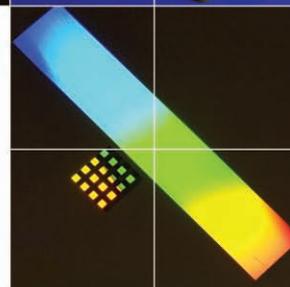
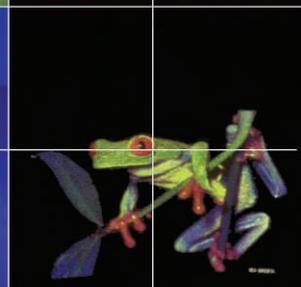
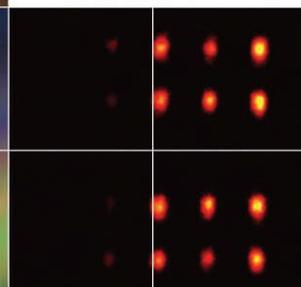
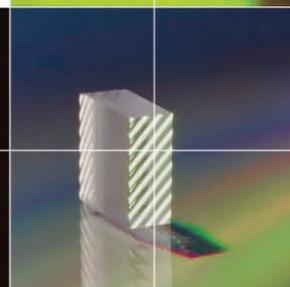
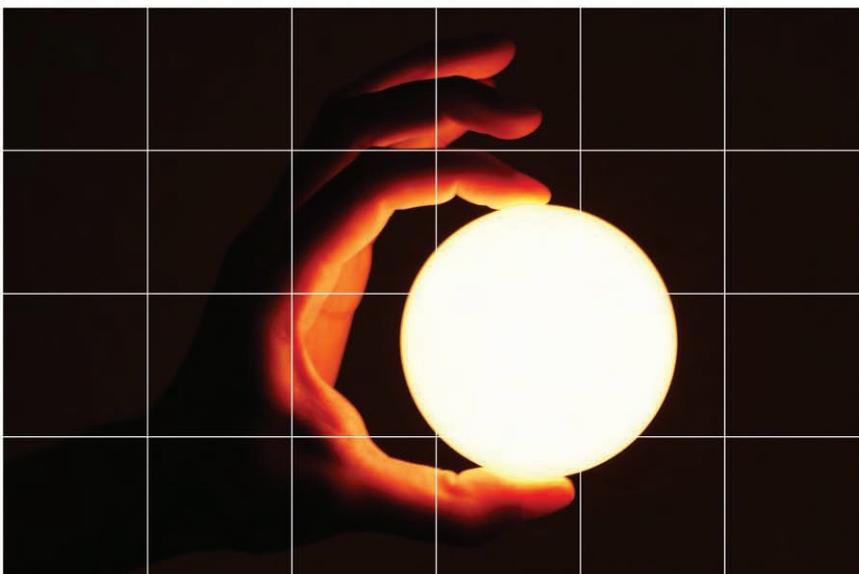
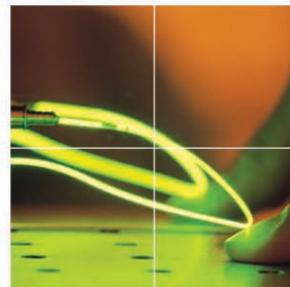




**Fraunhofer** Institut  
Angewandte Optik  
und Feinmechanik

# Jahresbericht Annual Report 2006

Tailored Light - Licht nach Maß



Jahresbericht 2006  
Fraunhofer-Institut  
für Angewandte Optik  
und Feinmechanik

Annual Report 2006  
Fraunhofer Institute  
for Applied Optics and  
Precision Engineering

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>Wichtige Ereignisse 2006</b>	<b>6</b>
Das Institut im Profil	12
Das Institut in Zahlen	18
Fraunhofer-Verbund Oberflächentechnik und Photonik	20
Die Fraunhofer-Gesellschaft	22
<b>Ausgewählte Ergebnisse</b>	<b>23</b>
Produktion von mikrooptischen Bauteilen und Systemen	24
Scharfer Blick ins Weltall – Ultrapräzise Metallspiegel für astronomische und Weltraumanwendungen	26
Infrarot-Kamera für das Skinakas-Observatorium	32
Phasenschieber für die DARWIN-Mission	34
Ionenfallen für die Quantencomputer der Zukunft	36
Lithographie der nächsten Generation für Mikrooptik	38
Blankpressen von Glas als Technologie für Mikro- und Nanooptik	44
Ultrapräzisionsbearbeitung – Technologie für innovative Optikelemente	46
Strategien für die prozessintegrierte Nanorauheits-Kontrolle durch Streulichtmethoden	48
Farbsehen mit künstlichen Facettenaugen	50
Miniaturisierte Laserprojektoren	52
Opto- und thermo-mechanisches Design von Hochleistungsfaserlasern	54
Anwendung optimierter THz-Imaging-Systeme	56
Lasergelötete Faserkopplung für UV-Anwendungen	58
Metamaterialien mit negativem Brechungsindex für die Überwindung der Abbeschen Auflösungsgrenze	60
Lichtpropagation in fs-Lasergeschriebenen Wellenleitern	66
Neue Entwicklungen auf dem Gebiet optischer Schichten	70
Moderne Dünnschichtoptik jenseits des homogenen und isotropen Schichtmodells	76
Haftfeste Beschichtung von PMMA – von der Prozessentwicklung zur industriellen Nutzung	78
Schutzschichten für EUV-Lithographie-Optiken	80
Stereobasierte Streifenprojektion – industrietaugliche 3D-Digitalisiersysteme	82
Visuelles Stimulationssystem für den Einsatz in der Magnetoenzephalographie	88
Hochsensitive Bestimmung der Verluste von synthetischem Quarzglas für die 193 nm Immersionslithographie	90
<b>Besondere technische Ausstattung</b>	<b>92</b>
<b>Namen, Daten, Ereignisse</b>	<b>94</b>
<b>Patente</b>	<b>97</b>
<b>Wissenschaftliche Publikationen</b>	<b>99</b>
<b>Der Weg zu uns</b>	<b>107</b>

# Contents

<b>Preface</b>	<b>5</b>
<b>Highlights 2006</b>	<b>6</b>
<b>The Institute in Profile</b>	<b>12</b>
<b>The Institute in Figures</b>	<b>18</b>
<b>Fraunhofer Surface Technology and Photonics Alliance</b>	<b>20</b>
<b>The Fraunhofer-Gesellschaft</b>	<b>22</b>
<b>Selected Results</b>	<b>23</b>
Production of micro-optical components and systems	25
A sharp view into outer space – Ultra precise metal mirrors for astronomic and space applications	27
Near infrared camera for the Skinakas-Observatory	33
Phaseshifters for the DARWIN-Mission	35
Ion-traps for quantum computers of the future	37
Next generation lithography for micro-optics	39
Glass molding as technology for micro- and nano-optics	45
Ultra precision machining – Technology for innovative optical elements	47
Strategies for in-process nanoroughness control using light scattering techniques	49
Artificial compound eye for color vision	51
Miniaturized laser projectors	53
Opto- and thermo-mechanical design of high power fiber lasers	55
Applications of optimized THz systems	57
Laser beam soldered fiber coupling assembly for UV-applications	59
Metamaterials with negative refraction index for overcoming the Abbe limit	61
Propagation of light in femtosecond laser written waveguides	67
Latest developments in the field for coatings for optical instrumentation	71
Thin film optics beyond the homogeneous and isotropic layer model	77
High-adherent coatings on PMMA – from process development to industrial application	79
Capping layers for EUV lithography optics	81
Stereo based fringe projection – 3D digitization systems for industrial applications	83
Visual stimulation system for deployment in magneto-encephalography	89
High-sensitive determination of optical losses in synthetic fused silica for 193 nm immersion lithography	91
<b>Special Technical Equipment</b>	<b>93</b>
<b>Names, Dates, Activities</b>	<b>94</b>
<b>Patents</b>	<b>97</b>
<b>Scientific Publications</b>	<b>99</b>
<b>How to reach us</b>	<b>107</b>



Liebe Leser,

die enge Vernetzung von Wissenschaft und Wirtschaft bildet die Grundlage nachhaltigen Wachstums. In der Tradition von Ernst Abbe, Carl Zeiss und Otto Schott fördern seit Frühjahr 2006 die Fraunhofer-Gesellschaft, die Friedrich-Schiller-Universität Jena, die Wirtschaft und der Freistaat Thüringen die Zusammenarbeit der Akteure auf dem Gebiet der Optischen Technologien in der Region Jena durch die Gründung des Innovationsclusters JOIN – Jena Optical Innovations. JOIN bildet die Plattform für die Durchführung von Forschungsvorhaben zur Entwicklung neuartiger optischer Systeme für die Volumenmärkte Information und Kommunikation, Life Science sowie Automobil und Verkehr – Wachstumsmärkte, die zunehmend komplexere optische Systeme vollständiger Funktionalität zur Informationsaufnahme und -wiedergabe fordern.

Der Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Wolfgang Tiefensee stellte bei seinem Besuch an der Friedrich-Schiller-Universität (FSU Jena) und dem Fraunhofer-Institut

für Angewandte Optik und Feinmechanik (Fraunhofer IOF) fest, dass die gelebte Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft in Jena mit dem gemeinsamen Bekenntnis zur nachhaltigen Entwicklung der Region beispielgebend für die Regionalentwicklung in der Bundesrepublik ist und so die Basis für zukünftige Innovationen und Wachstum gelegt wird.

Erste Beispiele für Entwicklungen im Rahmen von JOIN betreffen kompakte digitale Projektionssysteme für die Informationstechnik oder Rückfahr-sensoren für die Automobiltechnik. Weitere Schwerpunkte der Forschungsarbeiten im Cluster JOIN bilden geeignete Simulations- und Fertigungsverfahren für optische Systeme in Volumenmärkten. Erste Ergebnisse der Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Vergütung von Kunststoffoptiken stehen kurz vor der Markteinführung.

Mikro- und nano-strukturierte Optiken bilden Schlüsselkomponenten moderner optischer Systeme. Mit der Zusammenführung der Kompetenzen der FSU Jena und des Fraunhofer IOF zur Fertigung von derartigen Optiken im Center for Advanced Micro- and Nano-Optics (CMN-Optics) im vergangenen Jahr steht heute auch für unsere Partner in Wissenschaft und Industrie eine angepasste Infrastruktur zur Verfügung.

Im Sommer 2006 ging das »Herz« des CMN-Optics in Betrieb, die Elektronenstrahlolithographieanlage SB350 OS (LEICA/vistec electron beam), die minimale Strukturgrößen im Bereich von 50 nm bei hoher Überdeckungsgenauigkeit auf Substratgrößen bis zu 300 mm ermöglicht. Technologien für die Herstellung von Optiken mit höchster Auflösung bis zu 12"-Wafer-Maßstab werden damit beherrscht. Eines der ersten Elemente, die realisiert wurden, ist ein großflächiges dielektrisches Gitter hoher Beugungseffizienz, das in

unseren Laboren zur Kompression ultrakurzer Laserpulse eingesetzt wird. Aktuelle Forschungsvorhaben in der Mikro- und Nanooptik betreffen z. B. optische Metamaterialien, die einen negativen Brechungsindex zeigen.

Nicht alle optischen Systeme aus Jena basieren auf Mikro- und Nanooptik. Ein Beispiel für ein makroskopisches optisches System, das im vergangenen Jahr konstruiert wurde, ist ein Teleskop für die Erdbeobachtung. Zwei asphärische und ein sphärischer Spiegel – hergestellt durch Ultrapräzisionsbearbeitung mit Nanometer-Genauigkeit – erzeugen in dieser Anordnung ein nahezu beugungsbegrenztes Bild. Geplanter Start für die Weltraummission des Teleskops aus dem IOF ist 2007.

Herausragende Leistungen gibt es aber nicht nur auf wissenschaftlichem Gebiet zu berichten. 2006 war das Jahr der Fußballweltmeisterschaft in Deutschland. Getragen von der Euphorie des Sommers wurde das IOF Gewinner des Fraunhofer-Fußball-Cup. Nochmals meine Glückwünsche an das Team.

Mein Dank gilt unseren Partnern in Wissenschaft und Wirtschaft für die gute Zusammenarbeit und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, dem Freistaat Thüringen, der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie weiteren Stiftungen und Verbänden für ihre stete Unterstützung.

Ganz besonders danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die hervorragenden Leistungen und ihr Engagement.

Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
Institusleiter

Dear Reader,

The close interrelationship between science and industry forms the basis for sustainable growth. In the tradition of Ernst Abbe, Carl Zeiss and Otto Schott, since Spring 2006 the Fraunhofer-Gesellschaft, the Friedrich-Schiller-University Jena, the industrial sector and the Free State of Thüringen have been promoting cooperation between the various actors in the field of optical technologies within the Jena region through the establishment of the innovation cluster under the name of JOIN – Jena Optical Innovations. JOIN represents the platform for conducting research projects aimed at the development of innovative optical systems for the information and communication, life sciences, automotive and transport volume markets – growth markets which are demanding increasingly more complex optical systems with total functionality for recording and reproducing information.

During his visit to the Friedrich-Schiller-University (FSU Jena) and the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering (Fraunhofer IOF), the Federal Minister of Transport, Building and Urban Affairs, Wolfgang Tiefensee, said that the cooperation being pursued between science and industry in Jena, which share a belief in the sustainable development of the region, is an example of regional development in the Federal Republic. This is where the basis is being laid for future innovation and growth.

The first examples of developments within the framework of JOIN relate to compact digital projection systems for information technology or reversing sensors for automotive technology. Suitable simulation and manufacturing processes for optical systems in volume markets represent other focal areas of the research work within the JOIN cluster. The first results of the collaboration in the field of plastic optics coating are about to be launched on the market.

