was quantified at the wavelength of application.

References:

- /1/ Van de Hulst, H.C.: Light Scattering by Small Particles, Chapman & Hall, London, 1957.
- /2/ Duparré, A.: Light Scattering techniques for the inspection of microcomponents and microstructures, in: Optical Methods for the Inspection of Microsystems, Editor: Osten W., Taylor & Francis, Boca Raton (2006) S. 103–119.
- /3/ Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: Bewertung von Nanorauheiten durch Streulichtmessung, Technisches Messen 73 (2006) 35–42.
- /4/ Schulz, U.; Munzert, P.; Leitel, R.; Wendling, I.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.: Antireflection of transparent polymers by advanced plasma etching procedures, Opt. Express 15, 13108-13113 (2007).
- /5/ Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: Roughness Evolution and Scatter Losses of Multilayers for 193 nm Optics, Appl. Opt. 47 (2007) in print.
- /6/ Schröder, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: EUV reflectance and scattering of Mo/Si multilayers on differently polished substrates, Opt. Express 15, 13997–14012 (2007).
- /7/ Benoit, N.: Radiation stability of EUV multilayer mirrors, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena (2007).
- /8/ Benoit, N.; Schröder, S.; Yulin, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.: EUV-induced oxidation of Mo/Si multilayers, Appl. Opt. (2007) submitted for publication.

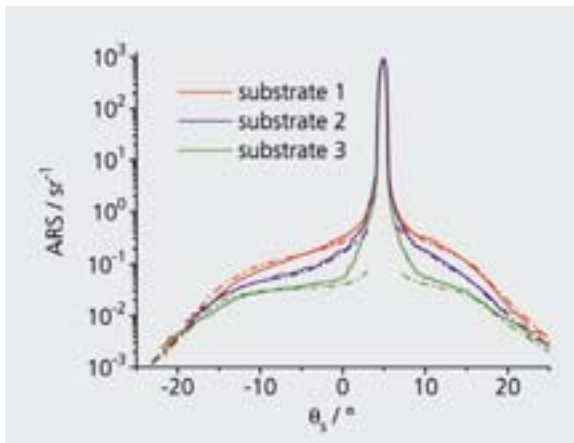


Abb. 6: ARS-Messung (MERLIN, 13.5 nm) an EUV-Spiegeln (Herstellung: Fraunhofer IOF, T. Feigl) auf Substraten mit unterschiedlicher Politur.

Fig. 6: ARS measurement (MERLIN, 13.5 nm) of EUV mirrors (sample fabrication: IOF, T. Feigl) on substrates with different surface polish.

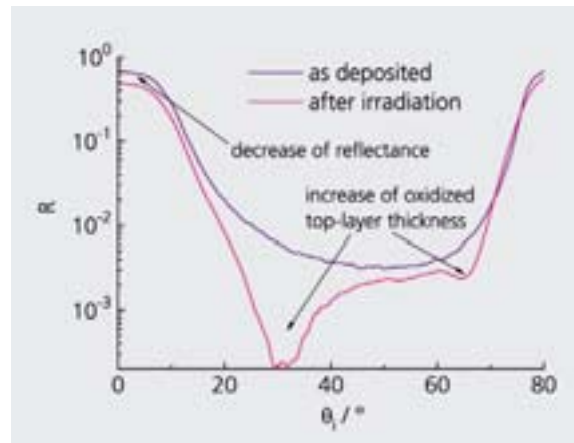


Abb. 7: EUV-Reflexion (MERLIN, 13,5 nm) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, gemessen an EUV-Schichtsystemen vor und nach Bestrahlung.

Fig. 7: EUV reflectance (MERLIN, 13.5 nm) as a function of the angle of incidence, measured on EUV multilayer thin film systems prior to and after irradiation .

# Intraoraler 3D-Digitalisierer für CAD/CAM in der Zahnmedizin



Peter Kühmstedt



Matthias Heinze



Ingo Schmidt



Christian  
Bräuer-Burchardt



Gunther Notni



Martin Palme



Christoph Munkelt



Josef Hintersehr<sup>1</sup>

<sup>1</sup> HintELs GmbH  
Griesheim

In der Dentalindustrie gewinnt die Erstellung von 3D-Modellen der Zähne für die computerunterstützte Fertigung von Zahnersatz (Kronen, Brücken) eine immer größere Bedeutung. Die bisherige Vorgehensweise beim Erstellen eines 3D-Modells umfasst die Erzeugung eines Gebissabdrucks durch eine Abformung, welcher durch ein extraorales System digitalisiert wird. Dafür gibt es zzt. einige streifenprojektionsbasierte Messsysteme auf dem Markt.

Das Ziel unserer Entwicklung, die von der Firma Hint-ELs GmbH Griesheim in Auftrag gegeben wurde, war ein Scanner zur Erfassung der Zahnoberfläche direkt im Mund des Patienten. Vorteile dabei sind die reduzierte Belastung des Patienten (keine Abdrucknahme) und das Entfallen aufwändiger Zwischenschritte (Abdruck und Gipsmodell). Die Zahnersatzherstellung kann so direkt im Anschluss an die Vermessung beginnen. Damit ist eine erhöhte Qualität bei gleichzeitiger Verringerung des zeitlichen und finanziellen Aufwands realisierbar.

Für die Berechnung der 3D-Koordinaten der Zahnoberfläche wurde das Prinzip der phasenkorrelierten Streifenprojektion gewählt. Dies erfolgt mit einer Anordnung von zwei fest verbundenen Kameras (Stereoanordnung) und einem Projektor. Die durch den Projektor erzeugten Streifenmuster werden mit einer Kamera registriert und die entsprechende Position im zweiten Kamerabild mit Subpixelgenauigkeit gefunden. Durch das Prinzip der

Phasenkorrelation werden mögliche Artefakte der Beleuchtung bei der 3D-Datenberechnung unterdrückt, wenn sie in beiden Kamerabildern gleichartig auftreten. Um die Datenkonsistenz zu erhöhen, werden zusätzlich die Eigenschaften der Epipolargeometrie von Stereosystemen genutzt.

Beim Design des Scanners wurde großer Wert auf eine kleine Baugröße gelegt. Der in den Mund einzuführende Teil des Scanners hat einen Querschnitt von ca. (22 x 22) mm<sup>2</sup>. Als Beleuchtungseinheit wird ein LCoS-Display mit einer LED-Quelle eingesetzt. Durch das Objektivdesign wird eine Verzeichnung < 0,1 % realisiert. Damit ist keine Verzeichnungskorrektur erforderlich. Um Platz und Hardwarekosten zu sparen, werden beide Bilder auf einem Kamerachip erzeugt. Die Aufnahme einer Bildsequenz erfolgt in ca. 200 ms. Das observierte Messfeld hat eine Größe von (20 x 15) mm<sup>2</sup>.

Die Datenaufnahme erfolgt sequenziell für alle interessierenden Abschnitte des Gebisses (Abb. 2a, b). Die 3D-Daten werden dann mittels einer Softwarelösung (Matchingprozedur, Abb. 2c) zu einem Gesamtdatensatz vereint. Erste Prototypen des intraoralen Scanners wurden gefertigt und befinden sich in der Testphase. Es konnte gezeigt werden, dass eine vollständige Gebisserfassung (Abb. 2) in hoher Qualität möglich ist. Es besteht das Ziel, ohne eine zusätzliche Behandlung der Zahnoberfläche auszukommen.



The building up of 3D models of teeth for the computer aided production of dental prostheses (crowns, bridges) is gaining ever more importance in the dental industry. Recently, such models have been obtained by making a plastic impression of the denture which can be digitized by an extraoral scanning system. Currently, some measuring systems based on fringe projection techniques are available.

The goal of our development was a scanner for the registration of the dental surface directly in the patient's mouth. The order was given by HintELs GmbH Griesheim. The advantages of such an intraoral scanning are the reduced pain to the patient (no impression) and the absence of extensive intermediate steps (impression and cast model). The production of the prosthesis can be performed directly after measurement. Thus an improvement of the quality can be obtained as well as a reduction of the effort in time and costs.

The calculation of the 3D data of the teeth surface is performed by using the principle of phase correlated fringe projection. This is realized by an arrangement of two fix connected cameras (stereo arrangement) and a projector. The fringes projected by the projector are registered by the first camera, and the corresponding position in the second camera is found with sub-pixel accuracy. Possible illumination artefacts can be suppressed in the 3D data calculation by the principle of phase correlation, when they appear similarly. In order to increase the consistency of the data features of epipolar geometry of stereo systems are used additionally.

A small building size of the device was one of the main aspects in the design of the scanner. The part of the scanner to be introduced in the mouth has a size of 22 mm x 22 mm. An LCos-Display with a LED source is used as illumination unit. A lens distortion of less than 0.1 % is realized by the design. Thus no distortion correction is necessary.

In order to save space and costs both camera images are stored on one chip. The recording of an image sequence is performed in about 200 ms. The observed measuring field has a size of 20 mm x 15 mm.

The recording of the data is performed sequentially for all sections of interest of the denture (Fig. 2a). The 3D data are merged by a software solution (matching procedure, Fig. 2c) to a common data set.

First prototypes of the intraoral scanner were produced and are currently being tested. It could be shown that a registration of a whole denture is possible in high quality (Fig. 2). Furthermore, it is planned to achieve a complete measurement without additional treading (e.g. using of occlusion spray) of the patient.

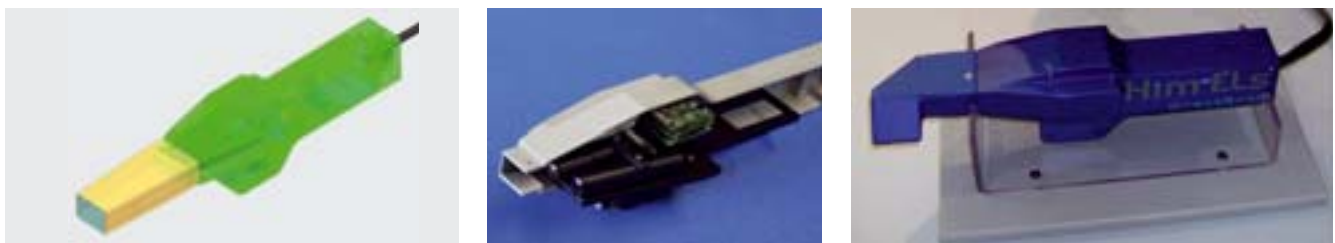


Abb. 1: Intraoraler 3D-Digitalisierer: a) Design, b) System mit offenem Gehäuse, c) komplettes System.

Fig. 1: Intraoral 3D Digitizer: a) Design, b) System with open housing, c) complete system.

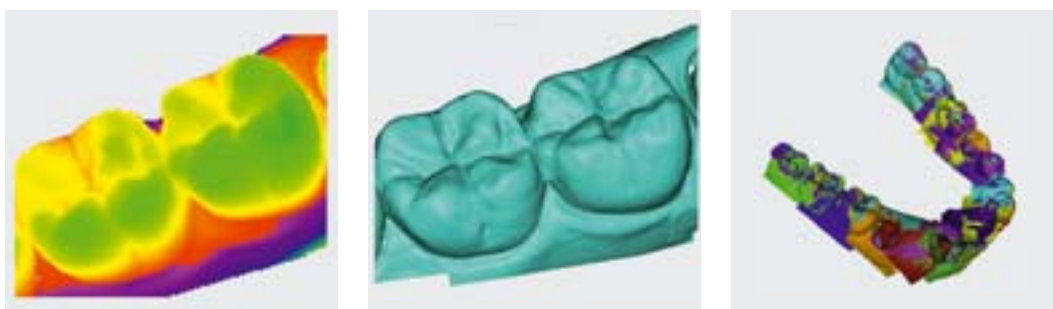


Abb. 2: Messdaten: a) Punktwolke, b) STL-Datensatz, c) Gesamter Gebissbogen mit farblich codierten Einzeldatensätzen.

Fig. 2: Measurement data: a) Point cloud, b) STL-record, c) Complete tooth arch with colour-coded individual records.



Boris Pradarutti



Ralf Müller



Claudia Brückner



Stefan Riehemann



Gunther Notni



Gabor Matthaeus<sup>1</sup>



Stefan Nolte<sup>1</sup>

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

THz-Strahlung (0,1 THz–10 THz) wird von Kunststoffen, Papier, Keramik und Polystyrol nur schwach absorbiert und liefert in der Bildgebung dieser Stoffe gute Kontraste. Auch können viele für Anwendungen interessante Moleküle, so z. B. Sprengstoffe, Medikamente und illegale Drogen, mit Spektroskopie im THz-Bereich eindeutig identifiziert werden.

Zur Bildgebung wird bisher der THz-Strahl fokussiert und die Probe durch den Fokus abgerastert. Die THz-Strahlung wird mit elektrooptischer Detektion und einem balancierten Detektor Pixel für Pixel aufgenommen /1/. Eine solche Messung dauert mehrere Stunden und liefert ein sehr hohes Signal/Rauschverhältnis (SNR). Eine weitere Möglichkeit zur flächigen Aufnahme eines THz-Bildes mit elektrooptischer Detektion und einer CCD-Kamera bringt zwar schnellere Ergebnisse, leidet aber unter einem wesentlich schlechteren SNR.

Erstmals konnten nun die Vorteile beider Methoden vereint werden. Es wurde ein THz-Zeilendetektionssystem mit elektrooptischer Detektion und einem 8-Pixel-balancierten Detektor aufgebaut (Abb. 1). Es hat ein mit der Einzelpixeldetektion vergleichbares SNR, aber eine um eine Größenordnung schnellere Messgeschwindigkeit.

Dieses Detektorsystem wurde in ein portables Bildgebungssystem mit einer Grundfläche von (60 x 90) cm<sup>2</sup> integriert (Abb. 2). Basis des Systems ist ein in Zusammenarbeit mit dem Institut für

Angewandte Physik (IAP) entwickelter Femtosekunden-Faserlaser. Dieser Laser setzt sowohl in Robustheit, Ausgangsleistung und Kompaktheit neue Maßstäbe /2/. Um mit dem System nicht nur einen Punkt, sondern eine Linie zu detektieren, wurde die THz-Optik durch klassisches Ray-Tracing in Kombination mit wellenoptischen Propagationmethoden optimiert. Dabei wurde die THz-Optik nicht nur paraxial sondern auch außerhalb der Achse beugungsbegrenzt entworfen. Das System kann Proben bis zu 200 mm x 200 mm mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1 000 Bildpunkten pro Minute vermessen (Abb. 3).