Optics with micro and nano structures are key components of modern optical systems. With the amalgamation of the expertise of the FSU Jena and the Fraunhofer IOF in the manufacture of these types of optics at the Center for Advanced Micro- and Nano-Optics (CMN-Optics) last year, our partners in science and industry today now also have an adapted infrastructure at their disposal.

In Summer 2006 the “heart” of CMN-Optics, the SB350 OS electron beam lithography plant (LEICA/vistec electron beam), was commissioned into operation. This provides for minimal structure sizes in the 50 nm range with high coverage precision on substrate sizes of up to 300 mm and represents mastery of the technologies for the manufacture of optics with a maximum resolution of up to 12” wafer scale. One of the first elements to have been created is a large dielectric grid with high diffraction efficiency, which is being used in our laboratories for the compression of ultra-short laser pulses. Current research projects in the field of micro and nano optics involve, for example, optical meta materials which have a negative refractive index.

Not all optical systems produced in Jena are based on micro and nano optics. One example of a macroscopic optical system constructed last year is a telescope for earth observation. Two aspherical and one spherical mirror – manufactured to nanometer precision using ultra-precision machining – create a virtually diffraction limited image in this arrangement. The planned start for the space mission of the IOF telescope is 2007.

However, it is not just in the scientific field that we can report on excellent performances. 2006 was the year in which the Soccer World Cup was staged in Germany. Carried along by the euphoria of the summer the IOF won the Fraunhofer Soccer Cup. My congratulations once again to the team.

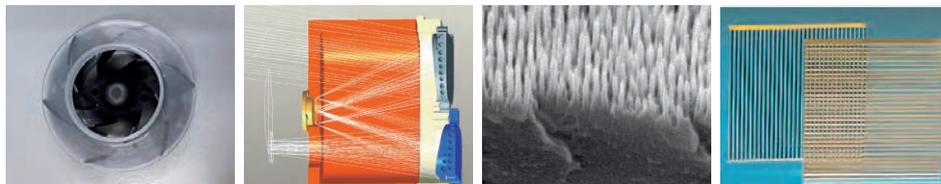
My thanks goes to our partners in science and industry for their good cooperation as well as to the Federal Ministry for Education and Research, the Free State of Thüringen, the Deutsche Forschungsgemeinschaft as well as other foundations and organizations for their continual support.

I would like to express my very special thanks to all employees for their excellent work and commitment.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
Director

## Highlights 2006



### Wissenschaft Nano-Mikro-Makro

**Gold-Nanodrahtpaare**  
Elektromagnetische Metamaterialien – künstlich hergestellte Metall-Dielektrika Kompositstrukturen mit Dimensionen wesentlich kleiner als die Wellenlänge der einfallenden Strahlung bieten das Potential für Abbildungssysteme mit sub-Wellenlängen-Auflösung.

**Kompakte LED-Lichtquellen**  
Um das Licht moderner Hochleistungs-Dünnschicht-LEDs für innovative Anwendungen nutzen zu können, wurden Kollimations- und Homogenisierungsoptiken entwickelt, die kompakte Lichtquellen mit Bauhöhen von ca. 15 mm ermöglichen.

**Prozessüberführung in die Industrie**  
Eine patentierte Technologie zur Entspiegelung von PMMA, das bevorzugt für die Substitution von Glas in Präzisionsoptiken eingesetzt wird, wurde mehrfach erfolgreich in die industrielle Anwendung überführt.

**THz-Imaging**  
Ein Ultrakurzpuls-Faserlaser ist Basis eines optimierten THz-Abbildungssystems für die Qualitätssicherung.

**Three Mirror Anastigmat-Teleskop**  
Für die Erdbeobachtung wurde eine Spiegeloptik entwickelt, die eine Pixel-Auflösung von 6,5 m x 6,5 m am Erdboden erlaubt. Möglich wurde dies durch ultrapräzise Metallspiegel aus Aluminium 6061, beschichtet mit einer amorphen Nickel-Phosphor-Legierung.

### Science Nano-Micro-Macro

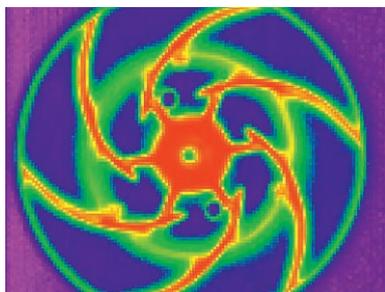
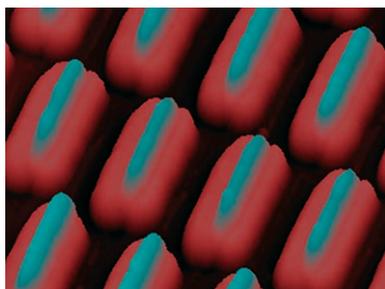
**Gold nano wire pairs**  
Electromagnetic meta-materials – artificially manufactured metal dielectric composite structures with dimensions significantly smaller than the wave length of the incoming beam, offer the potential for display systems with sub-wavelength resolution.

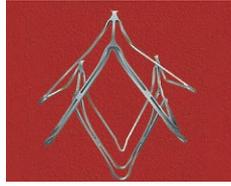
**Compact LED light sources**  
Collimation and homogenization optics which provide for the creation of compact light sources with overall heights of approx. 15 mm were developed in order to utilize the light from modern high-performance, thin layer LEDs for innovative applications.

**Process transfer to industry**  
A PMMA antireflection technology developed at and patented by the Fraunhofer IOF has been successfully and repeatedly transferred to industrial applications. PMMA is used as a substitute for glass in precision optics.

**THz imaging**  
An ultra-short pulse fiber laser forms the basis for an optimized THz imaging system used in quality control.

**Three mirror anastigmat telescope**  
A mirror optic which provides for a pixel resolution of 6.5 m x 6.5 m on the ground was developed for observing the Earth from space. This was made possible by ultra-precision metallic mirrors made from aluminum 6061 coated with an amorphous nickel-phosphorus alloy.





## Preise

### Wissenschaftspreis des Stifterverbandes

Dr. Andreas Bräuer, Dr. Peter Dannberg, Dr. Sergey Kudaev und Dr. Peter Schreiber gewannen gemeinsam mit den Projektpartnern OSRAM OS, Siemens VDO sowie dem Carl Zeiss Forschungszentrum den mit 50.000 Euro dotierten Wissenschaftspreis des Stifterverbandes. Ausgezeichnet wurden ihre Leistungen im Verbundprojekt »Kompakte LED-Lichtquellen« des BMBF.

### Joseph-von-Fraunhofer-Preis

Dr. Thomas Peschel, Christoph Damm und Dr.-Ing. Volker Guyenot erhielten für ihre Arbeiten zu »Minimalinvasiver Herzklappenersatz mit einer transvaskulär implantierbaren Herzklappenprothese« den Joseph-von-Fraunhofer-Preis, mit dem die Fraunhofer-Gesellschaft exzellente anwendungsorientierte Forschungsleistungen auszeichnet.

### Fakultätspreis für die beste Dissertation

Dr. Jacques Duparré erhielt für seine Dissertation »Microoptical Artificial Compound Eyes« den von der Firma Rohde & Schwarz gestifteten Fakultätspreis der Physikalisch-Astronomischen Fakultät der FSU Jena.

### Fraunhofer-Fußballpokal

Die Mannschaft des Fraunhofer IOF gewann das jährlich stattfindende Fußballturnier der Fraunhofer-Gesellschaft. Das Team konnte sich unter 18 Mannschaften aus ganz Deutschland durchsetzen und erstmals den Wanderpokal nach Jena holen.

## Awards

### Stifterverband Science Prize

Dr. Andreas Bräuer, Dr. Peter Dannberg, Dr. Sergey Kudaev and Dr. Peter Schreiber won the Stifterverband Science Prize worth 50,000 euros together with their partners from OSRAM OS, Siemens VDO and the Jena research center of the Carl Zeiss AG. The prize was awarded for their results in the collaborative project "Compact LED Light Sources" granted by the Federal Ministry of Education and Research.

### Joseph-von-Fraunhofer Prize

For their work on "minimal invasive heart valve replacement using a transvascular implantable heart valve prosthetic", Dr. Thomas Peschel, Christoph Damm and Dr.-Ing. Volker Guyenot were awarded the Joseph-von-Fraunhofer prize with which the Fraunhofer-Gesellschaft recognizes excellent, application-oriented research work.

### Faculty Prize for the best dissertation

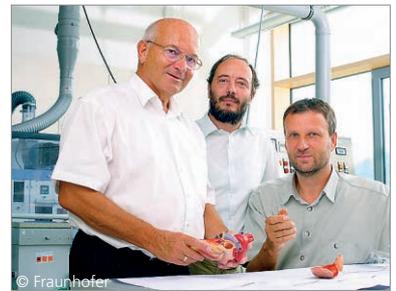
For his dissertation "Microoptical Artificial Compound Eyes", Dr. Jacques Duparré received the Faculty Prize of the Faculty for Physics and Astronomy of the FSU Jena which is awarded by the firm of Rohde & Schwarz.

### Fraunhofer Soccer Cup

The Fraunhofer IOF team won the annual Fraunhofer-Gesellschaft Soccer Tournament in 2006. The Fraunhofer IOF team beat off 18 teams from throughout Germany and took the Cup to Jena for the first time.



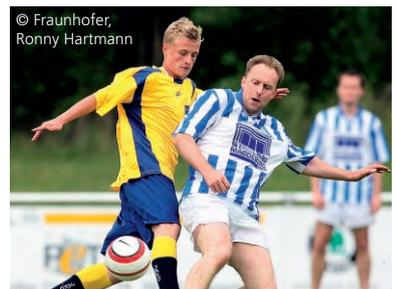
© Fraunhofer



© Fraunhofer



© FSU Jena



© Fraunhofer, Ronny Hartmann



## Das Fraunhofer IOF in der Region

### Bundesminister Tiefensee am IOF

Am 16. August besuchte Bundesverkehrsminister Wolfgang Tiefensee, der gleichzeitig auch der Beauftragte der Bundesregierung für die neuen Länder ist, das Fraunhofer IOF. Der Bundesminister informierte sich über die Forschungsaktivitäten am Institut und den Erfolg der Cluster- und Netzwerkförderung der Bundesregierung. Tiefensee bezeichnete die intensive Zusammenarbeit von Unternehmen und Forschung im Cluster optische Technologien im Raum Jena als hervorragendes Beispiel für den Erfolg einer Branche und ihrer Region.

### Eröffnung von CMN-Optics

Im Rahmen des Thuringentages, der vom 14. bis 16. Juli in Jena stattfand, wurde das »Center for Advanced Micro- and Nano-Optics«, kurz CMN-Optics, feierlich eröffnet. Das Zentrum bündelt Kompetenzen des Fraunhofer IOF und des Instituts für Angewandte Physik der FSU Jena und trägt mit seinem Know-how und der einzigartigen Ausstattung zur Stärkung des Optik-Standortes Jena bei. Mit der Elektronenstrahlolithographieanlage Vistec SB350 OS, einer für die Optik entwickelten Mikrostrukturtechnik-Fertigungsanlage wird die Erzeugung minimaler Strukturen bis 50 nm Breite auf Wafern mit Durchmessern bis 300 mm möglich, Parameter wie sie sonst nur in der Halbleiterindustrie zu finden sind. Finanziert wurde die Anlage aus Mitteln des Freistaates Thüringen, der Europäischen Union und der Fraunhofer-Gesellschaft.

### »Ort der Ideen«

Die Initiative »Deutschland – Land der Ideen« hat den Jenaer Beutenberg Campus als »Ort der Ideen« ausgezeichnet. Der Campus mit seinen acht Instituten und zwei Gründerzentren wurden für Einfallsreichtum, schöpferische Leidenschaft und visionäres Denken gerühmt und präsentierten sich am 14. Juli der Öffentlichkeit. Am IOF weckte der 3-D-Gesichtsscanner, mit dem sich sekundenschnell ein Bild erzeugen lässt, besonderes Interesse.

### BMBF-Innovationsinitiative

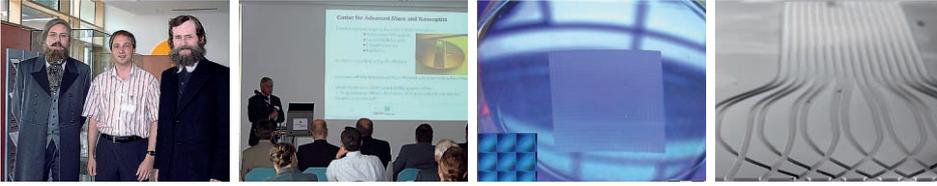
#### »Unternehmen Region«

Mit der Initiative »NanoReplica« konnte sich das IOF im BMBF-Programm »InnoProfile« als einer von 14 unter 120 Bewerbern durchsetzen. Die Arbeiten der Nachwuchsgruppe konzentrieren sich auf die Erforschung nanostrukturierter Formeinsätze und von Replikationstechniken für Anwendungen in der optischen und Kunststoff verarbeitenden Industrie und werden mit 4,2 Mio. € gefördert.

### amos Applikationszentrum Mikrooptische Systeme

Zusammen mit dem CiS Institut für Mikrosensorik konnte sich das IOF im BMBF-Wettbewerb um den Aufbau von Applikationszentren für die Mikrosystemtechnik durchsetzen. »amos« bündelt die Kompetenzen der beiden Institute in der Mikrooptik, der Optoelektronik und der Sensorik und soll in erster Linie die Umsetzung von innovativen Ideen in marktfähige Produkte bis hin zur Serienreife unterstützen.





## The Fraunhofer IOF in the Region

### Federal Minister Tiefensee at IOF

On August 16 the Federal Minister Wolfgang Tiefensee, who is also the representative of the Federal Government for the New German Länder, paid a visit to the IOF and the FSU. The Federal Minister learned about the research activities at the institute and the success of the cluster and network promotion by the federal government. Tiefensee praised the intensive collaboration between companies and the research sector within the optical technologies cluster in the Jena region and described this as an excellent example of the success of a sector and its region.

### Opening of CMN-Optics

The "Center for Advanced Micro- and Nano-Optics", CMN-Optics for short, was officially opened as part of the "Thuringia Day" which was staged in Jena from July 14 to 16. This Center combines the expertise of the IOF and the Institute of Applied Physics of the FSU Jena and thanks to its know-how and unique facilities is contributing towards enhancing Jena's importance as a center for optics. The heart of CMN-Optics is the Vistec SB350 OS electron beam system, a micro structure technology manufacturing plant developed for the optics field. This provides for minimal structures of up to 50 nm in width on wafers with diameters of up to 300 mm, parameters which can only otherwise be found in the semiconductor industry. The plant has been financed by funds from the Free State of Thüringen, the European Union and the Fraunhofer-Gesellschaft.

### "Landmark of Ideas"

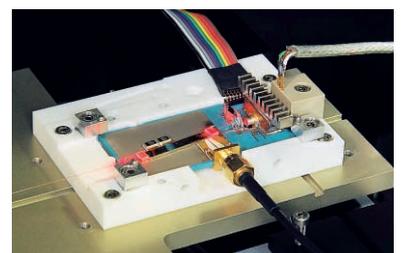
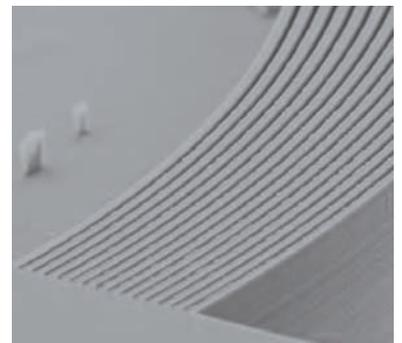
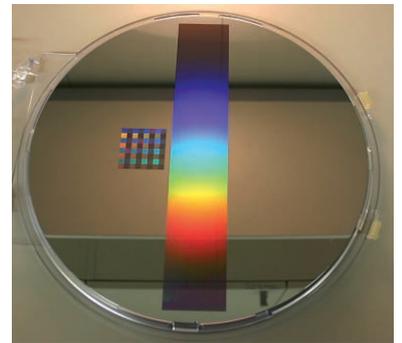
The initiative entitled "Germany – Land of Ideas" has recognized the Beutenberg Campus in Jena as a "Landmark of Ideas". The Campus was praised for its rich range of ideas, creative passion and visionary thinking and presented itself on July 14 to the general public. At IOF the 3D face scanner which enables a 3-D-image to be created in seconds, aroused special interest.

### BMBF innovation initiative "Unternehmen Region"

Through its initiative "NanoReplica" the IOF was able to win through in the BMBF "InnoProfile" program. The sponsorship was provided for 14 projects out of a total of 120 applications. The work of the "NanoReplica" junior group is concentrated on the investigation of nano-structured mould inserts and of replication technologies for applications in the optical and plastics processing industry and receives € 4.2 million in grants.

### amos Application Center for Micro-optic Systems

In conjunction with the CiS Institut für Mikrosensorik GmbH the IOF was successful in the BMBF competition for the establishment of application centers for micro system technology. "amos" combines expertise from the two institutes in the areas of micro optics, optoelectronics and sensors and is intended first and foremost to provide support for the realization of innovative ideas into marketable products through to the mass production-ready stage.





## Messen

### OPTATEC 2006

Highlights unter den Exponaten des IOF auf der internationalen Fachmesse für optische Technologien, Komponenten, Systeme und Fertigung waren der Prototyp eines miniaturisierten Laserprojektionssystems, ein OLED-basiertes near-to-eye Stimulationssystem und ein Monitoring-System zur Überwachung der spektralen Performance komplexer Schichtsysteme während der Fertigung.

### Control 2006, Vision 2006

Auf der Control in Sinsheim, der Messe für maschinelles Sehen, wurden Neuentwicklungen auf dem Gebiet der 3D-Messtechniken vorgestellt. Viel beachtet waren in Stuttgart zur Vision Optiken für kompakte LED-Lichtquellen und ultra-dünne optische Sensoren.

### Messen in Kalifornien

In San Jose präsentierte sich das IOF nach dem Erfolg 2005 zum zweiten Mal im Deutschen Pavillon auf der **Photonics West**, der ganz unter dem Motto »Made in Germany« stand. Vorgestellt wurden mikrooptische Komponenten für die LED-Beleuchtung, Faserverstärker, beschichtete Kunststoffoptiken und optoelektronische Subsysteme.

Im Rahmen der Jahreskonferenz und Messe der **Society for Information Display (SID)** in San Francisco präsentierte sich das IOF dem amerikanischen und weltweiten Markt. Highlight war ein OLED-basiertes Stimulationssystem für die f-MRT. Die SID gehört zu den weltweit führenden Messen der Display-Industrie.

## Fairs

### OPTATEC 2006

Highlights amongst the exhibits at the international trade fair for optical technologies, components, systems and manufacture included the prototype of a miniaturized laser projection system, an OLED-based near-to-eye stimulation system and a monitoring system for observing the spectral performance of complex layer systems during manufacture.

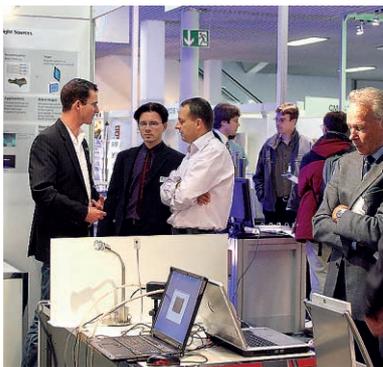
### Control 2006, Vision 2006

New developments in the field of 3D measurement technologies were presented at Control in Sinsheim, the trade fair for computerized vision. At Vision in Stuttgart optics for compact LED light sources and ultra-thin optical sensors attracted a great deal of attention.

### Fairs in California

Following the success of 2005 the IOF was represented for the second time in the German pavilion at **Photonics West** in San José under the slogan of "Made in Germany". Micro optic components for LED illumination, fiber laser amplifier, coated plastic optics and opto-electronic sub systems were presented.

Within the framework of the annual conference of the **Society for Information Display (SID)** fair in San Francisco, the IOF was presented to the American and global market. One of the highlights was an OLED-based stimulation system for the f-MRT. The SID is one of the world's leading trade fairs for the display industry.





## Workshops

### Internationaler UP-Workshop

Über 100 Teilnehmer aus Amerika, Asien und Europa besuchten den Workshop »Ultrapräzisionsbearbeitung von Optiken und Mikrostrukturen«, der gemeinsam mit dem Optonet e.V., Carl Zeiss Jena und der Precitech Inc. durchgeführt wurde. Das internationale Ansehen der Veranstaltung ist durch hochkarätige Referenten aus Deutschland, den Niederlanden, Großbritannien, den USA und Japan belegt. Vorgestellt wurden neueste Technologien der Ultrapräzisionsfertigung, mit denen z. B. Asphären und Freiformflächen nanometergenau gefertigt werden können.

### Workshop zur LED-Beleuchtung

Große Akzeptanz fand der Workshop »Intelligente LED Beleuchtungssysteme«. Es wurden neueste Technologien für Hochleistungs-LED vorgestellt und Einsatzfelder aufgezeigt. Die Aktualität des Themas wird sowohl durch die breite Resonanz der Teilnehmer als auch durch die Referenten aus Forschung und Industrie bestätigt, sie kamen etwa von ZEISS, SIEMENS, PERKIN ELMER, OSRAM, HELLA, FER, OEC, SYPRO OPTICS und SCHOTT.

Weitere Workshops fanden zu den Themen optische Beschichtungen, Mikrooptik-Produktion und Hochleistungs-Diodenlaser statt. Im Mai wurde das DFG Jahreskolloquium im Rahmen des Schwerpunktprogramms »Neue Strategien der Mess- und Prüftechnik für die Produktion von Mikrosystemen und Nanostrukturen« ausgerichtet.

## Workshops

### International UP-Workshop

Over 100 participants from America, Asia and Europe attended the workshop on the "ultra-precision machining of optics and micro structures" organized in conjunction with Optonet e.V., Carl Zeiss Jena and Precitech Inc. The international reputation of the event is demonstrated by the high quality guest speakers from Germany, the Netherlands, Great Britain, the USA and Japan. Presentations were given on the latest technologies for ultra-precision manufacture, which enables aspherical optical components and free forms to be manufactured to nm precision.

### Workshop on LED illumination

There was a good response to the workshop entitled "Intelligent LED illumination systems". Presentations were given of the latest technologies for high performance LEDs and on areas of their application. The topicality of the theme is confirmed both by the response of the participants as well as by the guest speakers from research and industry, e.g. from ZEISS, SIEMENS, PERKIN ELMER, OSRAM, HELLA, FER, OEC, SYPRO OPTICS and SCHOTT.

Additional workshops covered subjects such as optical coatings, micro optic production and high performance diode lasers. In May the DFG Annual Colloquium was organized within the framework of the focal program entitled "New strategies for measurement and testing technology for the production of micro systems and nano structures".



## The Institute in Profile

---

### Kurzporträt

Hauptgegenstand der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit am IOF ist die optische Systemtechnik mit dem Ziel der immer besseren Kontrolle von Licht.

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
- feinmechanische Präzisionssysteme
- Verfahren der Optikmontage.

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

### Anbindung an die FSU Jena

Die Anbindung des IOF an das Institut für Angewandte Physik (IAP) der FSU regelt seit 2003 ein Kooperationsvertrag. Es besteht eine strategische Zusammenarbeit auf innovativen Forschungsfeldern.

Forschungsschwerpunkte am IAP:

- Mikrostrukturtechnik
- Mikro- und Nanooptik
- Integrierte Optik
- Ultraschnelle Optik
- Faser- und Wellenleiterlaser

Vorteile der engen Kooperation:

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

---

### Short portrait

Main topic of research and development at IOF is the optical system technology with the aim of controlling light better and better.

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
- fine 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.

### Connection to the FSU Jena

Since 2003 the connection of the IOF to the Institute of Applied Physics (IAP) of the FSU is arranged by a cooperation contract. Strategic cooperation exists in innovative research fields.

Main topics of research at IAP:

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

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

---

## Kuratorium

Fraunhofer-Institute und Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft werden durch ein Kuratorium beraten.  
Dem Kuratorium des Fraunhofer IOF gehörten im Berichtszeitraum an:

---

## Advisory Committee

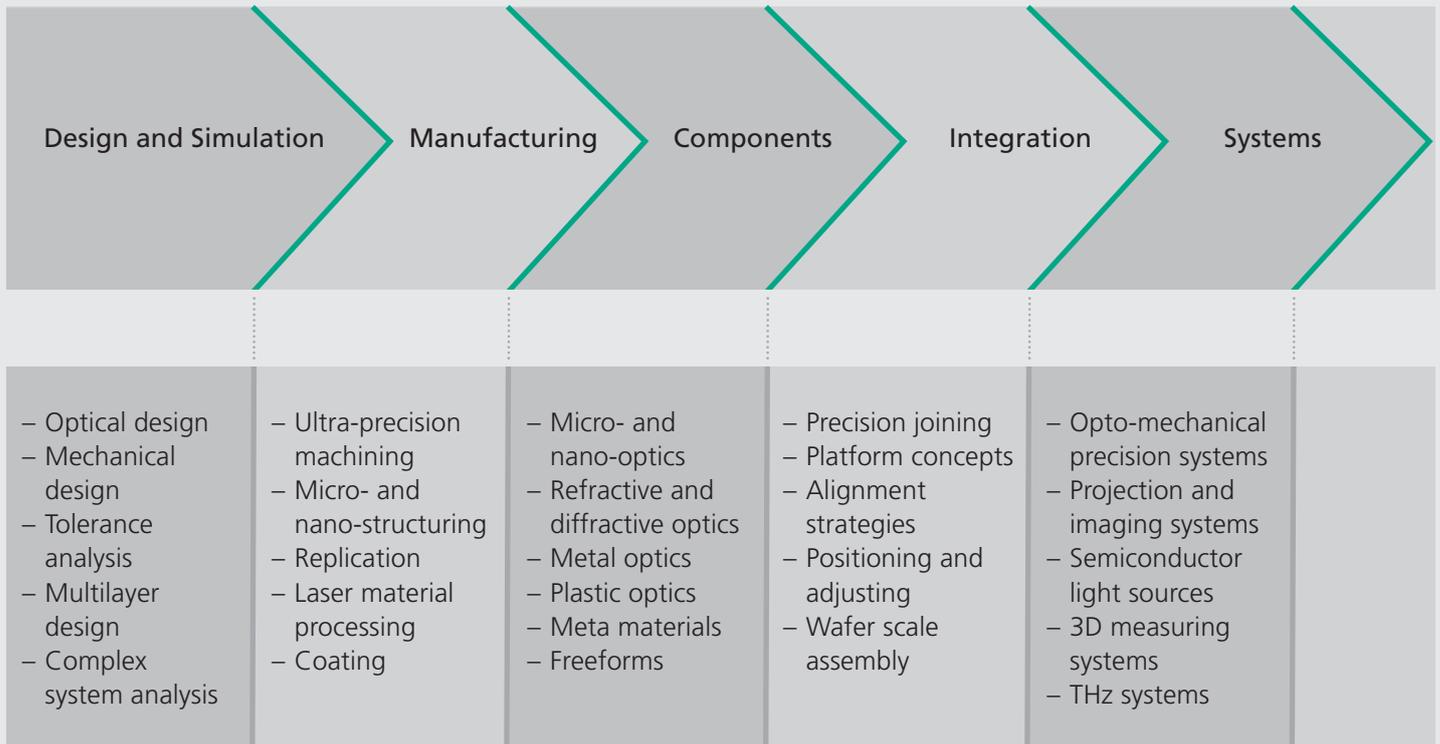
Advisory committees support the Fraunhofer Institutes as well as the Board of the Fraunhofer-Gesellschaft. Members of the advisory committee of the Fraunhofer IOF have been in the report period:

- **Dr. Franz-Ferdinand von Falkenhausen**  
Carl Zeiss Jena GmbH, Jena (Vorsitzender/Chair)
- **Dr.-Ing. Rolf-Jürgen Ahlers**  
ASG Luftfahrttechnik und Sensorik GmbH, Weinheim
- **Dr. Klaus Bartholmé**  
Ministerialrat im Thüringer Kultusministerium, Erfurt
- **Dr. Ralf Bergmann**  
Robert Bosch GmbH, Gerlingen
- **Dipl.-Ing. Peter Leibinger**  
TRUMPF Laser GmbH + Co. KG, Ditzingen
- **Prof. Dr. Gerhard Linß**  
Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Ilmenau
- **Dr. Ludwig Roß**  
IOTech GmbH, Waghäusel-Kirrlach
- **Prof. Dr. Roland Sauerbrey**  
Friedrich-Schiller-Universität, Physikalisch-Astronomische Fakultät, Jena  
Forschungszentrum Rossendorf, Dresden
- **MinR Dr. Frank Schlie-Roosen a.G.**  
Ministerialrat im Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
- **Dr. Norbert Stath**  
OSRAM – Opto Semiconductors, Regensburg
- **Dipl.-Phys. Norbert Thiel**  
Jenoptik AG, Jena
- **Dr. Bärbel Voigtsberger**  
Hermsdorfer Institut für Technische Keramik e. V., Hermsdorf
- **Prof. Dr. Bernd Wilhelmi**  
Jenoptik AG, Jena
- **Dr. Werner Wilke**  
VDI/VDE Innovation und Technik GmbH, Berlin

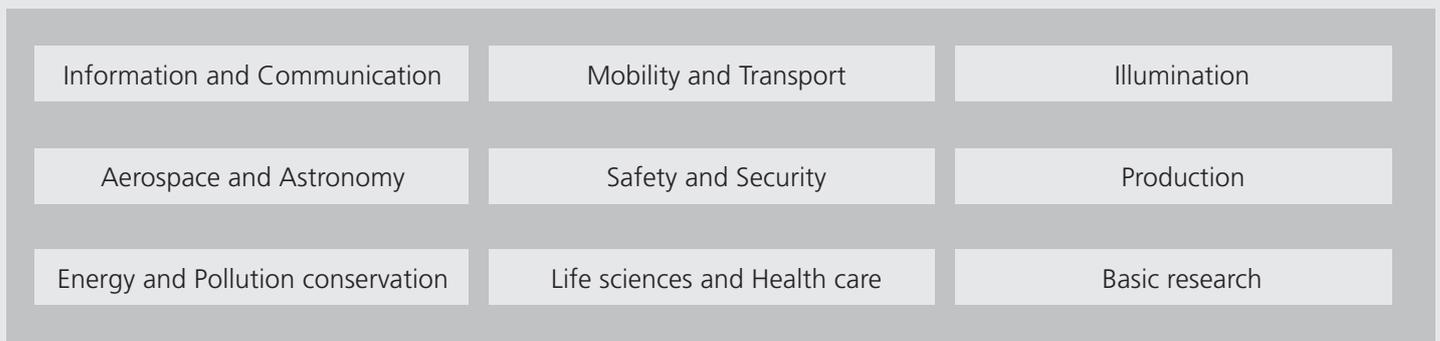
Kompetenzen – Märkte – Anwendungen

Competences – Markets – Applications

### Optical Systems Technology



### Markets



## Anwendungen

### Large Biocular Telescope Astronomie

Für das größte Teleskop der Welt wurde eine Spiegelbaugruppe entwickelt, welche die Strahlengänge der beiden großen Spiegel im Instrument zusammenführt und die Phasenverschiebungen ausgleicht.

### RGB-Laserprojektor Kommunikation

Das Funktionsprinzip des Mini-Projektors beruht auf modulierter Laserstrahlung, die kollimiert und von einem um zwei Achsen schwenkbaren Scanner-Spiegel abgelenkt wird. Das Volumen für den RGB-Projektor beträgt  $7,5 \times 10 \times 2,5 \text{ cm}^3$ .

### Stimulationssystem für fMRT Gesundheitswesen

Für die Übermittlung von Bildern an Patienten in einem Magnetresonanztomographen zur Messung von Hirnaktivitäten wurde ein Projektionssystem unter Verwendung von selbstleuchtenden OLED-Displays entwickelt.

### Phasenschieber für DARWIN Mission Weltraum

Der Prototyp eines cryo-tauglichen, aus drei hochpräzise gefertigten Prismen mit Gold-Spiegelschichten bestehenden Phasenschiebers wurde für die ESA-Weltraummission DARWIN gefertigt.

### Computer generierte Hologramme Produktion

Großflächige CGHs zum Test von Asphären werden im CMN-Optics mittels Elektronenstrahlolithographie hergestellt.

## Applications

### Large Biocular Telescope Astronomy

An assembly group of two mirrors was developed for the world's largest telescope. It combines the two paths of rays in the instrument and adjusts phase shifts.

### RGB laser projector Communication

The operational principle of the mini-projector is based on one modulated, collimated laser beam that is reflected by a scanning mirror oscillating about two axes. The volume of the RGB-projector is  $7.5 \times 10 \times 2.5 \text{ cm}^3$ .

### Visual stimulation system for fMRT Health care

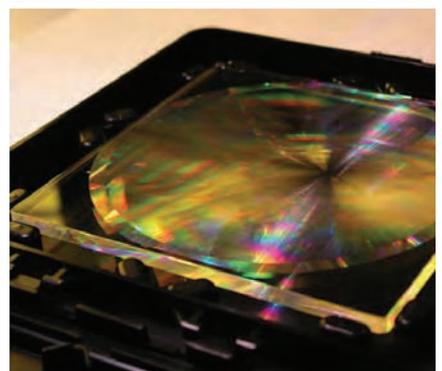
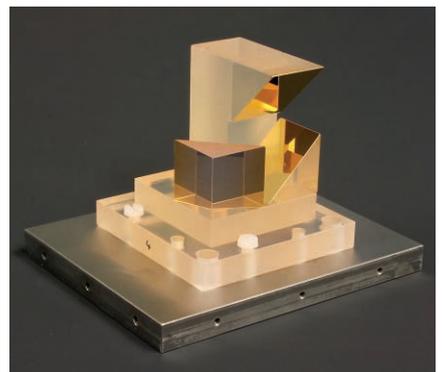
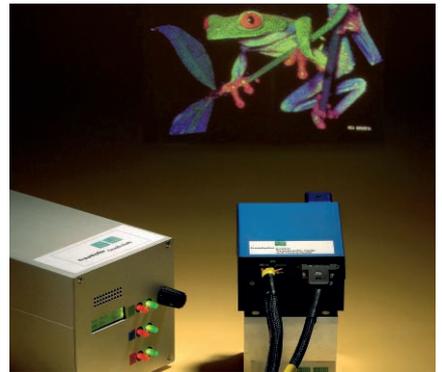
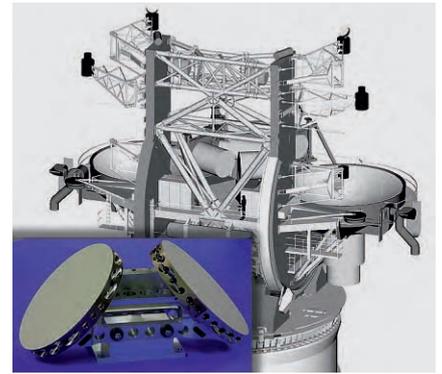
A projection system based on luminous OLED microdisplays was developed for use in magnetic resonance tomography. Images may be projected to the eyes of a patient to measure neuronal activities.

### Phase shifter for DARWIN mission Aerospace

The prototype of a cryo-suitable phase shifter, composed of three high precisely manufactured gold-coated prisms, was produced for the ESA planned space mission DARWIN.

### Computer generated holograms Production

Large area null-test CGHs for asphere testing are manufactured in CMN-Optics by electron beam lithography.





# Organisation

**Director** Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
**Deputy Director** Prof. Dr. Norbert Kaiser  
**Assistant** Adlin Bruns

## Optical Coatings



Prof. Dr. Norbert Kaiser

## NIR and VIS Coatings



Dr. Olaf Stenzel

## Optical Coatings on Plastics



Dr. Ulrike Schulz

## EUV and X-ray Optics



Dr. Torsten Feigl

## Optical Systems



Dr. Gunther Notni

## Characterization of Surfaces and Coatings



Dr. Angela Duparré

## 3D Measurement



Dr. Peter Kühmstedt

## Optics System Design



Dr. Stefan Riehemann

## Microoptical Systems



Dr. Andreas Bräuer

## Design



Dr. Peter Schreiber

## Technology



Dr. Peter Dannberg

## Integration



Dipl.-Ing. (FH) Bernd Höfer

## CMN-Optics



Dr. Uwe Detlef Zeitner

## Precision Engineering



Dr. Ramona Eberhardt

## Microassembly



Dr. Erik Beckert

## Precision Systems



Dr. Stefan Risse

## Simulation and Mechanical Design



Dr. Thomas Peschel

## Fiber Lasers



Dr. Thomas Schreiber

## Infrastructure

### Strategy, Marketing, Coordination



Dr. Brigitte Weber

### Administration



Dipl.-Kffr. Astrid Deppe

### Technical Service



Dipl.-Phys. Kersten Fonfara

## IAP – Institute of Applied Physics FSU Jena



Prof. Dr. Stefan Nolte  
Laser Shaping



Dr. Ernst-Bernhard Kley  
Micro Structuring



Dr. Jens Limpert  
Fiber Lasers



Prof. Dr. Thomas Pertsch  
Nano-Optics

## CMN-Optics

Center for Advanced  
Micro- and Nano-Optics



Dr. Uwe Detlef Zeitner



## amos

Applikationszentrum  
Mikrooptische Systeme



Dr. Ramona Eberhardt



## ultra optics®

Center of Innovation  
Competence



Prof. Dr. Thomas Pertsch



Mitarbeiter 2006	IOF	IAP
Wissenschaftler	46	25
Doktoranden	17	26
Techniker	46	14
Studenten	35	28
Auszubildende	7	1

Aufwendungen 2006 in Mio. €	IOF	IAP
Personalaufwand	5,9	4,1
Sachaufwand	4,7	1,0
Investitionen	6,7	1,8

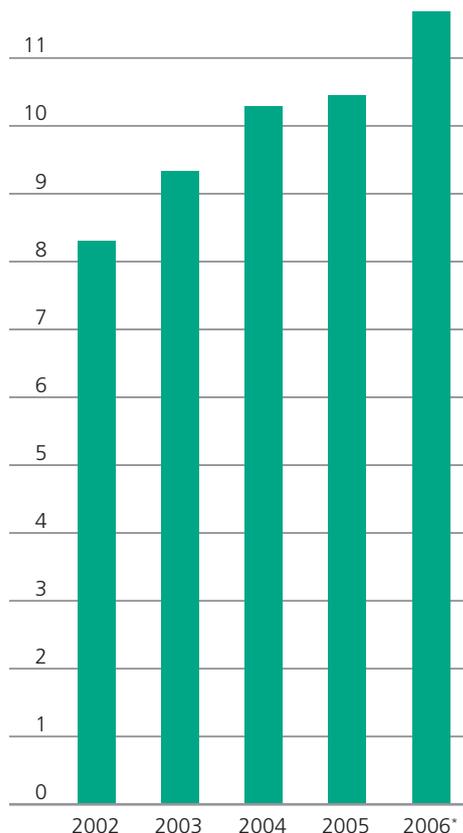
Labor- und Büroflächen	
Fraunhofer IOF	5 000 m <sup>2</sup>
IAP	1 200 m <sup>2</sup>

Im Jahr 2003 hat die Fraunhofer-Gesellschaft einen Kooperationsvertrag mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena abgeschlossen. Er ist Basis für eine effektive Zusammenarbeit zwischen den Mitarbeitern des Fraunhofer IOF und den Mitarbeitern des Instituts für Angewandte Physik der FSU.

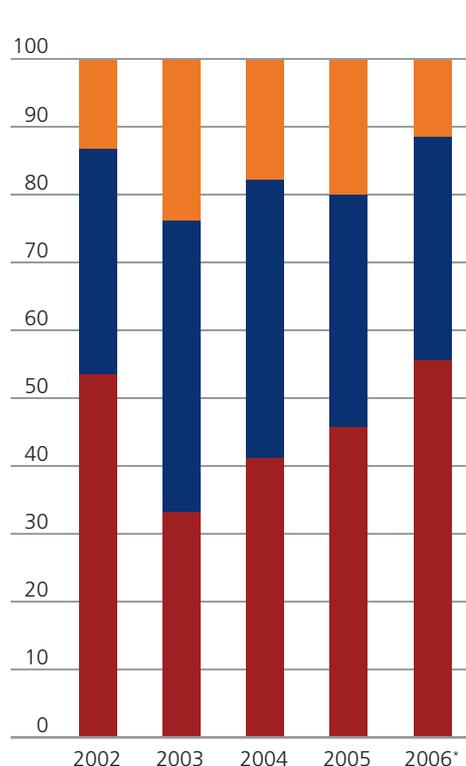
## Investitionen

Aus Mitteln der EU, des Freistaats Thüringen und der Fraunhofer-Gesellschaft wurden für die Jahre 2004, 2005 und 2006 zwölf Millionen Euro zur Beschaffung einer Elektronenstrahlolithographieanlage bewilligt. Mit dieser Anlage als Kernstück wurde am 14. Juli 2006 das Center for Advanced Micro- and Nano-Optics – CMN-Optics eröffnet.