Gefördert im Rahmen der internen Programme der FhG (MAVO 813907).

#### Literatur:

- /1/ Pradarutti, B.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Matthaeus, G.; Nolte, S.: Anwendungen optimierter THz-Imaging-Systeme, Jahresbericht Fraunhofer IOF (2006).
- /2/ Tünnermann, A.; Schreiber, T.; Röser, F.; Liem, A.; Höfer, S.; Zellmer, H.; Nolte, S.; Limpert, J.: The renaissance and bright future of fibre lasers, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38, 681 (2005).



THz radiation (0.1–10 THz) is weakly absorbed by plastics, paper, ceramic, and polystyrol and shows good contrasts for imaging with these materials. Also, many molecules significant for applications like explosives, medicals and illegal drugs can be identified in the THz frequency range.

For imaging the THz beam is focussed and the sample is moved through this focus. The THz radiation is detected by electro-optical detection with a balanced detector pixel by pixel. Such a measurement typically takes several hours and features an extraordinary high signal to noise ratio (SNR) /1/. Another possibility is offered by two-dimensional electro optical detection with a CCD camera. Despite increasing the measurement speed, this method suffers from a low SNR.

For the first time the advantages of both methods have been combined. A THz line detection system with electro-optical detection and an 8 pixel balanced detector has been built (Fig. 1). It gives the same high SNR like the single pixel detection, but the scan time is reduced by an order of magnitude.

This detection system has been integrated in a portable THz imaging system with a footprint of 60 x 90 cm<sup>2</sup> (Fig. 2). The basis of the system is a fiber laser developed in cooperation with the Institute of Applied Physics. This laser sets standards in robustness, output power and compactness /2/. To detect not only a spot but a line, the THz optics has been optimized by classical raytracing in combination with waveoptical propagation methods. The optics is designed not only paraxial

but also off-axis diffraction limited. The system can measure samples up to 200 x 200 mm<sup>2</sup> with a velocity up to 1,000 points per second (Fig. 3).

This work is supported by the FhG internal program (MAVO 813907).

#### References:

- /1/ Pradarutti, B.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Matthaeus, G.; Nolte, S.: Anwendungen optimierter THz-Imaging-Systeme, Jahresbericht Fraunhofer IOF (2006).
- /2/ Tünnermann, A.; Schreiber, T.; Röser, F.; Liem, A.; Höfer, S.; Zellmer, H.; Nolte, S.; Limpert, J.: The renaissance and bright future of fibre lasers, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38, 681 (2005).



Abb. 1:  
Balanciertes 8-Kanal-THz-Detektionssystem.



Abb. 2:  
Portables THz-Bildgebungssystem mit Mehrkanaldetektion.

Fig. 2:  
Portable THz imaging system with multichannel detection.

Fig. 1:  
Balanced 8 channel THz detection system.

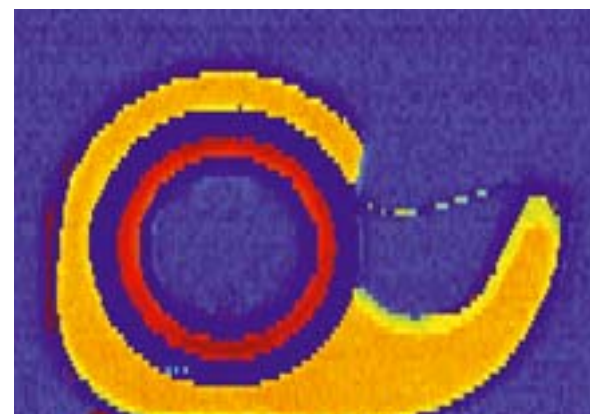


Abb. 3:  
THz-Bildgebung eines Klebebandabrollers  
(Auswertung der THz-Pulsverzögerung).

Fig. 3:  
THz imaging of an adhesive tape unroller  
(analysis of the pulse delay).



Stefan Riehemann



Uwe Lippmann



Andy Tänzer



Ingo Schmidt



Gunther Notni

Neben Fotos und persönlichen Daten werden auf Reisepässen ab November 2007 auch Fingerabdrücke gespeichert. Hierfür ist es notwendig, die für die Erfassung dieser Daten zu verwendenden Geräte hinsichtlich ihrer Bildqualität zu prüfen. Dazu wurden vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) /1/ verbindliche Kriterien für die Leistungsfähigkeit von Fingerabdruck-Scannern festgelegt. Jedes Gerät, das von staatlichen Stellen für die Erfassung von Fingerabdrücken für den elektronischen Reisepass oder für die Vergabe von Visa genutzt wird, muss diese Qualitätsstandards erfüllen und vom BSI zertifiziert werden.

Das Fraunhofer IOF ist vom BSI als Prüfstelle akkreditiert worden, um die für die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Fingerabdruck-Scanner erforderlichen Messungen durchzuführen und zu dokumentieren. Für diese Akkreditierung wurde am Fraunhofer IOF zudem ein Qualitätsmanagement nach DIN EN ISO/IEC 17025 aufgebaut. Die Zertifizierung eines Fingerabdruck-Scanners durch das BSI erfolgt auf der Basis der Prüfergebnisse des IOF.

Um ein Zertifikat zu erhalten, muss der Scanner sieben verschiedene Prüfungen bestehen. Er muss

1. Grauwerte linear abbilden,
2. eine genau bestimmte Auflösung in Pixel pro Zoll liefern,
3. eine hinreichend kleine Bildverzerrung haben,
4. kleine Details hinreichend gut auflösen können,
5. gleichmäßig helle Bilder liefern,
6. rauscharme Bilder liefern,
7. reale Fingerabdrücke mit ausreichendem Grauwertumfang abbilden.

Optische Fingerabdruck-Scanner arbeiten in der überwiegenden Mehrzahl nach dem Prinzip der gestörten Totalreflexion. Das Licht einer Lichtquelle trifft unter einem Einfallswinkel auf die Glas-Luft-Fläche eines Prismas, der größer ist als der Grenzwinkel der Totalreflexion. Das Licht wird dadurch in Richtung der aufnehmenden Kamera reflektiert. Wird nun ein Finger auf die Prismenfläche gelegt, wird an den Kontaktstellen Licht ausgekoppelt bzw. gestreut. An diesen Stellen nimmt die Intensität im Kamerabild stark ab. Das Ergebnis sind dunkle Fingerabdrücke vor einem hellen Hintergrund.

Für die Prüfung der Scanner werden verschiedene Testmuster optisch mit Wasser oder Immersionsöl an das Prisma angekoppelt und anschließend mit dem Scanner abgebildet. Hierfür wurden speziell an die Scannerprüfung angepasste Testmuster entworfen und zum Beispiel als Chromstrukturen auf Glassubstraten realisiert.

Seit Beginn der Prüfungen am Fraunhofer IOF Ende 2006 sind bereits sieben verschiedene Scannermodelle geprüft worden.

#### Literatur:

- /1/ Technische Richtlinie zur Produktionsdatenerfassung, -qualitätsprüfung und Übermittlung für Pässe (BSI TR-03104), <http://www.bsi.bund.de/literat/tr/tr03104/>.





Since November 2007, passports in Germany contain not only electronically stored personal data and a digital photo, but also electronically stored fingerprints. The optical scanners used for the digitization of fingerprints have to be tested with respect to a sufficient image quality. The technical criteria to be fulfilled by fingerprint scanners have been released by the German Federal Office for Information Security (BSI) /1/. All scanners used by German Federal Offices for fingerprint digitization – either for passports or for visas – have to fulfill these quality standards and have to be certified by the BSI.

The Fraunhofer IOF has been accredited by the BSI as third party test laboratory for the test of optical fingerprint-scanner. This test laboratory works within a quality management system according to DIN EN ISO/IEC 17025. The Fraunhofer IOF is to evaluate and test the scanner with respect to the BSI criteria, and report the results to the BSI. The BSI certifies the fingerprint scanners based on the IOF test report.

To be certified by the BSI, each scanner has to pass seven different tests. The scanner must

1. have a linear gamma correction,
2. have a defined and constant resolution,
3. have very small geometric image distortions,
4. render small details with sufficient contrast,
5. have a homogeneous brightness distribution,
6. have a high signal-to-noise ratio,
7. render real fingerprints with a high amount of grey values.

The physical principle of most optical fingerprint scanners is frustrated total internal reflection. Light hits a glass-air-boundary of a prism at an angle of incidence larger than the critical angle. As a consequence, the light is reflected at this surface in the direction of a camera. If fingers are put on the glass surface, light is coupled out at the contact areas. In these areas, the reflected light intensity is reduced, yielding dark fingerprints on a bright background.

For testing the fingerprint scanners, specially adapted test targets are used, which have to be optically coupled to the glass surface by using an index matching liquid like immersion oil or water. Images of the targets (for example chrome-on-glass structures) are acquired with the fingerprint scanner and subsequently evaluated.

Since the start of the scanner evaluation in late 2006 Fraunhofer IOF has evaluated seven different scanner models.

References:

- /1/ Technische Richtlinie zur Produktion- datenerfassung, -qualitätsprüfung und Übermittlung für Pässe (BSI TR-03104), <http://www.bsi.bund.de/literat/tr/tr03104/>.

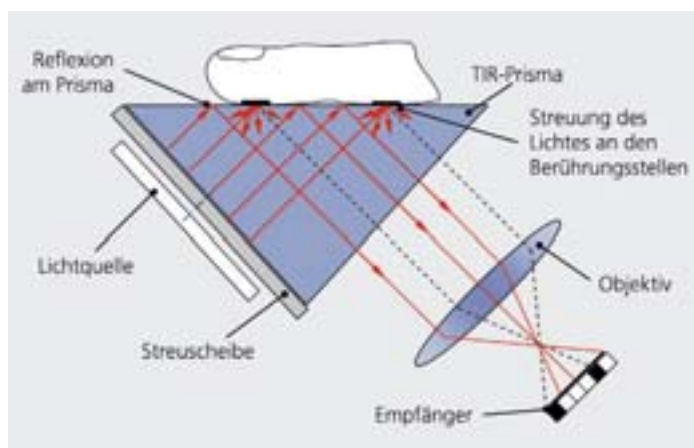
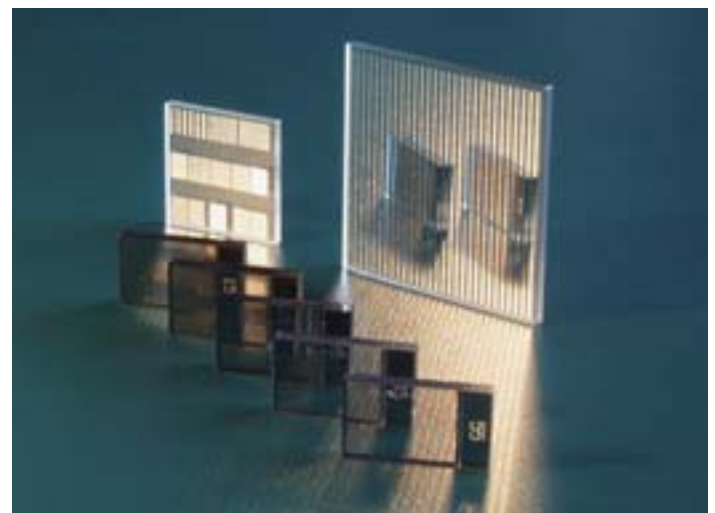


Abb. 1: Funktionsprinzip eines optischen Fingerabdruck-Scanners.

Fig. 1: Principle function of an optical fingerprint scanner.

Abb. 2: Für die Prüfung verwendete Testtargets.

Fig. 2: Test targets used for fingerprint-scanner testing.



---

### Internationale Gäste International Guests

**Jean-Jacques Arnoux, Emmanuel Sein**  
EADS Astrium, Toulouse, France

**Makoto Banno**  
KONICA MINOLTA OPTO, INC., Tokyo, Japan

**Umberto Bello, Volker Kirschner,  
Valerie Fernandez, Philippe Martimort**  
ESTEC EUROPEAN SPACE RESEARCH AND  
TECHNOLOGY CENTRE, Noordwijk, Netherlands

**Charles Fort, Philippe Michallon**  
Leti – Laboratoire d'électronique et de technologie  
de l'information, Grenoble, France

**Peter Geelen**  
Contour Fine Tooling BV, Valkenswaard,  
Netherlands

**Dr. Daniel Gisler, Dr. Hans-Martin Schmid,  
Stefan Hagenbruch**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,  
Institut für Astronomie, Zürich, Switzerland

**Prof. Rainer Heintzmann**  
King's College, London, Great Britain

**Dr. Rieks Jager**  
ASTRON, Dwingeloo, Netherlands

**Azmi Kadkly**  
KLA-Tencor Corporation, Milpatas, USA

**Prof. Dr. Masafumi Kumano**  
Tohoku University, Tokyo, Japan

**Dobbe Lin**  
HON HAI Technology Group, Taipei, Taiwan

**Päivi Martilla**  
Jabil, Espoo, Finland

**Jarmo Maula**  
Planar Systems Inc., Espoo, Finland

**Prof. Dr. Kyungshwan Oh**  
Yonsai University, Yonsai, Korea

**Prof. Tadashi Okino, Prof. Hirofumi Suzuki**  
Kobe University, Kobe, Japan

**Peter Osselaer, Ph.D Chandra Venkatraman**  
Bekaert Advanced Coating NV, Zulte, Belgium

**Jeffrey W. Roblee**  
Precitech, Inc., Keen, New Hampshire, USA

**Prof. Anthony E. Siegman**  
Stanford University, Palo Alto, USA

**Prof. Dr. Georg Stegeman**  
Universität Orlando, Orlando, USA

**Prof. Orazio Svelto**  
Politecnico di Milano, Mailand, Italy

**Prof. Kevin Turner**  
University of Wisconsin-Madison, Madison, USA

**Twan van Veggel**  
PGE B.V., Eindhoven, Netherlands

**Prof. Frank W. Wise**  
Cornell University, Ithaca, USA

---

### Internationale Kooperationen International Co-operations

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

**Great Britain**  
PERA Innovation Ltd., Melton Mowbray, Mark  
Taylor

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

**Israel**  
Technion, Haifa, Prof. Abraham Marmor  
RAFAEL, Haifa, Dr. Hedva Zipin

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

**Japan**  
EUV Lithography Systems Development,  
Hiratsuka, Dr. Georg Soumagne;  
Research Div. Komatsu Ltd.,  
Hiratsuka, Dr. Akira Sumitani;  
Kobe University, Kobe,  
Prof. Hirofumi Suzuki;  
Tohoku University, Sendai,  
Prof. Toshikuno Kaino

**Netherlands**  
ESTEC EUROPEAN SPACE RESEARCH  
AND TECHNOLOGY CENTRE, Noordwijk,  
Umberto Bello

**Poland**  
Wroclaw University of Technology,  
Prof. Henryk Kasprzak;  
Warsaw University of Technology,  
Wojciech Swieszkowski, PhD

**Portugal**  
University Aveiro,  
Prof. Nikolai Sobolew;  
Universidade de Coimbra,  
Prof. Maria Helena Mendes Gil

**Russia**  
Moscow State University,  
Prof. Alexander Tikhonravov

**Slovakia**  
VUSAPL, Nitra, Danica Cervincova

**Switzerland**  
IMT University Neuchâtel,  
Prof. Hans-Peter Herzog;  
EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials  
Testing and Research, Dübendorf,  
Dr. Ir. Arie Bruinink;  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,  
Institut für Astronomie,  
Dr. Daniel Gisler

**Ukraina**  
National Technical University "Kharkov Polytech-  
nic Institute", Prof. Valery V. Kondratenko

**USA**  
Naval Air Warfare Center, China Lake,  
Dr. Jean M. Bennett;  
University of Wisconsin-Madison,  
Madison, Prof. Roxann L. Engelstad;  
SEMATECH, Inc., Austin, Texas,  
Chris van Peski

---

## Messebeteiligungen 2007 Fairs Participations 2007

### Photonics West

23.–25. Januar, San Jose, USA

### SMT

24.–26. April., Nürnberg, Germany

### Control

8.–11. Mai, Sinsheim, Germany

### SID 2007

20.–25. Mai, Long Beach, CA, USA

### MiNaT

12.–14. Juni, Stuttgart, Germany

### LASER.World of Photonics

18.–21. Juni, München, Germany

### V2007

16.–18. Oktober, Dresden, Germany

### K2007

24.–31. Oktober, Düsseldorf, Germany

### VISION 2007

6.–8. November, Stuttgart, Germany

### Euromold

5.–8. Dezember, Frankfurt/Main, Germany

---

## Messeexponate 2007 Fair Exhibits 2007

### Antireflective and anti-fogging plastic components:

AR-plas® – antireflection of plastics by plasma etching,  
AR-hard® – antireflective multilayer system,  
Hydrophobization and anti-fogging combined with antireflection properties

### OptiMon – in-situ broadband monitoring system

### Multilayer collector mirror for soft X-rays

### Schwarzschild objective for the EUV spectral range

### Compact LED light sources

### LED beam shaping by free forms

### Chirped lens arrays for laser beam homogenization

### Laser spliced components of fused silica

### LTCC based reflector elements for optoelectronic devices

### Fiber coupled optoelectronic system on LTCC-platform

### Solder bumped optoelectronic components

### Ultra-precision diamond turned components: free forms, aspheric and plane light weight mirrors for IR, VIS and UV for space applica- tions and astronomy

### Compression gratings on 12" substrates

### Computer generated holograms for imaging and testing of aspheres

### Insect inspired imaging for ultra-compact vision systems

### Miniaturized laser scanning projection system

### Micro-display based imaging systems

### THz imaging system

### Fiber laser based micro machining system

### kolibri CORDLESS – Handheld cordless optical 3D measurement system

### kolibri MULTI – 3D multi-view measurement system

### Optics characterization: light scatter measurement and analysis

---

## Preise 2007 Awards 2007

**Deutscher Zukunftspreis 2007,  
Preis des Bundespräsidenten  
für Technik und Innovation**  
an Dr. Andreas Bräuer, Fraunhofer IOF,  
Dr. Stefan Illek und Dr. Klaus Streubel,  
OSRAM Opto Semiconductors GmbH  
6. Dezember 2007, Berlin

**Thüringer Forschungspreis 2007  
Im Bereich »Angewandte Forschung«**  
an Dipl.-Ing. (FH) Tino Benkenstein,  
Dipl.-Ing. (FH) Christoph Damm,  
Dr. rer. nat. Torsten Feigl,  
Dr. rer. nat. Thomas Peschel,  
Dipl.-Phys. Sven Schröder,  
Dr. rer. nat. Sergiy Yulin,  
Dr. rer. nat. Uwe D. Zeitner  
14. Februar 2007, Erfurt

## 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 Physikalaboranten und Industriemechanikern über die Betreuung von Praktikanten, Diplomanden und 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.

## Workshops 2007

**Workshop Laser + Photonics**  
27.–28. März, Ulm

**optence Weiterbildungskurs**  
Grundlagen der Optikbeschichtung  
14. Mai, Frankfurt/Main

**OTTI-Fachforum: Funktionalisierung von Glasoberflächen durch Beschichtungen**  
Veranstaltungsleiter Prof. Dr. Norbert Kaiser, Fraunhofer IOF  
21.–22. Mai, Regensburg

**KooperationsForum**  
»Oberflächentechnologien und Beschichtungen«  
22. Mai, Köln

**Advanced Solid State Lasers: Status, Prospects and Applications**  
20.–21. Juni, München

**Praktikum und Seminar 3D-Messtechnik**  
28.–29. Juni, Fraunhofer IOF, Jena

**Alumni-Workshop**  
6. Juli, Fraunhofer IOF, Jena

**V2007 –  
Industrierausstellung & Workshop-Woche**  
»Vakuumbeschichtung und  
Plasmaoberflächentechnik«  
16.–18. Oktober, RAMADA Hotel Dresden

**3. Internationaler Workshop »Faserlaser«**  
14.–15. November, ICC Dresden

## Vorlesungen Lectures

Dr. Ramona Eberhardt  
**Mikrooptikmontage**  
Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Norbert Kaiser  
**Beschichtungstechnik**  
Fachhochschule Jena  
**Nanooptik**  
Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
**Grundlagen der Laserphysik**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena  
**Experimentelle Methoden**  
der Atom- und Molekülphysik  
Friedrich-Schiller-Universität Jena  
**Angewandte Photonik**  
Seminar für Doktoranden FSU Jena,  
Fraunhofer IOF

Dr. Uwe Detlef Zeitner und  
Prof. Dr. Stefan Nolte  
**Optik ultrakurzer Pulse**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Uwe Detlef Zeitner  
**Aktive und passive Bauelemente**  
der miniaturisierten Optik  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

## Diplomarbeiten Diploma Theses

Patrick Bartholome  
**Bearbeitung von monokristallinen  
Diamantwerkzeugen für die Ultrapräzisions-  
bearbeitung mittels Laser**  
Fachhochschule Jena, 09/07

Andreas Blumentritt  
**Simulationen und Experimente an Ytterbium-  
dotierten Hochleistungsfaserlasern**  
Fachhochschule Merseburg, 11/07

Christian Dille  
**Untersuchung und Anwendung nicht-  
linearer optischer Grenzflächeneffekte zur  
Charakterisierung von Fokussieroptiken**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/07

Michael Flämmich  
**Bestimmung des internen Elektrolumineszenz-  
spektrums eines polymeren Emittiermaterials  
für organische LEDs**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/07

Kevin Füchsel  
**Niedertemperaturabscheidung  
von Indiumzinnoxid**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/07

Christian Graulich  
**Experimentelle Untersuchungen zu Grenzen  
der linsenlosen Mikroskopie**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/07

Steffen Hädrich  
**Ultrafast OPCPA system for amplification  
of ultrashort pulses and application of high  
intensity pulses to tabletop Lensless Imaging  
in the EUV region**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/07

Sigrun Hein  
**Entwicklung und Charakterisierung einer UV-  
härtenden Beschichtung auf Polymeren mit  
Antifog-Eigenschaften**  
Fachhochschule Jena, 11/07

Thomas Knauer  
**Entwicklung und Erprobung eines medizinischen  
Linearaktuators zur Repositionierung  
von Unterschenkelfrakturen unter Einsatz  
von Formgedächtnislegierungen**  
Fachhochschule Jena, 10/07

Andreas Kolbmüller  
**Untersuchungen zur Erzeugung von  
Freiformflächen mit Bearbeitungsverfahren  
der Ultrapräzisionszerspanung**  
Fachhochschule Jena, 02/07

Doreen Müller  
**Kontrolle der Nichtlinearität in faser-optischen Kurzpuls-Verstärkersystemen**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 08/07

Tim Rathje  
**Aufbau und vergleichbare Untersuchung eines Faserlasers in Ring- und Fabry-Perot-Anordnung unter besonderer Berücksichtigung der temporären Leistungsstabilität**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/07

Hannes Rümpler  
**Variantenvergleich von Reinigungsverfahren und Designentwurf einer Reinigungsvorrichtung für elektronisch arbeitende Substrathalter**  
Fachhochschule Schmalkalden, 01/07

Markus Schenk  
**State-selective detection of electrostatic guided cold formaldehyde**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/07

Christian Seifert  
**Untersuchungen zum CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschweißen mit dynamischen Strahlungsparametern mit Leistungsbereich 1–3 kW**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/07

Sebastian Sicker  
**Entwicklung und Erprobung einer Vorrichtung zum automatisierten Handhaben von Lotpreformen**  
Fachhochschule Jena, 06/07

Hilmar Straube  
**Optimierung von Röntgenoptiken für die Hochenergie-Elektronen-Spektrometrie**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 10/07

Tino Untermann  
**Hierarchische volumetrische Fusion von Freiformflächen in phasogrammetrischen Messsystemen**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 03/07

Mathias Wagner  
**Entwicklung eines piezoelektrisch getriebenen 20 kHz-Modulators für Laserstrahlung bis 1 kW cw-Leistung**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/07

Matthias Weiß  
**Formation of optical solitons in active semiconductor layer systems**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/07

Ulf Zastra  
**Optische und röntgenographische Untersuchungen zum isostrukturellen Phasenübergang von Samariumsulfid**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 01/07

---

## Bachelor

Tina Eschrich  
**Präparationsmethoden für laseraktive Photonische Kristallfasern**  
Fachhochschule Jena, 11/07

Manuela Holz  
**Spektralphotometrische Charakterisierung gechirpter dielektrischer Spiegel für den nahen infraroten Bereich**  
Fachhochschule Jena, 11/07

Heidi Malaka  
**Untersuchung der Benetzungseigenschaften mikrostrukturierter Polymeroberflächen mit und ohne zusätzliche Beschichtungen**  
Fachhochschule Jena, 11/07

---

## Dissertationen

Dr. rer. nat. Nicolas Benoit  
**Strahlungsstabilität von EUV-Multilayerspiegeln**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/07

Dr. rer. nat. Jonas Burghoff  
**Volumenwellenleiter in kristallinen Medien**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 05/07

Dr. rer. nat. Tina Clausnitzer  
**Kontrolle der Beugungseffizienzen dielektrischer Transmissionsgitter**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/07

Dr.-Ing. Marcel Flemming  
**Methoden der Simulation und Charakterisierung von nanostrukturierten ultrahydrophoben Oberflächen für optische Anwendungen**  
Technische Universität Ilmenau, 07/07

Dr.-Ing. Christoph Schenk  
**Theoretische und experimentelle Untersuchungen an ebenen aerostatischen Gaslagererelementen unter Hochvakuumbedingungen**  
Technische Universität Ilmenau, 11/07

Dr. rer. nat. Alexander Szameit  
**Light propagation in two-dimensional waveguide arrays**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/07

Dr.-Ing. Frank Wippermann  
**Chirped Refractive Microlens Arrays**  
Technische Universität Ilmenau, 12/07

## Patents

### Deutsche Patentanmeldungen 2007 Patent Applications 2007

(A1)

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

**Verfahren zum Fügen  
justierter diskreter optischer Elemente**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 002 436.5

(A2)

Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Vorrichtung zur optischen Navigation**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 042 984.5

(A3)

Duparré, J.; Schmälzle, P.; Dannberg, P.;  
Bräuer, A.; Punke, M. (Uni Karlsruhe);  
Völkel, R. (SUSS MicroOptics)  
**Mikrolinsen-Array  
mit integrierter Beleuchtung**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 050 167.8

(A4)

Duparré, J.; Wippermann, F.; Bräuer, A.  
**Bildsensor**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 045 525.0

(A5)

Förster, E.; Müller, R. (CIS)  
**Reflektiver Streulichtsensor**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 049 189.3

(A6)

Füchsel, K.; Tünnermann, A.; Kley, E.-B.  
**Fotoempfindliches Halbleiterelement**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 024 478.0

(A7)

Kalkowski, G.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.;  
Nolte, S. (IAP)  
**Verfahren zum Laser-gestützten Bonden,  
derart gebondete Substrate und  
deren Verwendung**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 008 540.2

(A8)

Kley, E.-B.; Brückner, F. (IAP); Clausnitzer, T. (IAP)  
**Monolithischer dielektrischer Spiegel**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 047 681.9

(A9)

Müller, S.; Rohde, M.; Eberhardt, R.  
**Verfahren zur Reinigung von Oberflächen  
sowie Verwendung des Verfahrens**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 037 903.1

(A10)

Munkelt, C. (IAP); Schmidt, I.;  
Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Vorrichtung und Verfahren zum  
berührungslosen Erfassen  
räumlicher Koordinaten einer Oberfläche**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 022 361.9

(A11)

Praderutti, B. (IAP); Notni, G.; Riehemann, S.  
**Verfahren und Vorrichtung zum schnellen  
Messen von Proben mit geringem optischem  
Wegunterschied mittels elektromagnetischer  
Strahlung im Terahertz-Bereich**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 011 820.3

(A12)