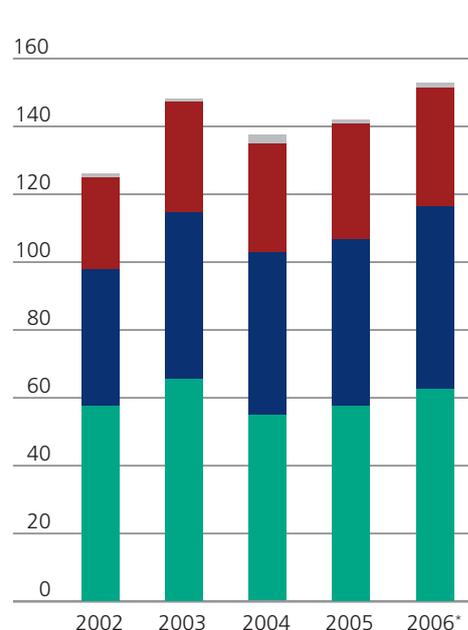
Budget (Mio. EUR)



Budget (%)



Mitarbeiter / Staff (Vollzeitäquivalent)



\* vorläufig / preliminary

\* vorläufig / preliminary

\* vorläufig / preliminary

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

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

In 2003 the Fraunhofer-Gesellschaft and the Friedrich-Schiller-University Jena signed a cooperation contract. It is the basis for an effective cooperation between the employees of Fraunhofer IOF and of the Institute of Applied Physics of the FSU.

## Investments

Funds of 12 Mio € et all are granted by the EU, the State Thuringia and the Fraunhofer-Gesellschaft for the years 2004, 2005 and 2006 for new Electron Beam Lithography Equipment. Based on it the Center for Advanced Micro- and Nano-Optics – CMN-Optics was opened at July 14, 2006.

Employees 2006	IOF	IAP
Scientists	46	25
PhD students	17	26
Technicians	46	14
Students	35	28
Trainees	7	1

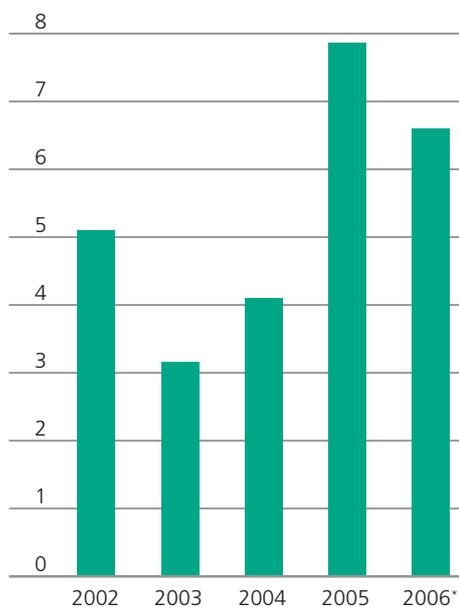
## Expenses 2006

mio €	IOF	IAP
personal expenses	5.9	4.1
matter expenses	4.7	1.0
investments	6.7	1.8

## Laboratories and offices

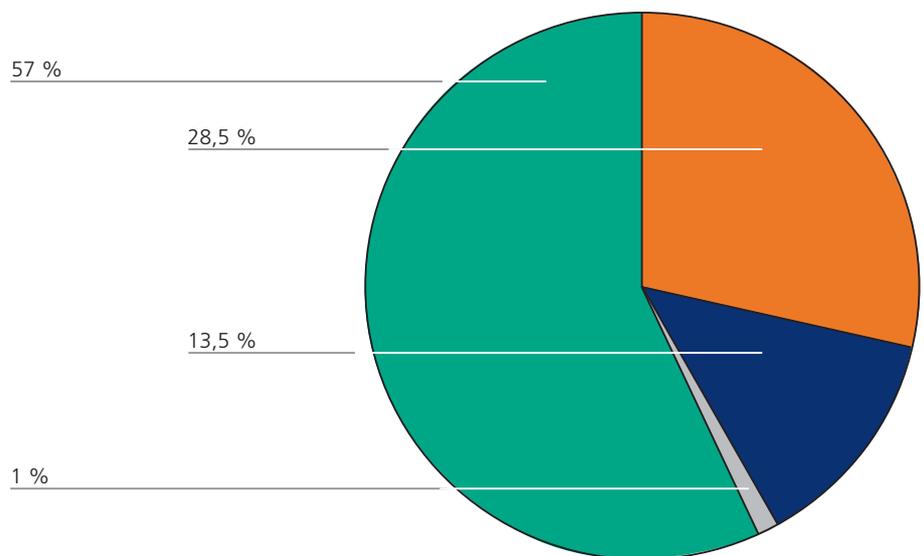
Fraunhofer IOF	5 000 m <sup>2</sup>
IAP	1 200 m <sup>2</sup>

Investitionen / Investments (Mio. EUR)



\* vorläufig / preliminary

Investitionen / Investments 2006



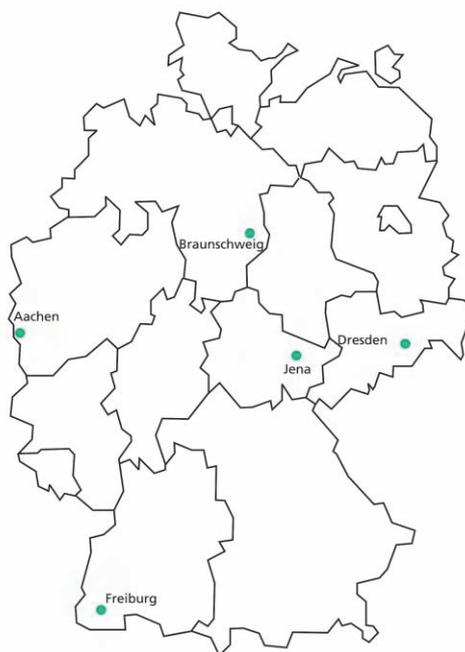
- Elektronenstrahlolithographie / Electron Beam Lithography
- Grundfinanzierung / Federal funding
- Strategische Investitionen / stratetic investments
- Projekte / projects



**Fraunhofer** Verbund  
Oberflächentechnik  
und Photonik

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

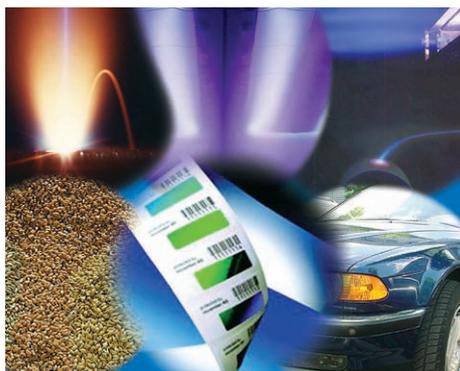
**Koordination / Coordination**  
Udo Klotzbach  
Phone: 03 51 / 25 83-2 52



## 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 Anwendungsbereichen. 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 utilisation 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)



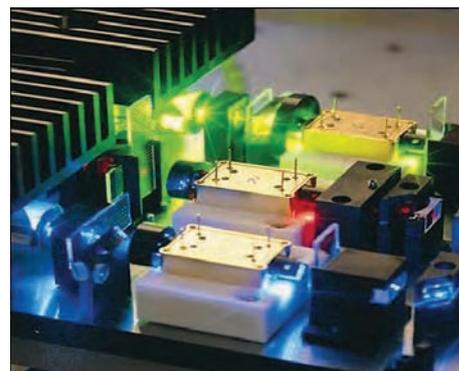
## Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

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, feinmechanische 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 and components for precision mechanics systems and assemblies.

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

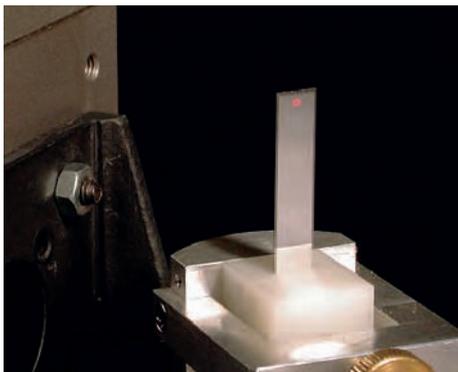
## Competence by Networking

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- und 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



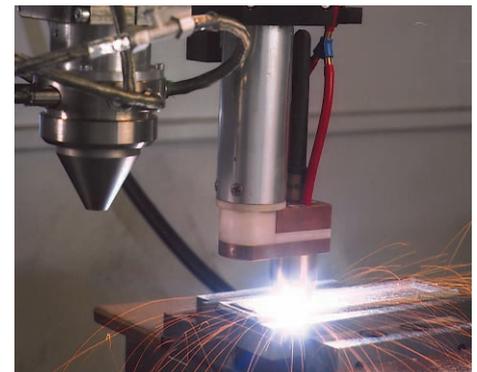
### Fraunhofer-Institut für Schicht und Oberflächentechnik IST

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



### 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

## The 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. 12 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,2 Milliarden €.

Davon fallen mehr als 1 Milliarde € 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.

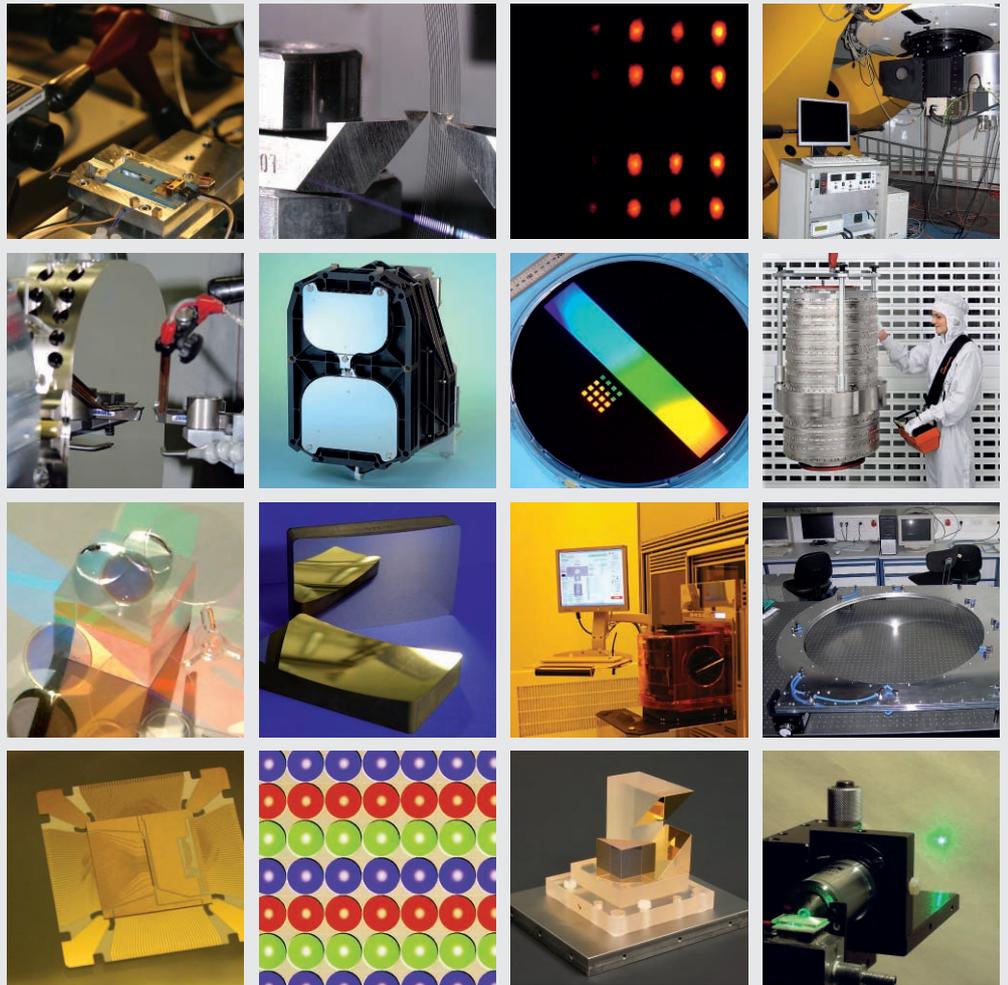
At present, the Fraunhofer-Gesellschaft maintains more than 80 research units, including 56 Fraunhofer Institutes, at 40 different locations in Germany.

The majority of the 12,500 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of € 1.2 billion. Of this sum, more than € 1 billion is generated through contract research. Two thirds of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. Only one third is contributed by the German federal and Länder governments in the form of 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



2 0 0 6



Ramona Eberhardt



Oliver Mauroner

## Status und Perspektiven

Technische Fortschritte in der Mikro- und Nanooptik sind die Basis für zahlreiche neue Produkte in innovativen Branchen. Die optische Systemtechnik ist als Plattform für die Fertigung und Integration miniaturisierter optischer Elemente für den Produktionsstandort Europa von großer Bedeutung. Im BMBF-Projekt PROMOT /1/ wurde der Stand der Technik in der Mikrooptik-Produktion analysiert und daraufhin der Forschungs- und Handlungsbedarf ermittelt. Hierzu wurden Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Verbände befragt sowie öffentliche Diskussionsrunden durchgeführt. Daraus ergeben sich folgende vorrangige Fragestellungen:

- Durch Miniaturisierung und Flexibilisierung steigen die Anforderungen an Präzision, Qualität und Zuverlässigkeit. Dies erfordert eine Vernetzung des Herstellungsprozesses und eine Kooperation von Optik- und Mechanikdesignern, Komponentenherstellern und Montagetechnologen.
- Priorität kommt Fertigungstechnologien für Einzelbauteile und Systeme zu, die bezüglich Stückzahl und Präzision skalierbar sind. Dazu gehören Lithografie-Technologien und Verfahren der Ultrapräzisions- und Elektronenstrahlbearbeitung mit Auflösungen im nm-Bereich ebenso wie Verfahren zur kostengünstigen Komponentenfertigung wie Spritzguss und Präzisionsheißprägen von Polymeren, Gläsern und Keramiken sowie Beschichtungs- und Druckverfahren.
- Variantenreiche Produkte geringer Stückzahl erfordern die effiziente Verknüpfung von Technologien, beispielsweise die Masterherstellung mittels Ultrapräzisionsverfahren (Abb. 1) und die Abformung der Master-Strukturen mittels Prägeverfahren (Abb. 2).