Schreiber, P.; Höfer, B.; Beckert, E.  
**Optische Anordnung zur Symmetrierung der  
Strahlung von Laserdiodenbarren**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 020 798.3

(A13)

Schulz, U.; Kaiser, N.; Füchsel, K.;  
Tünnermann, A.; Scheler, M.  
**Halbleiterbauelement auf strukturiertem  
Kunststoffsubstrat**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 046 718.6

(A14)

Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.;  
Wendling, I. (IAP)  
**Optisches Element mit einer Antibeschlags-  
schicht und Verfahren zu dessen Herstellung**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 009 512.2

(A15)

Schulz, U.; Bollwahn, N.; Munzert, P.; Kaiser, N.;  
Rose, K. (ISC)  
**Mechanisch beständige Nanostruktur  
zur Entspiegelung**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 059 886.8

(A16)

Tünnermann, A.; Thomas, J. U. (IAP);  
Burghoff, J. (IAP); Wikzak, E. (IAP);  
Voigtländer, C. (IAP); Dreisow, F. (IAP);  
Matthäus, G. (IAP); Heinrich, M. (IAP);  
Nolte, S. (IAP)  
**Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen  
eines Gitters mit Chirp**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 035 911.1

(A17)

Wippermann, F.; Schreiber, P.  
**Verfahren und Bilderfassungssystem zur  
achromatisierten Bildaufnahme von  
Objekten**  
Anmelde-Az.: DE 10 2007 001 010.0

(A18)

Zeitner, U. D.; Dunbar, A. (eZono);  
Sobrinho, E. V. (eZono); Schets, S. (eZono)  
**Opto-electrical ultrasound sensor and system**  
Anmelde-Az.: EP 07 112 399.6

---

## Deutsche Patenterteilungen 2007 Patent Assignment (Germany)

- (P1)  
Buß, W.; Mohaupt, M.  
**Verfahren zum Herstellen einer mikrofunktionalen Verbundvorrichtung**  
Veröffentlichungsnummer: DE 199 45 470
- (P2)  
Eberhardt, R.; Harnisch, G.; Mohaupt, M.; Kalkowski, G.; Olbricht, K. (Schott); Schuster, M. (Schott)  
**Vorrichtung und Verfahren zum Einführen von biegeelastischen Fasern und Löchern**  
Veröffentlichungsnummer: DE 101 95 687
- (P3)  
Danz, N.; Hofmann, A. (Hofmann Sensorsysteme)  
**Plasmonenresonanzsensor**  
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2006 041 338
- (P4)  
Duparre, J.; Völkel, R. (SUSS MicroOptics); Knop, K. (CSEM)  
**Einrichtung zur optischen Verschlüsselung, Einrichtung zur optischen Entschlüsselung und Verschlüsselung-/Entschlüsselungs-System**  
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2005 016 818
- (P5)  
Kaiser, N.; Benoit, N.; Feigl, T.; Yulin, S.  
**Thermisch stabiler Multilayer-Spiegel für den EUV-Spektralbereich**  
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2004 062 289
- (P6)  
Kaiser, N.; Scheler, M.; Stöckl, W.; Uhlig, H.  
**Halogenlampe**  
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2004 034 369

- (P7)  
Kaiser, N.; Schulz, U.; Munzert, P.; Scheler, M.  
**Haftfeste optische Beschichtung auf strahlungsempfindlichen Kunststoffoberflächen**  
Veröffentlichungsnummer: DE 102 01 492
- (P8)  
Kaiser, N.; Gatto, A.; Thielsch, R. (Southwall Europe)  
**Reflektierendes Element für freie Elektronen-Laserstrahlung, Verfahren zu seiner Herstellung und seine Verwendung**  
Veröffentlichungsnummer: DE 102 27 367
- (P9)  
Kalkowski, G.; Peschel, T.; Damm, C.; Moszner, R. (SolAr); Moszner, F. (SolAr); Ottma, R. (SolAr); Schulze, D. (TU Ilmenau); Linke, H. (TU Ilmenau)  
**Thermischer Solarsektor**  
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2004 032 091
- (P10)  
Kalkowski, G.; Risse, S.  
**Elektrostatisches Halteelement**  
Veröffentlichungsnummer: DE 102 40 356
- (P11)  
Peschel, T.; Schenk, C.; Rhode, M.; Gebhardt, A.; Risse, S.  
**Elektrostatisches Ablensystem für Korpuskularstrahlung**  
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2005 005 801
- (P12)  
Schulz, U.; Kaiser, N.; Schallenberg, U. (mso Jena)  
**Optisches System zur Verringerung der Reflexion optischer transparenter Substrate**  
Veröffentlichungsnummer: DE 103 54 091

---

## Ausländische Patenterteilungen 2007 Foreign Patent Assignment

- (P13)  
Feigl, T.; Kaiser, N.; Yulin, S.; Kuhlmann, T.  
**Monochromator mirror for the EUV spectral range**  
Veröffentlichungsnummer: US 7,173,759 B2
- (P14)  
Feigl, T.; Kaiser, N.; Yulin, S.; Kuhlmann, T.  
**Monochromator mirror for the EUV spectral range**  
Veröffentlichungsnummer: EP 1 478 953 B1
- 
- ## Gebrauchsmuster 2007 Petty Patent
- (GM1)  
Damm, C.; Peschel, T.; Gyuenot, V.; Ferrari, M. (KIM Uni Jena); Figulla, R. (KIM Uni Jena); Jung, J. (JenaValve)  
**Medizinische Vorrichtung zur Behandlung einer Aortenklappeninsuffizienz**  
Az.: DE 20 2007 005 491 U1

## Scientific Publications

### Bücher Books

Duparré, A.  
**Surface / Microstructure Inspection  
Advanced Optics Using Aspherical Elements**  
(2007) Chapter 14.4, ISBN 081-9-46749-9

Duparré, A.  
**Charakterisierung von Mikro- und  
Nanostrukturen für funktionale Oberflächen  
und Schichten**  
Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung –  
Qualitätssicherung in der Praxis (2007)  
S. 173–181, ISBN 978-3-8167-7386-3

Duparré, J.; Wippermann, F.;  
Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Ultra-dünnes Bilderfassungssystem basierend  
auf künstlichen Facettenaugen**  
Jahrbuch 2007 Optik und Feinmechanik, (2006)  
S. 101–120, ISBN 379-4-90751-5

Kaiser, N.  
**Coating Technologies**  
Advanced Optics Using Aspherical Elements  
(SPIE Press Book) (2007) Chapter 7,  
ISBN: 978-0-8194-6749-2 / Vol. PM173

Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Mehrbild 3-D-Messsysteme**  
Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung –  
Qualitätssicherung in der Praxis (2007)  
S. 240–259, ISBN 978-3-8167-7386-3

Neuhäuser, R.; Tünnermann, A.; Hempel, M.;  
Stecklum, B.; Ruske, J. P.; Guenther, E.;  
Hatzes, A.; Chinin, R.; Lemke, R.; Wuchterl, G.;  
von der Lühe, O.  
**Near-infrared fiber imager for the vlti**  
The power of optical/ir interferometry:  
Recent scientific results and 2<sup>nd</sup> generation  
instrumentation (2007) p. 419–429,  
ISBN 978-3-540-74253-1

Notni, G.  
**Verfahren zur optischen 3-D-Messtechnik**  
Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung –  
Qualitätssicherung in der Praxis (2007)  
S. 214–232, ISBN 978-3-8167-7386-3

Riehemann, S.; Pradarutti, B.; Notni, G.  
**Bildgebende Terahertz-Systeme  
zur Qualitätssicherung**  
Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung –  
Qualitätssicherung in der Praxis (2007)  
S. 420–425, ISBN 978-3-8167-7386-3

### Zeitschriften Journals

Aguergaray C.; Andersen, T. V.; Schimpf, D. N.;  
Schmidt, O.; Rothardt, J.; Schreiber, T.; Limpert, J.;  
Cormier, E.; Tünnermann, A.  
**Parametric amplification and compression  
to ultrashort pulse duration of resonant  
linear waves**  
Optics Express 15 (2007) 9 p. 5699-5710,  
ISSN 1094-4087

Bader, M. A.; Selle, A.; Stenzel, O.  
**High spectral resolution analysis  
of tunable narrowband resonant  
grating waveguide structures**  
Applied Physics B: Lasers and Optics 89 (2007)  
2-3 p. 151–154, ISSN 0946-2171

Brückner, A.; Duparré, J.; Bräuer, A.;  
Tünnermann, A.  
**Analytic modeling of the angular sensitivity  
function and modulation transfer function of  
ultrathin multichannel imaging systems**  
Optics Letters 32 (2007) 12 p. 1758–1760,  
ISSN 0146-9592

Brückner, A.; Duparré, J.; Bräuer, A.;  
Tünnermann, A.  
**Artificial compound eye applying hyperacuity**  
Optics Express 14 (2007) 25 p. 12076–12084,  
ISSN 1094-4087

Brückner, A.; Duparré, J.; Dannberg, P.;  
Bräuer, A.; Tünnermann, A.  
**Artificial neural superposition eye**  
Optics Express 15 (2007) 19 p. 11922–11933,  
ISSN 1094-4087

Brückner, C.; Pradarutti, B.; Stenzel, O.;  
Steinkopf, R.; Riehemann, S.; Notni, G.;  
Tünnermann, A.  
**Broadband Antireflective Surface-Relief  
Structure for THz Optics**  
Optics Express 15 (2007) 3 p. 779–789,  
ISSN 1094-4087

Burghoff, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Origins of waveguiding in femtosecond  
laser-structured LiNbO<sub>3</sub>**  
Applied Physics A 89 (2007) 1 p.127–132,  
ISSN 0947-8396

Burghoff, J.; Grebing, C.; Nolte, S.;  
Tünnermann, A.  
**Waveguides in lithium niobate fabricated by  
focused ultrashort laser pulses**  
Applied Surface Science 253 (2007) 19 p. 7899-  
7902, ISSN 0169-4332

Burghoff, J.; Hartung, H.; Nolte, S.;  
Tünnermann, A.  
**Structural properties of femtosecond laser-  
induced modifications in LiNbO<sub>3</sub> (invited)**  
Applied Physics A: Materials Science & Processing  
86 (2007) p. 165–170, ISSN 0947-8396

Burghoff, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Origins of waveguiding in femtosecond  
laser-structured LiNbO<sub>3</sub>**  
Applied Physics A: Materials Science & Processing  
89 (2007) 1 p. 127-132, ISSN 0947-8396

Büttner, A.; Zeitner, U. D.  
**Experimental Realization of  
Monolithic Diffractive Broad-Area  
Polymeric Waveguide Dye Lasers**  
IEEE Journal of Quantum Electronics 43 (2007) 7  
p. 545–551, ISSN 0018-9197

Cimalla, V.; Pradarutti, B.; Matthäus, G.;  
Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.;  
Tünnermann, A.; Lebedev, V.; Ambacher, O.  
**High efficient terahertz emission  
from InN surfaces**  
Physica Status Solidi (B) 244 (2007)  
6 p. 1829–1833, ISSN 0370-1972

Clausnitzer, T.; Kämpfe, T.; Kley, E.-B.;  
Tünnermann, A.; Tishchenko, A.; Parriaux, O.  
**Investigation of the polarization-dependent  
diffraction of deep dielectric rectangular  
transmission gratings illuminated in Littrow  
mounting**  
Applied Optics 46 (2007) 6 p. 819–826,  
ISSN 0003-6935

Duparré, A.  
**Schmutzabweisende raue Oberflächen  
mit optischer Qualität**  
PlasmaNews Ausgabe September 2007 –  
Tech Portal Plasmatechnologie  
[http://www.techportal.de/de/412/4/newsletter,  
public,articledetail\\_public/view/216/](http://www.techportal.de/de/412/4/newsletter_public,articledetail_public/view/216/) (2007)

Duparré, A.; Ristau, D.  
**Optical Interference Coatings 2007  
Measurement Problem**  
Applied Optics 47 (2007) 13 p. C179–C184,  
ISSN 003-6935

Fahr, S.; Clausnitzer, T.; Kley, E.-B.;  
Tünnermann, A.  
**Reflective diffractive beam splitter for laser  
interferometers**  
Applied Optics 46 (2007) 24 p. 6092–6095,  
ISSN 0003-6935