- Die hybride Montage und deren Integration in die Fertigung sind weiter zu entwickeln. Langfristig werden die Montage direkt auf dem Wafer (»im-Nutzen«) und wafer-scale-packaging-Konzepte die bevorzugten Verfahren der Systemintegration sein (Abb. 3).
- Um Kundenwünsche flexibel, schnell und kosteneffizient zu erfüllen, sind neben der Parallelisierung und Standardisierung von Fertigungsprozessen auch online Mess- und Prüfverfahren einzubeziehen. Entwurfswerkzeuge und Simulationsprogramme für Optikbaugruppen und -systeme sind mit der Herstellung und Montage zu koppeln. Das »Material- und technologieadaptierte Design« ermöglicht es, das optische und mechanische Verhalten der Systeme zu modellieren und zu simulieren.

Das Forschungsprojekt PROMOT wurde mit Mitteln des BMBF innerhalb des Rahmenkonzeptes »Forschung für die Produktion von morgen« gefördert (02PB2300) und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA-PFT) betreut. Für die Unterstützung bedanken wir uns bei Herrn Dr. Mikosch, Herrn Scherr (PTKA-PFT) und Herrn Dr. Simon (BMBF).

Der Abschlussbericht ist über das Fraunhofer IOF zu beziehen oder unter [www.iof.fraunhofer.de/promot](http://www.iof.fraunhofer.de/promot) herunterladbar.

### Literatur:

- /1/ Untersuchung des Forschungs- und Handlungsbedarfes für die Produktion von zukünftigen mikrooptischen Bauteilen und Systemen – PROMOT.

## Status and perspectives

Technical advances in micro and nano-optics are the source of numerous new products in innovative sectors. As a platform for production and integration of miniaturized elements, optical system technology is of key importance for Europe's future as a production location. The PROMOT /1/ project has analyzed the state of art in technologies for micro-optics production and identified necessary research topics. Companies, research institutions and professional associations have been consulted and public discussion forums were held. The following priority issues have been identified:

- Miniaturization and flexibility are increasing the requirements for precision, quality and reliability. This calls for a networked manufacturing process and co-operation between optical and mechanical designers, component manufacturers and providers of assembly technology.
- Production technologies for components and systems that are scaleable in terms of volume and precision have high priority. They include lithographic technologies, ultra precision machining and electron beam processing methods with resolutions in the nanometer range as well as cost-effective component production methods such as injection molding and precision hot embossing of polymers, glass, ceramics and coatings.
- A wide variety of low-volume products require efficient linking of technologies, for example master manufacturing using ultra precision machining methods (Fig. 1) and molding of master structures using embossing methods (Fig. 2).

- Hybrid assembly and its integration into the production process require further development. In the long term, assembly directly onto the wafer and wafer-scale packaging concepts will be the preferred methods of system integration (Fig. 3).
- Flexible, quick, cost efficient, parallel and standardized production processes have to be accompanied by online measuring and testing methods to meet customer requirements. Design tools and simulation programs for optical components and systems need to be linked to manufacturing and assembly processes. "Material and technology adapted design" enables the optical and mechanical behavior of systems to be modeled and simulated.

The PROMOT research project has been supported by funds from the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) as part of the framework "Research for Tomorrow's Production" (02PB2300) and the project has been led and coordinated by the project management agency Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA-PFT). We would like to thank Dr. Mikosch, Mr. Scherr (PTKA-PFT) and Dr. Simon (BMBF) for their support.

The final report is available from Fraunhofer IOF and can also be downloaded from [www.iof.fraunhofer.de/promot](http://www.iof.fraunhofer.de/promot).

### References:

- /1/ Analysis of required research in production of future micro-optical components and systems – PROMOT.

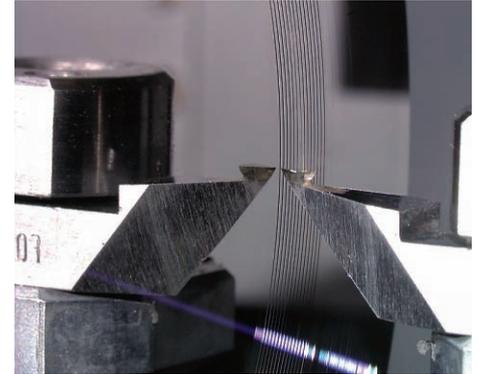


Abb. 1:  
Ultrapräzisionsbearbeitung mit  
Diamantwerkzeug.

Fig. 1:  
Ultra precision diamond turning.

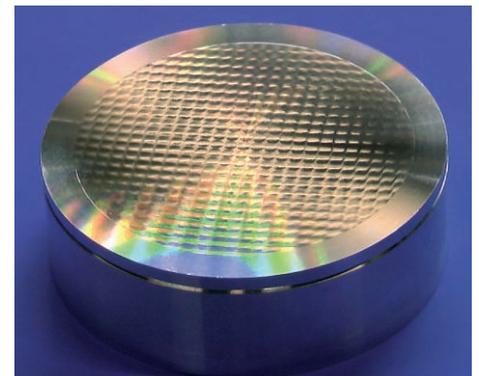


Abb. 2:  
SPDT gefertigtes Prägemaster für Mikrooptik.

Fig. 2:  
SPDT produced master tool for embossing of  
micro-optics.

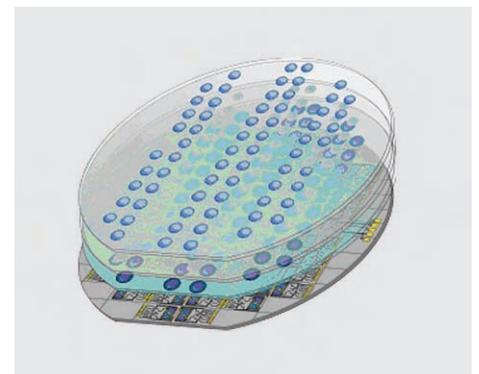


Abb. 3:  
Prinzip des wafer-scale-packaging.

Fig. 3:  
Principle of wafer-scale packaging.

# Scharfer Blick ins Weltall – Ultrapräzise Metallspiegel für astronomische und Weltraumanwendungen



Stefan Risse



Andreas Gebhardt



Ralf Steinkopf



Wieland Stöckl



Steffen Kirschstein <sup>1</sup>



Ralf-Rainer Rohloff <sup>2</sup>

---

Eine ultrapräzise Spiegelbaugruppe im Innern des weltweit größten Teleskops im US-Bundesstaat Arizona wird trotz Temperaturänderung und schneller Bewegungen den klaren Blick zu fernen Galaxien ermöglichen. Hohe mechanische und thermische Anforderungen sind ebenso an Spiegeloptiken zur Erdbeobachtung gestellt. Für eine genaue Abbildung von Objekten aus dem Weltall sind Spiegelsysteme (Teleskope) notwendig, die ein Höchstmaß an Stabilität und Formgenauigkeit bieten und zugleich Belastungen beim Raketenstart und im Dauerbetrieb widerstehen. Diese Eigenschaften werden mit Metallspiegeln aus speziellen Werkstoffkombinationen erreicht.

---

## Vom Spiegelentwurf zum Design

Bereits in der Designphase werden die Qualität und die Stabilität der Spiegelbaugruppe berücksichtigt. Entwurfsvarianten der Spiegel werden mit Finite-Elemente-Methoden simuliert. Damit ist eine Prüfung des Verhaltens der Spiegel unter auftretenden mechanischen und thermischen Lasten sowie auch unter Fertigungsbelastungen möglich (Abb. 1). Häufig besteht die Notwendigkeit eine Leichtgewichtslösung zu entwickeln, um das Massebudget zu entlasten. Hierzu wurde eine Variante entwickelt, welche bei einer Reduzierung von mehr als 50 % der Masse noch Steifigkeitseigenschaften nahe eines vergleichbaren massiven Körpers aufweist. Die Grundlage bildet der Erhalt geschlossener Oberflächen. Die Reduzierung der Masse wird durch Bohrungen erreicht, welche sich orthogonal kreuzen. In den Kreuzungspunkten bilden sich stützende Säulen aus.

Maßgeblich wird die Qualität der Spiegelfläche durch eine konstante Dicke bezogen auf die Leichtgewichtsstruktur erreicht. Bei gekrümmten Spiegeln wird deshalb mit unterschiedlichen Bohrungsmaßen gearbeitet.

---

## Spiegelnde Oberfläche mit nur einem Schnitt

Eine kostengünstige und hervorragend geeignete Methode zur Herstellung von Spiegeln ist die ultrapräzise Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen (Abb. 2). Durch den harten und formstabilen Diamanten können Konturmerkmale mit exakter Ausführung erreicht werden <sup>1/1</sup>. Es entsteht bereits beim ersten Arbeitsschnitt eine spiegelnde optische Oberfläche mit Rauheitswerten RMS (root mean square) unter 20 nm. Hierzu werden Spezialmaschinen, so genannte Ultrapräzisionsdreh- und Fräsmaschinen, eingesetzt. Die Genauigkeit der Bearbeitung basiert auf präzisen mechanischen Achsen, welche öl- oder luftgelagert sind. Durch eine exakte Ausrichtung des Diamantwerkzeugs und Kompensation der Werkzeuggeometrie sind komplexe Oberflächen formgenau bearbeitbar. Die Bearbeitung der Spiegel erfolgt unter definierten Koordinatenbeziehungen zum Bewegungssystem der Maschine. Die Charakterisierung der Spiegelform beruht auf interferometrischen Messverfahren, welche aufgrund ihrer hohen Genauigkeit zur Prüfung optischer Oberflächen prädestiniert sind. Bei einfachen Formelementen wie ebenen oder kugelförmigen Flächen liefert die Messung direkt die Formabweichung zur Referenzoptik, typisch mit einer Qualität kleiner  $\lambda/20$ , d.h. kleiner 30 nm.

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

<sup>2</sup> Max-Planck-Institut für Astronomie

# A sharp view into outer space – Ultra precise metal mirrors for astronomic and space applications

The world's largest optical telescope, the large binocular telescope in Arizona, will offer high visibility to far-flung galaxies. A piston mirror unit in its centre acts as the enabling element, despite changes of temperature and fast movements. Similar to ground based optics, space applications have high mechanical and thermal requirements. In order to image space objects with high accuracy, mirror systems (telescopes) are required which offer a maximum of stability and shape accuracy. Furthermore, they must resist the forces present during rocket launch, and they must work in sustained continuous operation. These characteristics can be achieved using mirrors from special metal alloys.

## The mirror from draft to design

As early as the first design phase, quality and stability of the mirror unit is the focus of all considerations. Finite element methods are used to simulate different designs. In this way, it is possible to examine the behaviour of the mirrors under typically occurring mechanical and thermal loads as well as under manufacturing tensions (Fig. 1). Often it is essential to use a light-weight structure to reduce the mass. A special solution for such a case was developed which exhibits stiffness almost as great as a solid body but with less than 50% of its mass, on a basis of the retention of closed surfaces. Holes parallel to the closed sides, arranged in orthogonal crosses, forge self-supporting vaults. For high precision mirrors it is necessary to keep the space between surface and drill hole approximately constant. Curved mirrors therefore contain drill holes with different cross section dimensions.

## Mirror surfaces in just one cut

An outstanding technique in points of ultra-precision as well as economical production of mirrors is single point diamond turning (Fig. 2). The unique properties of the diamonds are used to obtain optical surfaces with roughness values down to < 20 nm rms (root mean square) and high form accuracy /1/.

The machines used for single point diamond turning have some special features, and the basis of high precision is founded in its accurate mechanical axes, which work with oil or air bearings. After aligning the tool in respect to the machine coordinate system and compensation of the tool geometry, complex surfaces are exactly machinable.

To meet the challenging requirements of optical surfaces, interferometric measurement is an adequate choice for examination. The characterization of spherical shapes or planes is based on comparison between test part and reference optic, typically with a quality of better than  $\lambda/20$ , i.e. smaller 30 nm. If aspherical mirrors are scheduled, the examination is considerably more complicated. Between the interferometer and the aspherical mirror, a Computer Generated Hologram (CGH) is assigned to compensate wave front differences between reference optic and the test part /2/. Such CGHs are basically diffractive gratings which produce a certain wave front on a well-defined point /3/. At the Centre for Advanced Micro and Nano-Optics (CMN-Optics) of the Fraunhofer IOF this CGH can be manufactured with an electron-beam recorder SB350 manufactured by VISTEC. An iterative loop of mirror cutting, inter-ferometric measurement and tool-path-correction is used to produce the mirror within the specified shape.

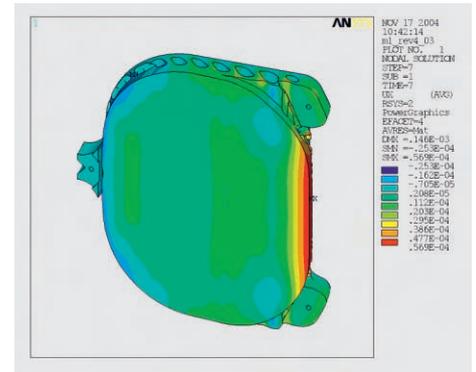


Abb. 1: Simulation eines Leichtgewichtspiegels unter Fliehkraft (Flächenfehler im Qualitätsbereich: 7 nm RMS).

Fig. 1: Simulation of a light weight mirror under centrifugal force (surface error in the quality area 7 nm rms).

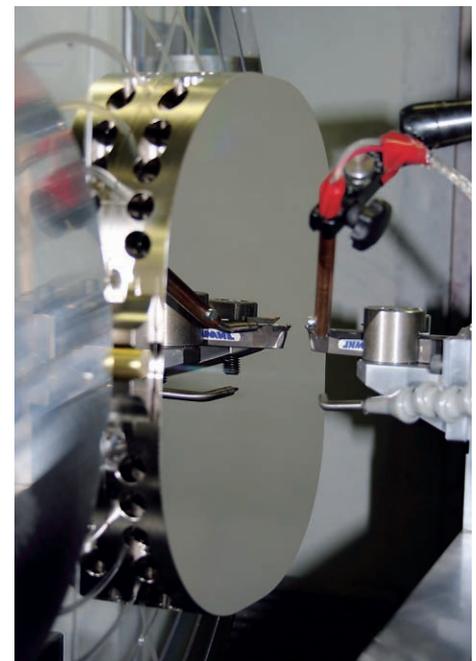


Abb. 2: Diamantbearbeitung einer Asphäre.

Fig. 2: Single Point Diamond Turning of an off-axis aspherical mirror.

Werden Asphären hergestellt, ist die Prüfung der Spiegel wesentlich komplizierter. Aufgrund ihrer Flexibilität und Multifunktionalität sind diffraktive Nullkompensatoren, so genannte computergenerierte Hologramme (CGH), geeignet /2/. Diese Prüfmittel erzeugen mittels Phasen- und Amplitudengitter an einem definierten Ort eine Wellenfront, deren Form der Soll-Oberflächenform der Asphäre angepasst ist /3/. Am Center for Advanced Micro- und Nano-Optics (CMN-Optics) des Fraunhofer IOF können mit einem Elektronenstrahlschreiber SB350 der Firma VISTEC diese CGH hergestellt werden. Durch eine iterative Bearbeitung der Spiegel unter Beachtung der interferometrischen Messung der Wellenfrontabweichung wird kontinuierlich eine Korrektur der Oberfläche erreicht.

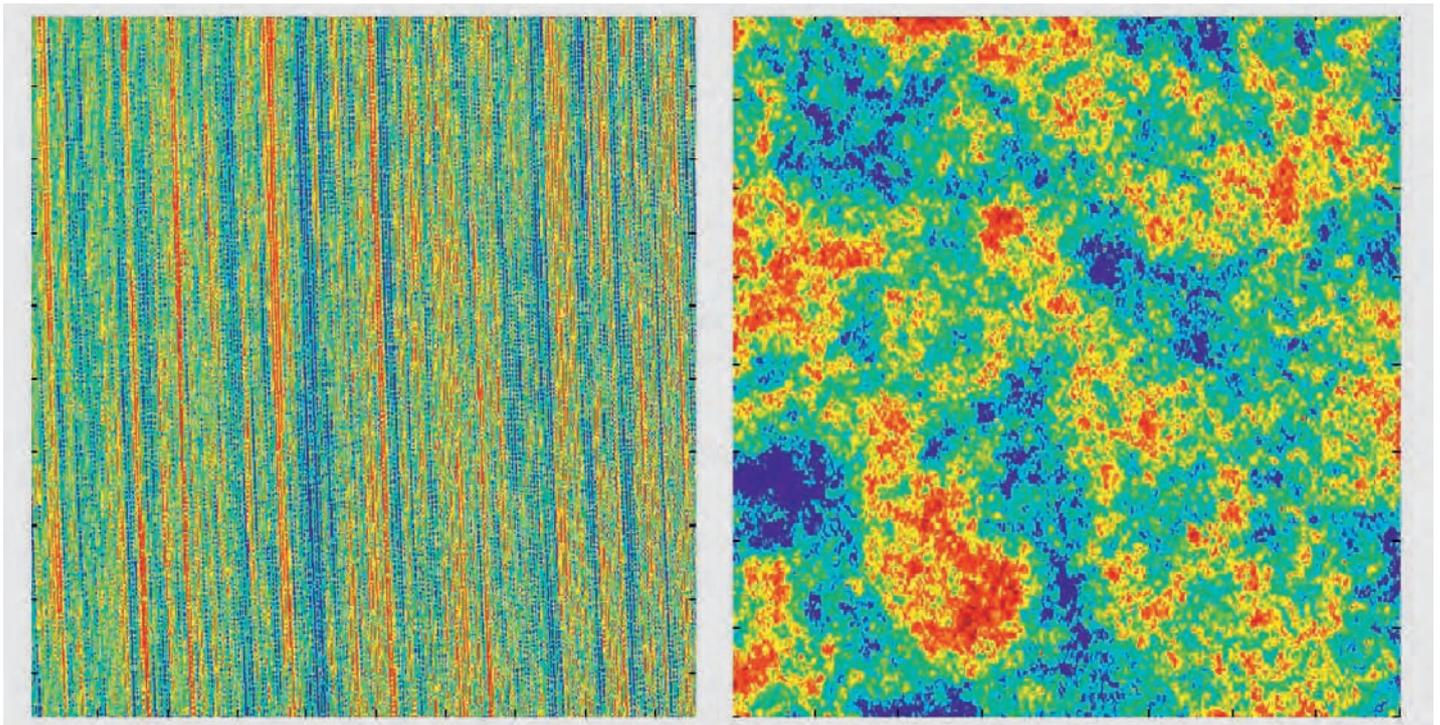
### Finishbearbeitung der Oberfläche für den visuellen Wellenlängenbereich

Die durch den Diamanten während der Bearbeitung hervorgerufene Mikrostruktur (Drehrillen) der Oberfläche wirkt im visuellen Wellenlängenbereich wie ein Beugungsgitter. Durch ein anschließendes Glätten der Oberfläche werden diese periodischen Anteile der Oberflächenrauheit entfernt. Um diese Bearbeitungstechnik einsetzen zu können, müssen geeignete Werkstoffe ausgewählt werden. Vorteilhaft ist hier die Beschichtung eines Aluminium-Grundkörpers mit einer Nickel-Phosphor-Legierung, welche eine amorphe Struktur aufweist und damit klassisch global oder computergestützt lokal

poliert werden kann. Die Mikrorauheit wird dabei unter einen Wert von RMS 1 nm verbessert (Abb. 3). Eine abschließende ionengestützte Formkorrektur ermöglicht Formqualitäten von PV (peak to valley) kleiner 100 nm (Abb. 4). Diese Finishbearbeitung erfolgt wieder unter Nutzung des computergenerierten Hologramms. Eine abschließende Beschichtung basiert auf Schichtsystemen, welche an die jeweiligen Anwendungsanforderungen angepasst werden. So werden Goldbeschichtungen z.B. für IR-Anwendungen und geschützte Silberbeschichtungen für breitbandige Verspiegelungen appliziert. In umfangreichen Tests wurden diese Schichtsysteme für Weltraumanwendungen qualifiziert.

Abb. 3: Mikrorauheit in Abhängigkeit von der Bearbeitung (links Diamantdrehen RMS 5 nm und rechts Polieren RMS 0,7 nm; Messfeld 2,5 x 2,5 mm<sup>2</sup>). © Carl Zeiss Jena GmbH.

Fig. 3: Micro roughness after diamond turning 5 nm rms (left side) and polishing 0,7 nm rms (right side). © Carl Zeiss Jena GmbH.



---

### Surface finishing for visual wavelength

Single point diamond turning always produces an unwanted effect: microstructures, typically turning structures, take effect as a diffraction grating in visual wavelength. These periodic structures must be removed with a smoothing procedure. Favourable is here an aluminium base plate coated with a nickel phosphorus alloy. This alloy is an amorphous material and can be polished globally in the classical way or locally with computer assistance. Surface roughness is thereby improved to better than 1 nm rms (Fig. 3).

Ion beam polishing is the last step in improving the form accuracy. Peak to valley values well beyond 100 nm are state-of-the-art (Fig. 4). Interferometers with CGH are used again for measurements during correction cycles.

To adapt the surface to the respective application special layer systems have to be designed.

Gold coatings are used in IR applications while protected silver coatings have been deployed for wide-band applications. These layer systems were qualified for space applications during extensive tests.

---

### Plane mirror for the Large Binocular Telescope (LBT, [www.mpia-hd.mpg.de](http://www.mpia-hd.mpg.de))

The world's largest optical telescope, the Large Binocular Telescope in Arizona, works with two mirrors of 8.4 m in diameter, similar to enormous field glasses (Fig. 5). The two mirrors realize the luminous intensity of a 12 m - telescope and the resolution of a 23 m - telescope. Responsible for this achievement is also the "PISTON MIRROR" unit, an assembly group from two mirrors with a plane surface of 200 mm x 140 mm (Fig. 6), which combines the two paths of rays in the instrument and adjusts phase shifts.

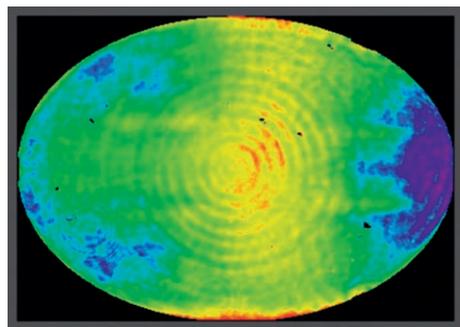


Abb. 4:  
Interferogramm nach Finishbearbeitung  
(PV ~ 30 nm; RMS ~ 5 nm).

Fig. 4:  
Form accuracy after completion  
(PV ~ 30 nm; rms ~ 5 nm).

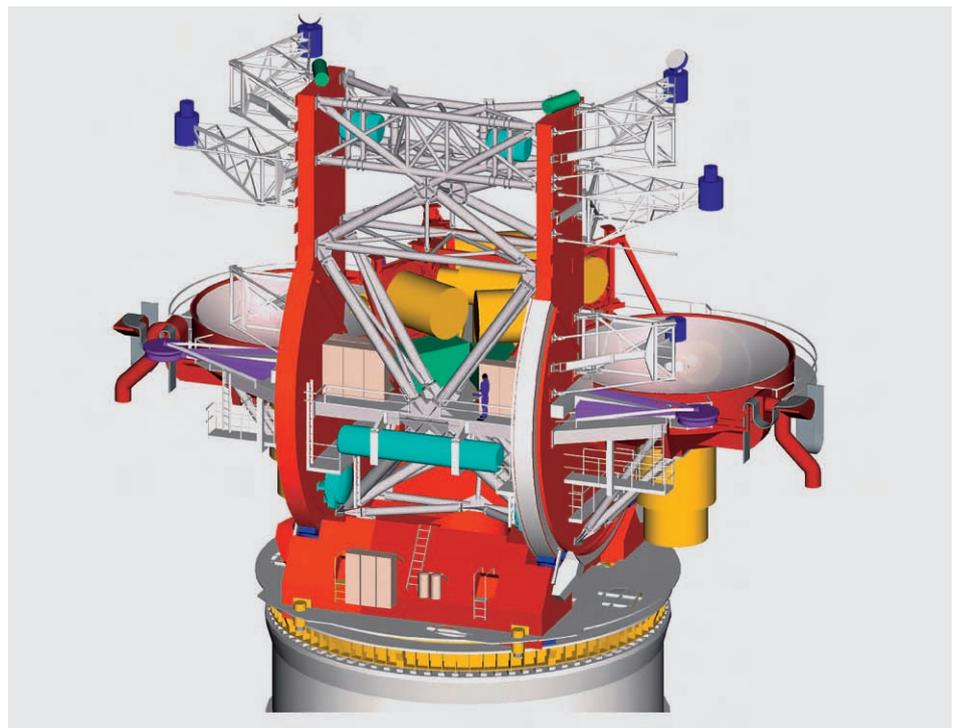


Abb. 5:  
Modell des Large Binocular Telescope.  
© [www.mpia.de/lbt](http://www.mpia.de/lbt).

Fig. 5:  
Model of the Large Binocular Telescope in  
Arizona.  
© [www.mpia.de/lbt](http://www.mpia.de/lbt).

---

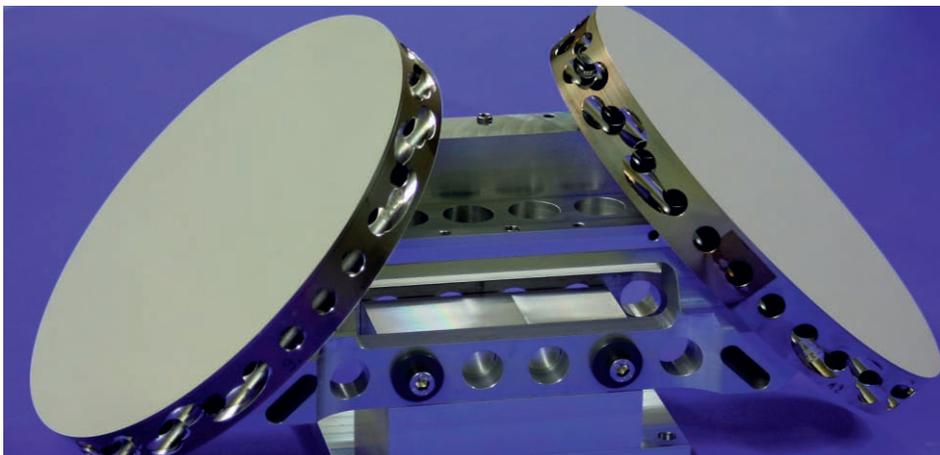
## Planspiegel für das Large Binocular Telescope (LBT, [www. mpia-hd.mpg.de](http://www.mpia-hd.mpg.de))

Das weltweit größte Teleskop, das Large Binocular Telescope, arbeitet mit zwei Spiegeln von 8,4 m Durchmesser, ähnlich eines riesigen Feldstechers (Abb. 5). Die beiden Spiegel realisieren die Lichtstärke eines 12-Meter-Teleskops und die Auflösung eines 23-Meter-Teleskops. Verantwortlich für diese Leistung ist auch der so genannte »PISTON-MIRROR«, eine Baugruppe aus zwei Spiegeln mit einer ovalen optischen Fläche von 200 mm x 140 mm (Abb. 6), welcher die beiden Strahlengänge im Instrument zusammenführt und die Phasenverschiebung der Strahlenbündel ausgleicht.