- Fermann, M.; Tünnermann, A.  
**Fiber lasers – Introduction**  
Journal of the Optical Society of America B: JOSA 24 (2007) 8 p. 1660–1660, ISSN 0740-3224
- Garanovich, I. L.; Szameit, A.; Sukhorukov, A. A.; Pertsch, T.; Krolikowski, W.; Nolte, S.; Neshev, D.; Tünnermann, A.; Kivshar, Y. S.  
**Diffraction control in periodically curved two-dimensional waveguide arrays**  
Optics Express 15 (2007) 15 p. 9737–9747, ISSN 1094-4087
- Heinert, D.; Zimmer, A.; Nawrodt, R.; Koettig, T.; Schwarz, C.; Hudl, M.; Vodel, W.; Tünnermann, A.; Seidel, P.  
**High-sensitivity tool for studying phonon related mechanical losses in low loss materials**  
Journal of Physics: Conference Series 92 (2007) 1 p. 012183, ISSN 0034-6748 p. 012183
- Helm, R.; Mauroner, O.  
**Innovation and market characteristics and success of new research-based spin-off products**  
Jena Research Papers in Business and Economics from Friedrich-Schiller-University Jena, Department of Economics and Business Administration (2007) 4
- Helm, R.; Mauroner, O.  
**Success of research-based spin-offs. State-of-the-art and guidelines for further research**  
Review of Managerial Science 1 (2007) 3 p. 237–270 DOI: 10.1007/s11846-007-0010-x, ISSN 1863-6691
- Iliew, R.; Etrich, C.; Augustin, M.; Kley, E.-B.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.  
**Linear and nonlinear effects of light propagation in low-index photonic crystal slabs**  
Physica Status Solidi A 204 (2007) 11 p. 3689–3707, ISSN 1610-1634
- Janicki, V.; Sancho-Parramon, J.; Stenzel, O.; Lappschies, M.; Görtz, B.; Rickers, C.; Polenzky, C.; Richter, U.  
**Optical characterisation of hybrid antireflective coatings using spectrophotometric and ellipsometric measurements**  
Applied Optics 46 (2007) 24 p. 6084–6091, ISSN 0003-6935
- Kaiser, N.  
**Alte Faustregeln für das Design optischer Schichtsysteme**  
Vakuum in Forschung und Praxis 19 (2007) 4 S. 17–23, ISSN 0947-076x
- Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.  
**Flatness characterization of EUV mask chucks**  
Microelectronic Engineering 84 (2007) 5-8 p. 737–740, ISSN 0167-9317
- Kämpfe, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Dannberg, P.  
**Design and fabrication of stacked, computer generated holograms for multicolor image generation**  
Applied Optics 46 (2007) 22 p. 5482–5488, ISSN 0003-6935
- Klingebiel, S.; Roser, F.; Ortac, B.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency**  
Journal of the Optical Society of America B: JOSA 24 (2007) 8 p. 1716–1720, ISSN 0740-3224
- Kräußlich, J.; Dubs, C.; Lorenz, A.; Tünnermann, A.  
**In-plane lattice parameter determination of Zn: LiNbO<sub>3</sub> thin films epitaxially grown on x-cut LiNbO<sub>3</sub> substrates using X-ray diffraction methods**  
Physica status solidi (A) Applications and materials science 204 (2007) 8 p. 2585–2590, ISSN 0031-8965
- Leitel, R.; Kales, A.; Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Broadband antireflective structures on PMMA by plasma treatment**  
Plasma Processes and Polymers 41 (2007) S1 p. 878–881, ISSN 1612-8850
- Limpert, J.; Roser, F.; Klingebiel, S.; Schreiber, T.; Wirth, C.; Peschel, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**The Rising Power of Fiber Lasers and Amplifiers**  
IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 13 (2007) 3 p. 537–545, ISSN 1077-260X
- Mauroner, O.  
**Spin-off-Geschehen an öffentlichen Forschungseinrichtungen – Determinanten der Gründungsintensität an außeruniversitären Forschungsinstituten**  
Zeitschrift für KMU und Entrepreneurship, 55. Jg., Heft 2 (2007), S. 96–117, ISSN 1860-4633
- Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Method for the vacuum deposition of optical coatings on polymethyl-methacrylate**  
Plasma Processes and Polymers 41 (2007) 4 p. S1036–S1040, ISSN 1612-8850
- Nawrodt, R.; Zimmer, A.; Koettig, T.; Clausnitzer, T.; Bunkowski, A.; Kley, E.-B.; Schnabel, R.; Danzmann, K.; Nietzsche, S.; Vodel, W.; Tünnermann, A.; Seidel, P.  
**Mechanical Q-factor measurements on a test mass with a structured surface**  
New Journal of Physics 9 (2007) 225 doi:10.1088/1367-2630/9/7/225, ISSN 1367-2630
- Nejadmalayeri, A. H.; Scrutton, P.; Mak, J.; Helmy, A. S.; Herman, P. R.; Burghoff, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Kaspar, J.  
**Solid phase formation of silicon nanocrystals by bulk ultrafast laser matter interaction**  
Optics Letters 32 (2007) 24 p. 3474–3476, ISSN 0146-9592
- Nodop, D.; Limpert, J.; Hohmuth, R.; Richter, W.; Guina, M.; Tünnermann, A.  
**High-pulse-energy passively Q-switched quasi-monolithic microchip lasers operating in the sub-100-ps pulse regime**  
Optics Letters 32 (2007) 15 p. 2115–2117, ISSN 0146-9592
- Nodop, D.; Limpert, J.; Hohmuth, R.; Richter, W.; Guina, M.; Tünnermann, A.  
**New gluing technique rejuvenates abandoned laser**  
Photonics Spectra 84 (2007) 10, ISSN 0030-395X
- Notni, G.; Kühmstedt, P.  
**3D-Objekte ermöglichen effizienten Prozess in der Umformtechnik**  
MM Das Industriemagazin 26 (2007) Juni p. 26–28, ISSN 0341-5775
- Ortaç, B.; Plötner, M.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Experimental and numerical study of pulse dynamics in positive net-cavity dispersion modelocked Yb-doped fiber lasers**  
Optics Express 15 (2007) 23 p. 15595-15602, ISSN 1094-4087
- Ortaç, B.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime**  
Optics Express 15 (2007) 17 p. 10725-10732, ISSN 1094-4087

- Ortaç, B.; Schmidt, O.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Hideur, A.  
**High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser**  
Optics Express 15 (2007) 17 p. 10725–10732, ISSN 1094-4087
- Ortaç, B.; Plötner, M.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Self-starting passively mode-locked chirped-pulse fiber laser**  
Optics Express 15 (2007) 25 p. 16794–16799, ISSN 1094-4087
- Ortaç, B.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime**  
Optics Letters 32 (2007) 15 p. 2149–2151, ISSN 0146-9592
- Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Advanced analysis concepts for terahertz time domain imaging**  
Optics Communications 279 (2007) 2 p. 248–254, ISSN 0030-4018
- Radtke, D.; Duparré, J.; Zeitner, U. D.; Tünnermann, A.  
**Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye**  
Optics Express 15 (2007) 6 p. 3067–3077, ISSN 1094-4087
- Radtke, D.; Zeitner, U. D.  
**Laser-lithography on non-planar surfaces**  
Optics Express 15 (2007) 3 p. 1167–1174, ISSN 1094-4087
- Riehemann, S.  
**Exakte Fingerabdrücke für den elektronischen Pass**  
GIT Laborfachzeitschrift (2007) 11 S. 905, ISSN 0016-3538
- Riehemann, S.  
**Prüfung optischer Fingerabdruck-Scanner**  
Photonik (2007) 5 S. 18, ISSN 1432-9778
- Riehemann, S.; Pradarutti, B.; Notni, G.  
**Kompakte THz-Imaging Systeme unter Nutzung von fs-Faserlasern**  
Optik & Photonik 2 (2007) 1, S. 38–43, ISSN 1863-1460
- Roeser, F.; Schimpf, D.; Schmidt, O.; Ortaç, B.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**90 W average power 100 µJ energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system**  
Optics Letters 32 (2007) 15 p. 2230–2232, ISSN 0146-9592
- Röser, F.; Eidam, T.; Rothhardt, J.; Schmidt, O.; Schimpf, D. N.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system**  
Optics Letters 32 (2007) 24 p. 3495–3497, ISSN 0146-9592
- Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Schimpf, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**High repetition rate fiber amplifier pumped sub-20 fs optical parametric amplifier**  
Optics Express 15 (2007) 25 p. 16729–16736, ISSN 1094-4087
- Ruske, J.-P.; Tünnermann, A.  
**New applications for integrated-optical devices**  
Photonik-International 2007 (2007) p. 122
- Schimpf, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Controlling the influence of SPM in fiber-based chirped-pulse amplification systems by using an actively shaped parabolic spectrum**  
Optics Express 15 (2007) 25 p. 16945–16953, ISSN 1094-4087
- Schimpf, D. N.; Rothhardt, J.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; D.; Hanna, D. C.  
**Theoretical analysis of the gain bandwidth for noncollinear parametric amplification of ultrafast pulses**  
Journal of the Optical Society of America B 24 (2007) 11 p. 2837, ISSN 0740-3224
- Schmidt, O.; Rothhardt, J.; Roeser, F.; Linke, S.; Schreiber, T.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Ermeneux, S.; Yvernault, P.; Salin, F.; Tünnermann, A.  
**Millijoule pulse energy Q-switched short-length fiber laser**  
Optics Letters 32 (2007) 11 p. 1551–1553, ISSN 0146-9592
- Schmidt, O.; Rothhardt, J.; Röser, F.; Linke, S.; Schreiber, T.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Ermeneux, S.; Yvernault, P.; Salin, F.; Tünnermann, A.  
**Short Q-Switched Fiber Laser Generates Millijoules in Nanoseconds**  
Photonics Spectra, 84 (2007) 8, ISSN 0030-395X
- Schreiber, T.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**On the study of pulse evolution in ultra-short pulse mode-locked fiber lasers by numerical simulations**  
Optics Express 15 (2007) 13 p. 8252–8262, ISSN 1094-4087
- Schreiber, T.; Schimpf, D.; Müller, D.; Röser, F.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Influence of pulse shape in self-phase-modulation-limited chirped pulse fiber amplifier systems**  
Journal of the Optical Society of America B: JOSA 24 (2007) 8 p. 1809–1814, ISSN 0740-3224
- Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.  
**Roughness Evolution and Scatter Losses of Multilayers for 193 nm**  
Applied Optics 47 (2007) 13 C88-C97, ISSN 0003-6935
- Schröder, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Tünnermann, A.  
**EUV Reflectance and Scattering of Mo/Si Multilayers on Differently Polished Substrates**  
Optics Express 15 (2007) 21 p. 13997–14012, ISSN 1094-4087
- Schulz, U.; Munzert, P.; Leitel, R.; Wendling, I.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.  
**Antireflection of transparent polymers by advanced plasma etching procedures**  
Optics Express 15 (2007) 20 p. 13108–13113, ISSN 1094-4087
- Sorokin, A. A.; Bobashev, S. V.; Feigl, T.; Tiedtke, K.; Wabnitz, H.; Richter, M.  
**Photoelectric Effect at Ultrahigh Intensities**  
Physical Review Letters 99 (2007) paper 213002, ISSN 0031-9007
- Stollberg, H.; Yulin, S.; Takman, P. A. C.; Hertz, H. M.  
**High-reflectivity Cr/Sc multilayer condenser for compact soft x-ray microscopy**  
Review of Scientific Instruments 77 (2006) 12 paper 123101, ISSN 0034-6748
- Szameit, A.; Kartashov, Y. V.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Torner, L.  
**Observation of Two-Dimensional Surface Solitons in Asymmetric Waveguide Arrays**  
Physical Review Letters 98 (2007) 17 p. 173903, ISSN 0031-9007

Szameit, A.; Dreisow, F.; Hartung, H.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.  
**Quasi-incoherent propagation in waveguide arrays**  
Applied Physics Letters 90 (2007) 24 241113, ISSN 0003-6951

Szameit, A.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Control of directional evanescent coupling in fs laser written waveguides**  
Optics Express 15 (2007) 4 p. 1579–1587, ISSN 0946-2171

Szameit, A.; Wang, X.; Makris, K. G.; Kartashov, Y. V.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Bui, L.; Tünnermann, A.; Bezryadina, A.; Zhen, Z.; Christodoulides, D. N.; Torner, L.; Stegeman, G. I.  
**Two-Dimensional Surface Lattice Solitons**  
Optics & Photonics News 18 (2007) 12 p. 42–42, ISSN 1047-6938

Szameit, A.; Hartung, H.; Dreisow, F.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Multi-waveguide excitation in fs laser written waveguide arrays**  
Applied Physics B: Lasers and Optics 87 (2007) 1 p. 17–20, ISSN 0946-2171

Szameit, A.; Pertsch, T.; Dreisow, F.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Peschel, U.; Lederer, F.  
**Light evolution in arbitrary two-dimensional waveguide arrays**  
Physical Review A 75 (2007) 5 p. 053814, ISSN 1094-1622

Szameit, A.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Peschel, U.; Lederer, F.  
**Optical Bloch oscillations in general waveguide lattices**  
Journal of the Optical Society of America B: JOSA 24 (2007) 10 p. 2632–2639, ISSN 0740-3224

Thomas, J.; Heinrich, M.; Burghoff, J.; Nolte, S.; Ancona, A.; Tünnermann, A.  
**Femtosecond laser-written quasi-phase-matched waveguides in lithium niobate**  
Applied Physics Letters 91 (2007) 15 151108, ISSN 0003-6951

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 (invited)**  
Applied Physics A: Materials Science & Processing 86 (2007) p. 153–157, ISSN 0947-8396

Wikszak, E.; Thomas, J.; Klingebiel, S.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Linearly polarized ytterbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg gratings**  
Optics Letters 32 (2007) 18 p.2756–2758, ISSN 0146-9592

Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Kaiser, N.  
**Experimental determination of the reflective index profile of rugate filters based on in-situ measurements of transmission spectra**  
Journal of Physics D (Applied Physics) 40 (2007) 5 p. 1435–1441, ISSN 0022-3727

Wippermann, F.; Schreiber, P.  
**Geschirpte Array refraktiver Mikrolinsen**  
Photonik (2007) 4 p. 58–62, ISSN 1432-9778

Wippermann, F.; Zeitner, U. D.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Sinzinger, S.  
**Beam homogenizers based on chirped microlens arrays**  
Optics Express 15 (2007) 10 p. 6218–6231, ISSN 1094-4087

Zimmer, A.; Nawrodt, R.; Heinert, D.; Schwarz, C.; Hudl, M.; Koettig, T.; Vodel, W.; Tünnermann, A.; Seidel, P.  
**Mechanical losses in low loss materials studied by Cryogenic Resonant Acoustic spectroscopy of bulk materials (CRA spectroscopy)**  
Journal of Physics: Conference Series 92 (2007) 012095 ISSN 1742-6596

Zimmer, A.; Nawrodt, R.; Koettig, T.; Neubert, R.; Thürk, M.; Vodel, W.; Seidel, P.; Tünnermann, A.  
**Cryogenic resonant acoustic spectroscopy of bulk materials (CRA spectroscopy)**  
Review of Scientific Instruments 78 (2007) 6 p. 063905, ISSN 0034-6748

Zubarev, E. N.; Zhurba, A. V.; Kondratenko, V. V.; Pinegyn, V. I.; Sevryukova, V. A.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**The structure, diffusion and phase formation in Mo/Si multilayers with stressed Mo layers**  
Thin solid films 515 (2007) 17, p.7011–7019, ISSN 0040-6090

## Eingeladene Vorträge Invited Papers

Bräuer, A.  
**Combination of MEMS and Microoptics for New Applications**  
IEEE/ LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, 12.–16.8.2007, Hualien, Taiwan

Bräuer, A.  
**Möglichkeiten und Anwendungen der Polymer-auf-Glas-Technology**  
Design und Herstellung optischer Komponenten und Systeme aus Glas und Kunststoff, 28.–29.11.2007, Regensburg, Deutschland

Bräuer, A.; Dannberg, P.  
**UV-curing polymer-based elements for microoptical systems**  
Japanese Chemical Society, 23.3.2007, Osaka, Japan

Bräuer, A.; Dannberg, P.; Duparré, J.; Höfer, B.; Wippermann, F.; Scholles, M.  
**MEMS compatible illumination and imaging micro-optical systems**  
SPIE Photonics West, Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications, 20.–25.1.2007, San Jose, California, USA

Bräuer, A.; Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Voltz, S.  
**Ultra-dünne, künstliche Facettenaugen-Kamera-Synergie zwischen Mikrooptik und Optoelektronik**  
Mikrosystemtechnik-Kongress, 15.–17.10.2007, Dresden, Deutschland

Bräuer, A.; Schreiber, P.; Dannberg, P.; Michaelis, D.; Danz, N.  
**Optimization of LED and OLED based illumination systems**  
7<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Organic Photonics (ISAOP-7), 14.–15.6.2007, Angers, France

Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.  
**OLED design: combined micro- and nano-photonics modeling and routes to a complex optimization algorithm**  
Photonics North, 4.–7.6.2007, Ottawa, Canada

Duparré, A.; Ristau, D.

**Measurement Problem**

Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA

Eberhardt, R.

**Kleben in der mikrooptischen Fertigung**

Klebetchnische Fertigung Fraunhofer IFAM, 20.–21.3.2007, Bremen, Deutschland

Eberhardt, R.; Peschel, T.; Schreiber, T.;

Tünnermann, A.; Limpert, J.

**Hochleistungsfaserlaser –**

**Neue AVT-Konzepte**

3. Internationaler Workshop »Faserlaser«, 14.–15.11.2007, Dresden, Deutschland

Feigl, T.

**Neue Entwicklungen auf dem Gebiet optischer Schichten**

MST Aerospace GmbH: Kooperationsforum Oberflächentechnologien und Beschichtungen, 22.5.2007, Köln, Deutschland

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Perske, M.;

Zeitner, U. D.; Benkenstein, T.; Peschel, T.;

Damm, C.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.

**Herstellung und Anwendung ultradünner**

**Schichtsysteme für den XUV-Spektralbereich**

PhotonNet Forum: Anwendungsnahe Analyseverfahren mittels XUV-Spektralphotometrie, 14.3.2007, Hannover, Deutschland

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Perske, M.;

Taracheva, E.; Kaiser, N.

**EUV Optics**

17<sup>th</sup> International Vacuum Congress, 2.–7.7.2007, Stockholm, Sweden

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Zeitner, U. D.;

Peschel, T.; Damm, C.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.

**XUV Multilayer Optiken**

DPG Frühjahrstagung des Arbeitskreises Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (AMOP), 19.–23.3.2007 Düsseldorf, Deutschland

Houbertz, R.; Wolter, H.; Schmidt, V.; Kuna, L.;

Satzinger, V.; Wächter, C.; Langer, G.

**Optical waveguides embedded in PCBs –**

**a real world application of 3D structures**

**written by TPA**

MRS Fall Meeting 2007, 26.–30.11.2007, Boston, Massachusetts, USA

Limpert, J.; Schimpf, D.; Rothhardt, J.; Häd-

rich, S.; Schmidt, O.; Röser, F.; Schreiber, T.;

Tünnermann, A.; Agueraray, C.; Cormier, E.;

Andersen, T. V.; Pedersen, C. F.

**Fiber laser pumped**

**ultrafast parametric amplifiers**

Photonics West – Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications, 23.1.2007, San Jose, USA

Kaiser, N.

**Beschichtung von Hochleistungsoptiken –**

**Trends und Herausforderungen**

DPG Frühjahrstagung des Arbeitskreises Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (AMOP), 19.–23.3.2007 Düsseldorf, Deutschland

Kaiser, N.

**Design optischer Schichtsysteme**

Otti Seminar: Funktionalisierung von Glasoberflächen durch Beschichtungen, Stand der Technik und aktuelle Trends, 21.–22.5.2007, Regensburg, Deutschland

Kaiser, N.

**EUV multilayer optics at the Fraunhofer IOF**

Otti Seminar: Funktionalisierung von Glasoberflächen durch Beschichtungen, Stand der Technik und aktuelle Trends, 21.–22.5.2007, Regensburg, Germany

Kaiser, N.

**Optische Schichten für**

**den UV-Spektralbereich**

Otti Seminar: Funktionalisierung von Glasoberflächen durch Beschichtungen, Stand der Technik und aktuelle Trends, 21.–22.5.2007, Regensburg, Deutschland

Kaiser, N.

**Latest Development in the Field of Coatings**

**for Optical Instrumentation**

International Conference on Optical Coatings Technology and Applications, 8.–10.5.2007, Suzhou, China

Kaiser, N.

**Market and Business in the Field for Optical**

**Coatings**

Society of Vacuum Coater SVC Annual Meeting, 28.4.–3.5.2007, Louisville, USA

Nolte, S.; Burghoff, J.; Thomas, J.; Ancona, A.;

Dreisow, F.; Tünnermann, A.

**Femtosecond laser written waveguides in**

**LiNbO<sub>3</sub> for nonlinear applications**

26<sup>th</sup> International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), 29.10.–1.11.2007, Orlando, USA

Nolte, S.; Burghoff, J.; Thomas, J.; Ancona, A.;

Dreisow, F.; Tünnermann, A.

**Femtosecond laser induced structural modifications in LiNbO<sub>3</sub> for integrated optical applications**

4<sup>th</sup> International Symposium on Novel Optical Technologies, 5.–6.6.2007, Aachen, Germany

Notni, G.; Duparré, A.

**Light scattering techniques for micro- and nanostructure characterization**

Sino-German Symposium on Advanced Optical Fabrication and Metrology in Micro System Technology (MST), 26.–30.3.2007, Shenzhen, China

Pertsch, T.; Garwe, F.; Rockstuhl, C.; Hübner,

U.; Etrich, C.; Menzel, C.; Pshenay-Severin, E.;

Shipulin, A.; Petschulat, J.; Tünnermann, A.;

Lederer, F.

**Impact of plasmonic resonances for negative index materials**

Progress in Electromagnetics Research Symposium - PIERS 2007, 26.–30.3.2007, Beijing, China

Riehemann, S.

**Breitbandige Terahertzsysteme für**

**Bildgebung und Spektroskopie am**

**Fraunhofer IOF**

Physikalisches Institut der Universität Bonn, 11.9.2007, Bonn, Deutschland

Schreiber, T.; Röser, F.; Ortaç, B.; Schmidt, O.;

Limpert, J.; Tünnermann, A.

**High-power photonic crystal fiber lasers and amplifiers**

SPIE Photonics West, Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications, 20.–25.1.2007, San Jose, California, USA

Schulz, U.

**Beschichtung und Strukturierung von**

**Kunststoffen für die Optik**

Carl-Zeiss-Optik-Kolloquium, 22.5.2007, Jena, Deutschland

Schulz, U.

**Coating on plastics**

Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA

Schulz, U.  
**Combination of ion etching and PVD to perform antireflection properties and advances surface functions on plastic optics**  
Optical World International Symposium at SILMO, 18.10.2007, Paris, France

Schulz, U.  
**Entspiegelung von Polymeroberflächen durch Beschichtung und Nanostrukturierung**  
VDI Wissensforum, 27.–28.11.2007, Düsseldorf, Deutschland

Schulz, U.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.  
**Plasma surface modification of Poly(methyl methacrylate) for direct optical functionalization**  
Symposium on Functional Polymer based Materials, 3.–4.4.2007, Jena, Germany

Tünnermann, A.  
**Der Fraunhofer-Innovationscluster Optische Technologien in Jena: JOIN – Jena Optical INnovations**  
Clusterkonferenz, 4.9.2007, Berlin, Deutschland

Tünnermann, A.  
**Faserlaser**  
Universität Kassel – Physikalisches Kolloquium, 24.5.2007, Kassel, Deutschland

Tünnermann, A.  
**Fiber laser: status and prospects**  
EALA European Automotive Laser Application, 30.1.2007, Bad Nauheim, Germany

Tünnermann, A.  
**Herausforderungen in der Fertigung und Charakterisierung von technischen Oberflächen**  
Symposium für berührende und berührungslose Messtechnik, 26.9.2007, Bamberg, Deutschland

Tünnermann, A.  
**Industrial perspectives of ultrafast fiber lasers**  
Tech Focus Session, CLEO Europe, 19.6.2007, München, Germany

Tünnermann, A.  
**Micro- and nano-optical systems: Markets and prospects**  
World of Photonics, Spectaris  
Analystenkonferenz, 19.6.2007, München, Germany

Tünnermann, A.  
**Micro- and Nanooptics in Nature and Engineering**  
Optik-Kolloquium Max-Planck-Institut für Quantenoptik, 15.5.2007, Garching, Germany

Tünnermann, A.  
**Perspectives, trends and markets for micro- and nano-optical systems**  
EOS Special Session on Grand Challenges of Photonics, 20.6.2007, München, Germany

Tünnermann, A.  
**Seemäuse, Schmetterlinge und Motten: technische Nutzung ihrer Mikro- und Nanostrukturen in der Laserphysik und der Optik**  
Schweizer Gesellschaft für Naturforschung, 21.2.2007, Basel, Schweiz

Tünnermann, A.  
**Technologietrends in der Mikro- und Nanooptik**  
F.O.M. Konferenz, 26.4.2007, Göttingen, Deutschland

Wippermann, F.; Zeitner, U. D.; Dannberg, P.; Sinzinger, S.  
**Fly's eye condenser based on chirped microlens arrays**  
Optics & Photonics, 26.–30.8.2007, San Diego, CA, USA

---

## Vorträge, Poster, Konferenzen Lectures, Posters, Conferences

Aguergaray, C.; Andersen, T.V.; Limpert, J.; Cormier, E.; Tünnermann, A.  
**Fiber continuum seeded ultrafast parametric amplification**  
SPIE Proceedings Vol. 6455 (2007), paper 64550H, ISBN 978-0-81946-568-9

Aguergaray, C.; Andersen, T. V.; Röser, F.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Cormier, E.; Tünnermann, A.  
**High power ultra-short pulses from fiber laser pumped optical parametric amplifier**  
SPIE Proceedings Vol. 6460 (2007), paper 64600N, ISBN 978-0-81946-570-2

Barkusky, F.; Peth, C.; Bayer, A.; Töttger, H.; Mann, K.; Hinze, U.; Foukous, M.; Chichkov, B.; Feigl, T.; Yulin, S.; Peschel, T.; Zeitner, U. D.; Damm, C.; Benoit, N.; Stöckl, W.; Kaiser, N.  
**Compact Source of High Brilliance for the EUV Spectral Range - KOMPASS**  
SPIE Damage to VUV, EUV, and X-ray Optics, 18.–19.4.2007, Prague, Czech Republic

Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.; Zakel, E.  
**Solder Bumping – eine neue Technologie zur Montage optoelektronischer Mikrosysteme**  
Mikrosystemtechnik-Kongress, 15.–17.10.2007, Dresden, Deutschland  
Proceedings Mikrosystemtechnik-Kongress, 15.–17.10.2007, Dresden (2007) S. 51–54

Beckert, E.; Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.; Buchmann, F.  
**Optoelectronics system integration by soldering on ceramic PCB**  
V. ITG Workshop - Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik, 28.3.2007, Berlin, Germany  
Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik: V. ITG-Workshop, 28. 3.2007, Fraunhofer IZM, Berlin (2007) S. 22–24, ISBN 978-3-86727-197-4

Bischoff, M.; Gäbler, D.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.  
**Optical and Structural Properties of LaF<sub>3</sub> Thin Films**  
Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper TuA2, ISBN 1-55752-841-1

- Bräuer, A.  
**OLED-Lichtauskopplung und Strahlformung**  
Veranstaltung von LEG Thüringen und automotive-thüringen e.V. »OLEDs für Beleuchtung im Automobilinnenraum. Perspektive für zukünftige Unternehmensansiedlungen und -erweiterungen«, 22.5.2007, Eisenach, Deutschland
- Bräuer, A.  
**Wafer-scale fabricated mobile phone cameras**  
Nokia-wafer-level, 4.6.2007, Firma Nokia, Helsinki, Finland
- Bräuer, A.; Dannberg, P.; Duparré, J.; Höfer, B.; Schreiber, P.; Scholles, M.  
**MEMS compatible illumination and imaging micro-optical systems**  
SPIE Proceedings Vol. 6466 (2007), paper 646608, ISBN 9780819465795
- Bruchmann, C.; Höfer, B.; Schreiber, P.; Eberhardt, R.; Buss, W.; Peschel, T.; Gebhardt, A.; Tünnermann, A.; Beckert, E.  
**Optimization of fiber coupling by a monolithic piezoelectric actuator (2 DOF)**  
International Symposium on Piezocomposite Applications (ISPA 2005), 27.–28.9.2007, VW Factory, Dresden, Germany
- Bruchmann, C.; Höfer, B.; Schreiber, P.; Eberhardt, R.; Buss, W.; Peschel, T.; Gebhardt, S.; Tünnermann, A.; Beckert, E.  
**Application of PZT thick-films on adjusting purposes in micro-optical systems**  
SPIE Conference „Microtechnologies for the New Millennium“, 2.–4.5.2007, Gran Canaria, Spain
- Brückner, A.; Duparré, J.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.  
**Position detection with hyperacuity using artificial compound eyes**  
Electronic Imaging, 28.1.–1.2.2007, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6501 (2007), paper 65010D, ISBN 978-0-81946-614-3
- Brückner, A.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Compact color vision and increased sensitivity using artificial compound eyes**  
Flying Insects and Robots Symposium, 12.–17.8.2007, Monte Verita, Switzerland
- Brückner, C.; Pradarutti, B.; Stenzel, O.; Steinkopf, R.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Broadband Antireflective Surface-Relief Structure for THz Optics**  
Optical Terahertz Science and Technology Topical Meeting, 19.–21.3.2007, Orlando, USA  
Proceedings Optical Terahertz Science and Technology Topical Meeting, 19.–21.3.2007, Orlando, USA on CD-ROM (2007), ISBN 1-55752-837-3
- Burghoff, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Mechanisms of waveguiding in femtosecond laser-structured LiNbO<sub>3</sub>**  
CLEO/Europe - IQEC 2007, 17.–22.6.2007, München, Germany (2007)
- Burghoff, J.; Hartung, H.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Optical and structural properties of waveguides in LiNbO<sub>3</sub> fabricated by ultrashort laser pulses**  
SPIE Proceedings Vol. 6460 (2007), paper 64600W, ISBN 978-0-81946-570-2
- Chipouline, A.; Schmidt, C.; Pertsch, T.; Egorov, O.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Deych, L.  
**Nonlinear Resonance Broadening and Shift due to Thermo-Optical Instability in Microsphere Resonators**  
The Conference on Photonic Applications, Systems and Technologies PhAST 2007, 4.–9.5.2007, Baltimore, Maryland, USA
- Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.  
**Light extraction from OLEDs: the waveguide perspective**  
SPIE Proceedings Vol. 6475 (2007), paper 64750J, ISBN 978-0-81946-588-7
- Deych, L. I.; Schmidt, C.; Chipouline, A.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.  
**Coupling of the Fundamental Whispering Gallery Mode in Bi-Spheres**  
ICTON ,07. 9<sup>th</sup> International Conference on Transparent Optical Networks Vol. 3 (2007) p. 79–82, ISBN 1-4244-1249-8
- Deych, L. I.; Schmidt, C.; Chipouline, A.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.  
**Coupling between fundamental whispering gallery modes in chains of microspheres**  
Technical Digest (Optical Society of America, Washington DC) (2007) paper FTuG4
- Dreisow, F.; Szameit, A.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Visualization of light propagation in fs written waveguide arrays**  
Photonics West 23.–25.1.2007, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6460 (2007), paper 64601C, ISBN 978-0-81946-570-2
- Duparré, A.  
**Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen für funktionale Oberflächen und Schichten**  
FhG Allianz Vision Seminar „Inspektion und Charakterisierung von Oberflächen und Bildverarbeitung“, 12.7.2007, Braunschweig, Deutschland
- Duparré, A.; Gliech, S.; Schröder, S.  
**Streulichtmesstechnik für 193 nm und 13,5 nm**  
108. DGaO Tagung, 29.5.–2.6.2007, Heringsdorf, Deutschland
- Duparré, A.; Ristau, D.  
**Measurement Problem**  
Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper ThB1, ISBN 1 55752 841-1
- Duparré, J.; Radtke, D.; Brückner, A.; Bräuer, A.  
**Latest developments in micro-optical artificial compound eyes: a promising approach for next generation ultracompact machine vision**  
Electronic Imaging, 28.1.–1.2.2007, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6503 (2007), ISBN 978-0-81946-616-7
- Duparré, J.; Radtke, D.; Tünnermann, A.  
**Artificial compound eye on curved basis by laser beam writing**  
SPIE Advanced Lithography, 20.–25.1.2007, San Jose, California, USA
- Duparré, J.; Radtke, D.; Tünnermann, A.  
**Spherical artificial compound eye captures real images**  
SPIE Proceedings Vol. 6466 (2006) paper 64660K, ISBN 978-0-81946-579-5

Eilenberger, F.; Szameit, A.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Lederer, F.; Röpke, U.; Kobelke, J.; Schuster, K.; Bartelt, H.; Tünnermann, A.

**Discrete-continuous spatio-temporal light localization in nonlinear fiber arrays**  
Conference digest / CLEO/Europe - IQEC 2007, 17.–22.6.2007, Munich, Germany (2007), paper IE6-6-THU, ISBN 1-424-40931-4

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Perske, M.; Taracheva, E.; Stöckl, W.; Schürmann, M.; Kaiser, N.;

**Metall-dielektrische Spiegelschichten**  
15. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, 18.10.2007, Dresden, Deutschland  
15. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium on CD-ROM, European Society of Thin Films e.V., 2007

Feigl, T.; Perske, M.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.  
**Automatisierte Röntgenreflektometrie von 300 mm Wafern und EUV-Optiken**  
Fachtagung Prozessnahe Röntgenanalytik, 15.–16.11.2007, Berlin, Deutschland

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Perske, M.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.  
**EUV and soft X-ray optics development at Fraunhofer IOF Jena**  
COST Action MP0601 Working Group Meeting Short Wavelength Laboratory Sources, 22.–23.11.2007, Pisa, Italy

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Perske, M.; Kaiser, N.  
**Multilayer mirrors for advanced optical instrumentation in the VUV to soft X-ray range**  
15<sup>th</sup> International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (VUV XV), 30.7.2007, Berlin, Germany

Flemming, M.; Duparré, A.  
**Scanning Force Microscopy of Coatings and Nanostructured Surfaces**  
Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper MD6, ISBN 1-55752-841-1

Füchsel, K.; Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Low temperature deposition of indium tin oxide films by plasma ion-assisted evaporation**  
Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper ThB3, ISBN 1-55752-841-1

Garanovich, I. L.; Sukhorukov, A. A.; Kivshar, Y. S.; Szameit, A.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Nonlinear Diffusion and Self-Trapping of Light in Diffraction-Managed Photonic Lattices**  
Nonlinear Photonics – Topical Meeting, (Optical Society of America, Washington, DC, 2007), 2.–6.9.2007, Québec City, Canada (2007) paper JME4

Gebhardt, A.; Steinkopf, R.  
**Lens Centering by Servo Turning**  
Conference Proceedings 7<sup>th</sup> International Conference and 9<sup>th</sup> Annual General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology EUSPEN, Vol. II, 20.–24.5.2007, Bremen, Germany (2007) p. 229–232, ISBN 0-9553082-2-4

Gliech, S.; Schröder, S.; Duparré, A.; Notni, G.  
**Streulichtverfahren zur Inspektion ultra-präzisionsbearbeiteter Oberflächen**  
108. DGaO Tagung, 29.5.–2.6.2007, Heringsdorf, Deutschland

Gliech, S.; Wendt, R.; Duparré, A.  
**UV-VIS-NIR Scatter Measurement Methods for Ultra Precision Surfaces and Coatings**  
Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA (2007)  
OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper ThA2, ISBN 1-55752-841-1

Großmann, C.; Notni, G.  
**Optical Systems for Micro-display Applications**  
SID Exhibitors' Forum, 20.–25.5.2007, Long Beach, California, USA

Helm, R.; Mauroner, O.  
**Innovation and market characteristics and success of new research-based Spin-offs**  
5th Interdisciplinary European Conference on Entrepreneurship Research (IECER), 28.2.2007, Montpellier, France

Helgert, C.; Rockstuhl, C.; Pertsch, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.  
**Second order nonlinear response of gold nanostructures on Lithiumniobate**  
Conference digest / CLEO/Europe - IQEC 2007, 17.–22.6.2007, München, Germany (2007), paper JSII3-5-FRI, ISBN 1-424-40931-4

Hiltunen, I.; Korpela, A.; Mikkonen, R.; Runde, M.; Magnusson, N.; Kalkowski, G.  
**Cryogenic design of the ALU-HEAT project**  
Cryogenic Engineering and Cryogenic Materials Conference 2007, 16.–20.7.2007 Chattanooga, USA

Kaiser, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Benoit, N.; Tünnermann, A.  
**EUV multilayer optics at the Fraunhofer IOF**  
Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper FA2, ISBN 1-55752-841-1

Kalkowski, G.; Peschel, T.; Harnisch, G.  
**ALU-HEAT: A Superconducting 200 kW Aluminium Billet Heater**  
Workshop zum 7. Forschungsrahmenprogramm der EU, 26.1.2007, Erfurt, Germany

Kühmstedt, P.  
**Messmethoden in der Zahnmedizin**  
2. Symposium digitale Fertigung, 1.12.2007, Darmstadt, Deutschland

Kühmstedt, P.  
**Robuste Multi-view 3-D-Messsysteme in Rapid Prototyping- und Qualitätssicherungsketten**  
FhG Allianz Vision Seminar »Optische 3-D-Messtechnik«, 28.–29.6.2007, Jena, Deutschland

Kühmstedt, P.; Bräuer-Burhard, C.; Munkelt, C.; Heinze, M.; Palme, M.; Schmidt, I.; Hintersehr, J.; Notni, G.  
**Intraoral 3D Scanner**  
SPIE Optics East, 9.–12.9.2007, Boston, MA, USA

Kühmstedt, P.; Breitbarth, M.; Bräuer-Burhard, C.; Notni, G.  
**3D-Formvermessung mittels Phasenkorrelationstechnik in Stereoanordnung**  
108. DGaO Tagung, 29.5.–2.6.2007, Heringsdorf, Deutschland

- Kühmstedt, P.; Breitbarth, M.; Bräuer-Burchardt, C.; Notni, G.  
**Messplatz zur Prüfung optischer Freiformen mit Streifenprojektion und Datenanalyse mittels Waveletfilterung**  
108. DGaO Tagung, 29.5.–2.6.2007, Heringsdorf, Deutschland
- Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Schmidt, I.; Breitbarth, M.; Notni, G.  
**Multi resolution optical 3D sensor**  
SPIE Europe Optical Metrology 2007 Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, 18.–21.6.2007, München, Germany  
SPIE Proceedings Vol. 6616 (2007), paper 66161K, ISBN 9780819467584
- Kühmstedt, P.; Munkelt, C.; Heinze, M.; Bräuer-Burchardt, C.; Notni, G.  
**3D shape measurement with phase correlation based fringe projection**  
SPIE Europe Optical Metrology 2007 Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, 18.–21.6.2007, München, Germany  
SPIE Proceedings Vol. 6616 (2007), paper 66160B, ISBN 9780819467584
- Leitel, R.; Stenzel, O.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.  
**Comparison of thermal shifts in resonant grating waveguide structures and multilayer stacks**  
Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper WD 2, ISBN 1-55752-841-1
- Leitel, R.; Wendling, I.; Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Erzeugung von Antireflexeigenschaften auf Polymeroberflächen durch Plasmaprozesse**  
15. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, 18.10.2007, Dresden, Deutschland  
15. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium on CD-ROM, European Society of Thin Films e.V. (2007)
- Leitel, R.; Wendling, I.; Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.  
**Stochastic sub-wavelength structures on polymer surfaces for antireflection purposes**  
Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper MC4, ISBN 1-55752-841-1
- Lippmann, U.; Friedrich, K.; Riehemann, S.; Notni, G.  
**Visuelles Stimulationssystem für den Einsatz in der Magnetoenzephalographie**  
108. DGaO Tagung, 29.5.–2.6.2007, Heringsdorf, Deutschland
- Mauroner, O.  
**Integration technologies for micro-opto-electronical microsystems**  
Tagung: ZVEI Forum auf der Productronica "Microsystems rapid development and production", 16.11.2007, München, Germany
- Michaelis, D.; Kudaev, S.; Schreiber, P.; Bräuer, A.  
**Freeform Beam Shaping**  
EOS Topical Meeting on Micro-Optics, Diffractive Optics and Optical MEMS (TOM 4) (2006) p. 161–162, ISBN 3-00-019532-7
- Mohaupt, M.  
**Optoelectronics system integration by soldering on ceramic PCB**  
Proceedings V. ITG Workshop Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik Fraunhofer IZM, 28.3.2007, Berlin, Germany p. 22–23, ISBN 978-3-86727-197-4
- Mohaupt, M.  
**Vorrichtung zum präzisen Stapeln von LTCC-Keramikfolien**  
Öffentliches Statusseminar zum BMBF-Projekt Microfun, 1.2.2007, Hermsdorf, Deutschland
- Mohaupt, M.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Banse, H.; Tünnermann, A.  
**Joining procedures for a high precision assembly of micro-optical systems**  
Conference Proceedings 7<sup>th</sup> International Conference and 9<sup>th</sup> Annual General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology EUSPEN, Vol. II, 20.–24.5.2007, Bremen, Germany (2007) p. 304–307, ISBN 0-9553082-2-4
- Mohaupt, M.; Beckert, E.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.; et al  
**Montage von Mikrooptiken für mobile DVD Laufwerke**  
Mikrosystemtechnik-Kongress, 15.–17.10.2007, Dresden, Deutschland  
Proceedings MikroSystemTechnik Kongress 2007, 15.–17.10.2007, Dresden, Deutschland (2007) S. 59–62
- Munkelt, C.; Bräuer-Burchardt, C.; Kühmstedt, P.; Schmidt, I.; Notni, G.  
**Cordless hand-held optical 3D sensor**  
SPIE Europe Optical Metrology 2007 Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, 18.–21.6.2007, München, Germany  
SPIE Proceedings Vol. 6618 (2007) p. 66180D, ISBN 978-0-8194-6760-7
- Munkelt, C.; Schmidt, I.; Heinze, M.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Cordless hand-held optical 3D Sensor for rapid 3D-scanning with WLAN**  
Euro-uRapid 2007, 4.12.2007, Frankfurt (M), Germany  
Proceedings Euro-uRapid 2007, 3.–4.12.2007, Frankfurt (M), Germany, (2007) p. 205–210, ISBN 978-3-8167-7488-4
- Munkelt, C.; Schmidt, I.; Bräuer-Burchardt, C.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Cordless portable multi-view fringe projection system for 3D reconstruction**  
CVPR 2007 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 18.–23.6.2007 Minneapolis, Minnesota, USA
- Munkelt, C.; Trummer, M.; Wenhardt, S.; Denzler, J.  
**Benchmarking 3D Reconstruction from Next Best View Planning**  
IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA), 16.–18.5.2007, Institute of Industrial Science (IIS) The University of Tokyo, Japan (2007) p. 552–555, ISBN 978-4-901122-07-8
- Nejadmalayeri, A. H.; Scrutton, P.; Mak, J.; Helmy, A. S.; Herman, P. R.; Burghoff, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Kaspar, J.  
**Solid-Phase Generation of Silicon Nanoparticles by Ultrafast Laser Irradiation**  
Conference on Laser and Electrooptics (CLEO), 4.–9.5.2007, Baltimore, USA (2007) paper CThJ5
- Notni, G.  
**Konfokale Verfahren – Triangulationsverfahren – Lichtschnitt und Streifenprojektionstechniken**  
FhG Allianz Vision Seminar »Optische 3-D-Mess-technik«, 28.–29.6.2007, Jena, Deutschland
- Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Munkelt, C.  
**The concept of virtual landmarks in 3D-multi-view fringe projection**  
SPIE Optics East, 9.–12.9.2007, Boston MA, USA



- Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Müller, R.; Riehemann, S.; Nolte, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Multichannel balanced detection of ultra-short THz pulses**  
 Joint 32<sup>nd</sup> International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2007), 3.–7.9.2007, Cardiff, UK  
 IRMMW-THz 2007 on CD-ROM (2007)  
 p. 132–139, ISBN 1-4244-14393
- Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Fast THz Imaging of Styrofoam**  
 Optical Terahertz Science and Technology Topical Meeting, 19.–21.3.2007, Orlando, USA
- Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Terahertz Imaging for Styrofoam Inspection**  
 SPIE Optics East, Terahertz Physics, Devices, and Systems II, 9.–12.9.2007, Boston, USA  
 SPIE Proceedings Vol. 6772 (2007), ISBN 978-0-81046-932-8
- Pertsch, T.; Garwe, F.; Rockstuhl, C.; Hübner, U.; Etrich, C.; Menzel, C.; Pshenay-Severin, E.; Shipulin, A.; Petschulat, J.; Tünnermann, A.; Lederer, F.  
**Impact of plasmonic resonances for negative index materials**  
 Progress In Electromagnetics Research Symposium - PIERS 2007, 26.–30.3.2007  
 Beijing, China.
- Pshenay-Severin, E.; Garwe, F.; Petschulat, J.; Rockstuhl, C.; Hübner, U.; Helgert, C.; Kley, E.-B.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.; Lederer, F.  
**A double cell metamaterial for independent tuning of the magnetic and electric response**  
 Conference digest / CLEO/Europe - IQEC 2007, 17.–22.6.2007, Munich, Germany (2007) JSII4-2  
 FRI, ISBN 1-424-40931-4
- Riehemann, S.  
**The accomodating, aging eye – actual ideas on a joint opto-mechanical eye modul**  
 105. DOG Kongress, 20.–23.9.2007, Berlin, Germany
- Riehemann, S.; Lippmann, U.; Friedrich, K.; Huonker, R.; Haueisen, J.; Notni, G.  
**Projection System with an Image Guiding Optical Fiber Bundle for Picture Transfer**  
 SID Exhibitors' Forum, 20.–25.5.2007, Long Beach, California, USA  
 Proceedings SID Exhibitors' Forum (2007)  
 p. 120–122, ISSN 0007-966X
- Risse, S.; Gebhardt, A.; Steinkopf, R.; Giggel, V.  
**NiP plated mirrors for astronomy and space**  
 Conference Proceedings 7<sup>th</sup> International Conference and 9<sup>th</sup> Annual General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology EUSPEN, Vol. II, 20.–24.5.2007, Bremen, Germany (2007)  
 p. 348–351, ISBN 0-9553082-2-4
- Rohde, M.  
**Entwicklung von Komponenten zur automatisierten Zentrierfehlerbeseitigung**  
 Abschlusspräsentation Projekt Fermi, 28.9.07, Wettenberg, Deutschland
- Röser, F.; Schimpf, D.; Schmidt, O.; Ortaç, B.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**90-W average-power, high-energy femtosecond fiber laser system**  
 SPIE Proceedings Vol. 6453 (2007) p. 645310, ISBN 978-0-81946-566-5
- Schmidt, C.; Egorov, O.; Chipouline, A.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Deych, L. I.  
**Broadening and shift of resonances due to thermo-optical instability in microsphere resonators**  
 Conference digest / CLEO/Europe - IQEC 2007, 17.–22.6.2007, Munich, Germany (2007)  
 IE-15-TUE, ISBN 1-424-40931-4
- Schmidt, C.; Egorov, O.; Chipouline, A.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Deych, L. I.  
**Nonlinear Effects due to Thermo-Optical Instability in Microsphere Resonators**  
 ICTON ,07. 9<sup>th</sup> International Conference on Transparent Optical Networks Vol. 3 (2007) p. 55–57, ISBN 1-4244-1249-8
- Schmidt, C.; Egorov, O.; Chipouline, A.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Tünnermann, A.; Deych, L. I.  
**Nonlinear resonance broadening and shifting due to thermo-optical instability in microsphere resonators**  
 Conference on Laser and Electrooptics (CLEO), 4.–9.5.2007, Baltimore, USA (2007)  
 paper JThD11
- Schreiber, T.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Numerical study of pulse evolution in ultra-short pulse fiber lasers**  
 SPIE Photonics West, Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications, 20.–25.1.2007, San Jose, California, USA
- Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.  
**Roughness Evolution and Scatter Losses of Multilayers for 193 nm**  
 Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
 OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper FA5, ISBN 1-55752-841-1
- Schröder, S.; Kamprath, M.; Duparré, A.  
**Characterization of thin films and bulk materials for DUV optical components**  
 SPIE Proceedings Vol. 6403 (2007) 64031L, 1–10, ISBN 978-0-8194-6501-6
- Schröder, S.; Kamprath, M.; Gliech, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.  
**Instrument for the Measurement of EUV Reflectance and Scattering – MERLIN**  
 Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
 OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper FA3, ISBN 1-55752-841-1
- Schröder, S.; Kühn, B.; Duparré, A.; Tünnermann, A.  
**Volumenstreuung von synthetischem Quarzglas bei 193 nm**  
 108. DGaO Tagung, 29.5.–2.6.2007, Heringsdorf, Deutschland (2007)
- Schulz, U.; Lau, K.; Kaiser, N.  
**Antireflection Coating AR-Hard with UV-Protective Properties for Polycarbonate**  
 Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
 OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper ThD4, ISBN 1-55752-841-1
- Sonntag, F.; Danz, N.; Weigel, M.; Millaruelo, M.; Mertig, M.; Benke, A.; Klotzbach, U.  
**Lab-on-a-Chip System zum Nachweis von Proteinen und DNA mittels SPR**  
 1. Dresdner Medizintechnik-Symposium, 4.–6.12.2006, Dresden, Deutschland  
 Proceedings 1. Dresdner Medizintechnik-Symposium, Dresdner Beiträge zur Medizintechnik Band 1 (2007) p. 91–96
- Szameit, A.; Dreisow, F.; Heinrich, M.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Kartashov, Y.; Torner, L.  
**Two-dimensional surface lattice solitons**  
 Nonlinear Photonics - Topical Meeting, (Optical Society of America, Washington, DC, 2007), 2.–6.9.2007, Québec City, Canada (2007) paper JWA28

Szameit, A.; Dreisow, F.; Heinrich, M.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

**Quasi-incoherent propagation in waveguide arrays using coherent light sources**

Conference digest / CLEO/Europe - IQEC 2007, 17.–22.6.2007, Munich, Germany (2007) paper CK7-2-WED, ISBN 1-424-40931-4

Szameit, A.; Dreisow, F.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

**Coupling management of fs laser written waveguides**

Photonics West 23.–25.1.2007, San Jose, California, USA, paper 646030  
SPIE Proceedings Vol. 6460 (2007) paper 64600V, ISBN 978-0-81946-570-2

Taracheva, E.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.

**High-performance multilayer coatings for 106 nm**

SPIE Proceedings Vol. 6705 (2007) paper 67050Y, ISBN 0-8194-6368-X

Thomas, J.; Wikszak, E.; Voigtländer, C.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

**Femtosecond written fiber gratings in PM and LMA fibers**

Conference digest / CLEO/Europe - IQEC 2007, 17.–22.6.2007, Munich, Germany (2007), paper CJ6-1-THU, ISBN 1-424-40931-4

Tünnermann, A.

**Leistungskalierung von Hochleistungsfasern und -verstärkern**

3. Internationaler Workshop »Faserlaser«, 14.–15.11.2007, Dresden, Deutschland

Wendling, I.; Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.

**Erzeugung von Nanostrukturen auf Polymeroberflächen durch Plasmabehandlung**

XIII. Tagung Plasmatechnologie PT (Ruhr-Universität Bochum), 5.–7.3.2007, Bochum, Deutschland

Wikszak, E.; Thomas, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

**Inscribing fiber Bragg gratings using IR-fs pulses and a phase-mask scanning technique: potential and applications**

Photonics West 23.–25.1.2007, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6460 (2007) paper 64600Z, ISBN 978-0-81946-570-2

Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Kaiser, N.; Gödeker, C.; Tünnermann, A.

**OptiMon: Spektralphotometrische Überwachung von Beschichtungsprozessen**

1. Jenaer Workshop Spektroskopie, 20.9.2007, Jena, Deutschland

Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Kaiser, N.; Trubetskov, M.K.; Tikhonravov A. V.

**On-line re-engineering of interference coatings**

Optical Interference Coatings Topical Meeting and Tabletop Exhibit, 3.–8.6.2007, Tucson, Arizona, USA  
OSA Technical Digest Optical Interference Coatings on CD-ROM (2007), paper WC10, ISBN 1-55752-841-1

Wippermann, F.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Sinzinger, S.

**Improved homogenization of fly's eye condenser setups under coherent illumination using chirped microlens arrays**

MOEMS and miniaturized systems VI, 24.–25.1.2007, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6466 (2007), paper 64660R, ISBN 978-0-81946-579-5

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

**Improved integration and performance of multi-channel micro optical systems by chirped microlens arrays**

EOS Topical Meeting on Micro-Optics, Diffractive Optics and Optical MEMS (TOM 4) (2007) p. 179–190, ISBN 3-00-019532-7

Wippermann, F.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Craen, P.

**Bifocal liquid lens zoom objective for mobile phone applications**

Electronic Imaging, 28.1.–1.2.2007, San Jose, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6501 (2007), paper 650109, ISBN 978-0-81946-614-3

Wippermann, F.

**New Optical Concepts and Packaging of Smart Laser Modules**

Laser.World of Photonics 2007, 18.6.–21.6.2007, München, Germany

Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Hill, S.; Lucatoro, T.; Dollar, F.; Gullikson, E.; Fang, M.; Chandhok, M.; Shell, M.

**Mo/Si multilayers with enhanced capping layers**

SPIE's Conference: Damage to VUV, EUV & X-ray (Optics and Optoelectronics 2007), 16.–19.4.2007, Prague, Czech Republic

Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Hill, S.; Lucatoro, T.; Dollar, F.; Gullikson, E.; Fang, M.; Chandhok, M.; Shell, M.

**Mo/Si multilayers with enhanced capping layers**

Advanced Lithography Conference, 28.2.–1.3.2007, San Jose, California, USA

# Der Weg zu uns

## How to reach us

### Der Weg zu uns

#### 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, 13 oder 40 in Richtung Burgau oder Winzerla. An der Haltestelle »Beutenberg Campus« aussteigen und der Ausschilderung folgen.

Ab Westbahnhof (Ost-Westverbindung) ca. eine Minute zur Haltestelle Magdelstieg, dann die gleiche Busverbindung nutzen.

#### Auto

Autobahn A 4 bis Abfahrt Jena-Göschwitz. Auf der Bundesstraße B 88 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 A 9 nach Süden bis zum Hermsdorfer Kreuz und dann auf die A 4 Richtung Frankfurt wechseln; diese dann bei Jena-Göschwitz verlassen, weiter siehe Auto.

Oder ab Flughafen Erfurt auf der Autobahn A 4 Richtung Dresden bis Abfahrt Jena-Göschwitz.

### How to reach us

#### By train

(app. 20 minutes with footpath)

Jena has four stations. If you take the route from north to south you will arrive at the station Jena-Paradiesbahnhof. Please go to the bus stop on Teichgraben (5 minutes into the city) and take the Number 10, 13 or 40 direction Burgau or Winzerla. 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-Westbahnhof. After the bridge on the right hand you will see the bus stop Magdelstieg. Use the same lines to Beutenberg Campus.

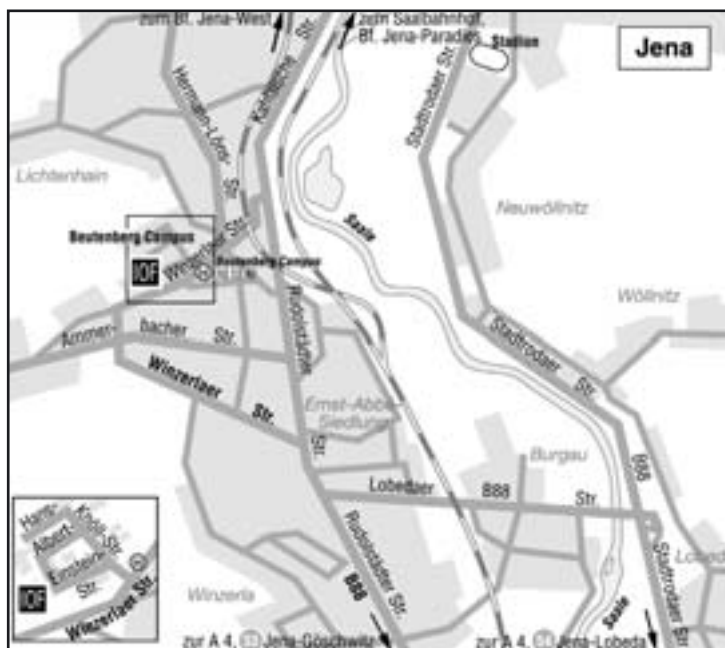
#### By car

Leave the A4 motorway at the exit Jena-Göschwitz, follow the federal highway B 88 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 A 9 motorway to the south (direction Munich) up to the Hermsdorfer Kreuz. Here you have to change the motorway, follow the A 4 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

---

## Herausgeber/Editor

Fraunhofer-Institut für  
Angewandte Optik und Feinmechanik  
Beutenberg Campus  
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

## Strategie/Marketing/Koordination Strategy/Marketing/Coordination

Dr. Brigitte Weber  
Telefon +49 3641 807-440  
brigitte.weber@iof.fraunhofer.de

## Redaktion/Editorial staff

Dr. Brigitte Weber  
Sylvia Bathke

## Gestaltung/Graphic design

Schneider Media GmbH  
Haarbergstraße 47  
99097 Erfurt

## Druck/Print

Color Druck Zwickau  
Industrierandstraße 23  
08060 Zwickau