Die Baugruppe muss schnell und leicht beweglich sein und auch bei Temperaturschwankungen und Beschleunigungen die Form bewahren. Genutzt wurde deshalb eine spezielle Silizium-Aluminium-Legierung als Spiegelgrundkörper. Dieses Material hat eine Ausdehnungsanpassung an die Nickel-Phosphor-Dickschicht.

Abb. 6:  
Spiegelbaugruppe – Piston Mirror.

Fig. 6:  
Piston Mirror unit.



---

## Asphärische Spiegel für ein Erdb Beobachtungs-Teleskop

Ein Satellitensystem mit fünf identischen Erdbbeobachtungssystemen ist momentan in der Entwicklung. Die Basis ist ein Three-Mirror-Anastigmat-Teleskop (TMA) mit zwei asphärischen und einem sphärischen Spiegel. Das Optikdesign wurde von der Firma Jena-Optronik GmbH entwickelt (Abb. 7) und erreicht eine Pixel-Auflösung von 6,5 m x 6,5 m am Erdboden /4/. Möglich wird diese optische Performance durch ultrapräzise Metallspiegel aus Aluminium 6061 und einer Dickschicht aus einer amorphen Nickel-Phosphor-Legierung. In Zusammenarbeit mit der Carl Zeiss Jena GmbH wurden die diamantgedrehten Spiegel mit dem sich anschließenden Polierprozess geglättet und durch eine Ionenstrahlkorrektur in der Form-Qualität optimiert.

Die Montage und Justierung des TMA-Teleskops wurde unter interferometrischer Kontrolle der Wellenfront durchgeführt. In einer optimierten Position der Spiegel erfüllt das TMA-Teleskop mit einer Modulations-Transfer-Funktion (MTF) von 0,6 bei der Nyquist-

frequenz und besser im gesamten optischen Funktionsbereich die Voraussetzungen für brillante Bilder von der Erde. In Abbildung 8 ist ein Flugmodell eines TMA dargestellt.

---

## Zusammenfassung

Am Fraunhofer IOF Jena werden hochgenaue Metallspiegel mit komplexen Oberflächen vom Design bis zum Prototyp entwickelt. Die Aktivitäten umfassen auch die Integration der Spiegel in optische Systeme. Dabei können off-axis Asphären und optische Freiformflächen bis 450 mm x 300 mm realisiert werden. Anwendungen aus den Gebieten Luft- und Raumfahrt sowie Astronomie bilden den Schwerpunkt.

---

## Danksagung

Wir danken den Mitarbeitern der Jena-Optronik GmbH Klaus Michel, Jürgen Schöneich und Wolfgang Engel für die anregenden Diskussionen zu Fragen multispektraler Belichtungssysteme für Satelliten-Missionen sowie Volkmar Giggel, Peter Rucks und Jürgen Heise von der Carl Zeiss Jena GmbH für die fruchtbare Zusammenarbeit bei der Herstellung und Charakterisierung von Metallspiegeln.

## Literatur:

- /1/ v. Hulst, F.; et al; Diamantwerkzeuge für die Fertigung von mikrooptischen Bauelementen; IDR – Industrie Diamanten Rundschau 39 (2005) 1; S. 32-38, ISSN 0935-1469.
- /2/ Tiziani, H.J.; et al; Testing of aspheric surfaces; Proc. of SPIE, Vol. 4440, p.109-119.
- /3/ INFO PHYS TECH Nr.57/2004; Hochgenaue interferometrische Asphärenmessung; VDI Technologiezentrum.
- /4/ Kirschstein, S.; et al; Metal Mirror TMA – Telescopes of the JSS product line: Design and Analysis; Proc. of SPIE Vol. 59621M-1-10.

The assembly group must be easily movable and retain shape even during variations in temperature and acceleration. Therefore, a special aluminium-silicon alloy was used as mirror base. This material has an expansion coefficient close to the nickel phosphorus plate.

### Aspherical mirrors for an earth observation telescope

A satellite system with five identical earth observation systems is currently under development. Its basis is a Three-Mirror-Anastigmat telescope (TMA) with one spherical and two aspherical mirrors. The optic design was developed by Jena-Optronik GmbH (Fig. 7) and reaches a resolution of 6.5 m x 6.5 m at the ground /4/. This optical performance can be achieved by applying ultra precision metal mirrors from aluminium 6061 and a plating from amorphous nickel phosphorus alloy. In co-operation with Carl Zeiss Jena GmbH the single point diamond turned mirrors are smoothed with computer-assisted local spot polishing and improved in contour accuracy by ion beam polishing. The assembly and adjustment of the TMA telescope was accomplished under interferometric control of the wave front. In an optimised position of the mirrors the TMA telescope achieved a modulation transfer function (MTF) of 0.6 at the Nyquist Frequency and better all over the specified range. This forms a good basis for shooting brilliant pictures of the earth. A mounted TMA is shown in Fig.8.

### Summary

At the Fraunhofer IOF Jena ultra precise metal mirrors with complex surfaces from design to completion are being developed. Activities also cover the integration of the mirrors into optical systems. Off axis aspheres and optical free form surfaces up to 450 mm x 300 mm have been realized. Current activities are focused on aerospace and astronomy applications.

### Acknowledgements

We wish to thank the colleagues at Jena Optronik GmbH Klaus Michel, Jürgen Schöneich and Wolfgang Engel for inspiring discussions on questions of multi-spectral systems for satellite missions as well as Volkmar Giggel, Peter Rucks and Jürgen Heise of Carl Zeiss Jena GmbH for successful co-operation in the production and characterisation of metal mirrors.

#### References:

- /1/ v. Hulst, F.; et al; Diamantwerkzeuge für die Fertigung von mikrooptischen Bauelementen; IDR – Industrie Diamanten Rundschau 39 (2005) 1; S. 32-38, ISSN 0935-1469.
- /2/ Tiziani, H.J.; et al; Testing of aspheric surfaces; Proc. of SPIE, Vol. 4440, p.109-119.
- /3/ INFO PHYS TECH Nr.57/2004; Hochgenaue interferometrische Asphärenmessung; VDI Technologiezentrum.
- /4/ Kirschstein, S.; et al; Metal Mirror TMA – Telescopes of the JSS product line: Design and Analysis; Proc. of SPIE Vol. 59621M-1-10.

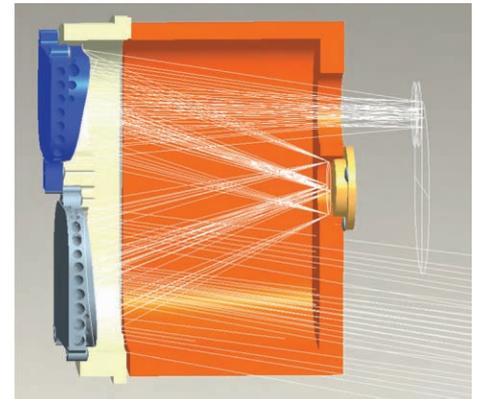


Abb. 7:  
TMA Optikdesign.  
© Jena-Optronik GmbH.

Fig. 7:  
TMA optic design.



Abb. 8:  
Flugmodell eines TMA.

Fig. 8:  
Flight model of TMA.



Thomas Peschel



Andreas Gebhardt



Gerd Harnisch



Gerhard Kalkowski



Manfred Woche <sup>1</sup>

Im Auftrag der Foundation for Research and Technology Hellas (FORTH) wurde am IOF eine Kamera für den nahen Infrarotbereich (900 nm – 2500 nm) entwickelt und aufgebaut. Diese Kamera ist seit Mai 2006 am 1,3 m Spiegelteleskop des Skinakas Observatorium der Universität von Kreta im Einsatz.

Um Bildrauschen möglichst weitgehend zu unterdrücken, muss die gesamte Kameraoptik mit Flüssigstickstoff auf 77 K gekühlt und im Vakuum betrieben werden. Der entsprechende Kryostat erlaubt eine variable Lage entsprechend dem Schwenkbereich des Teleskops. Er wurde am IOF konzipiert und durch eine spezialisierte Firma konstruiert und aufgebaut. Für die eigentliche Kamera wurde ein optisches Design nach Offner /1/ verwendet. Dieses Dreispiegelsystem ermöglicht eine sehr effiziente Streulichtunterdrückung, indem eine gekühlte Blende vor einem der verwendeten Spiegel platziert wird. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Kryostaten mit seinem Durchmesser von ca. 40 cm musste die Optik sehr kom-

pakt ausgeführt werden. Durch eine Modifikation des Optikdesigns und den Einsatz von asphärischen Spiegeln konnte trotzdem eine beugungsbegrenzte Abbildung realisiert werden. Die Parameter der Optik sind:

- Öffnung: f/7,7
- Bildfeld: 20 x 20 mm<sup>2</sup>
- Baulänge der Abbildungsoptik: 220 mm
- OPD <  $\lambda/4$  bei 1  $\mu\text{m}$

Damit die Justage der Optik beim Abkühlen erhalten bleibt, wurde ein athermales Design mit Metallspiegeln gewählt. Die verwendeten Spiegel wurden am IOF durch Einkorn-Diamantbearbeitung in der benötigten Qualität von < 100 nm Oberflächenfehler gefertigt. Die Rauigkeit der Oberfläche ist besser als 5 nm. Zur Selektion interessierender Wellenlängenbereiche wurde ein Filterrad mit 8 Filtern für den Einsatz im Vakuum bei 77 K sowie die zugehörige Ansteuer-elektronik entworfen und aufgebaut. Das optische System wurde auf der kalten Platte des Kryostaten montiert. Vor dem Aufbau wurden die Referenzpunkte der eingesetzten Bauelemente mit einer Genauigkeit von < 10  $\mu\text{m}$  vermessen. Die eigentliche Justage erfolgte dann mittels speziell entworfener und ebenfalls genau vermessener Schablonen, die Referenzpunkte für die Positionen der optischen Elemente tragen.

Nach Abschluss der Optikmontage konnten der Detektorchip /2/ und die zugehörige Ansteuer-elektronik in Betrieb genommen und das Kamerasystem als Ganzes charakterisiert werden.

#### Literatur:

- /1/ Offner, A.: Unit Power Imaging Catoptric Anastigmat, United States Patent 3,748,015, July 24, 1973.
- /2/ 1 k x 1 k Hawaii chip, Rockwell Science Center, <http://www.rsc.rockwell.com/imaging/hawaii1rg.html>.



Abb. 1: Kamera in Beobachtungsposition am Teleskop.

Fig. 1: Camera in operational position on the telescope.

<sup>1</sup> Astrophysikalisches Institut Potsdam

# Near infrared camera for the Skinakas-Observatory

Under a contract with the Foundation for Research and Technology Hellas (FORTH) a camera for the near infrared spectral region (900 nm – 2500 nm) was developed and built by IOF. Since May 2006 the camera has been working at the 1.3 m telescope of the University of Crete on the Skinakas summit.

To minimize image noise as far as possible the whole camera optical system is set up in vacuum and cooled with liquid nitrogen. The corresponding cryostat allows for a camera operation within the typical range of pointing angles used for observations. The cryostat concept was developed at IOF while the actual design and construction was undertaken by a specialized company.

The camera enables a re-imaging of the telescope image onto the detector using an optical design according to Offner /2/. With this three-mirror design a very effective suppression of stray light may be obtained by placing a cold stop in front of one of the

mirrors. Because of space constraints inside the cryostat with its diameter of 400 mm the optical system had to be made very compact. However, using an aspherical mirror, diffraction-limited performance could be reached even for this compact design. Characteristic parameters of the optical system are:

- Aperture: f/7.7
- Image size: 20 x 20 mm<sup>2</sup>
- Length of the imaging system: 220 mm
- OPD <  $\lambda/4$  at 1  $\mu\text{m}$

To preserve the adjustment of the optics during cool-down, an athermal design with metal mirrors was chosen. These mirrors were fabricated at Fraunhofer IOF by ultra-precision diamond turning. The surfaces obtain a precision of form better than 100 nm and a surface roughness better than 5 nm.

To select interesting ranges of wavelength a filter wheel with 8 filters as well as the corresponding driver electronics and software were developed and built.

The whole optical setup was mounted on the cold plate of the cryostat. Prior to integration the positions of the reference points of all optical elements were measured with a precision of < 10  $\mu\text{m}$ . The adjustment of the optical setup relied on gage plates with another set of reference points which were trimmed to a precision of 10  $\mu\text{m}$  according to the measured dimensions of the optical elements.

After integration and adjustment of the optical system the detector chip /2/ and the corresponding driver electronics were mounted. Finally the camera system was characterized and calibrated.

#### References:

- /1/ Offner, A.: Unit Power Imaging Catoptric Anastigmat, United States Patent 3,748,015, July 24, 1973.
- /2/ 1 k x 1 k Hawaii chip, Rockwell Science Center, <http://www.rsc.rockwell.com/imaging/hawaii1rg.html>.

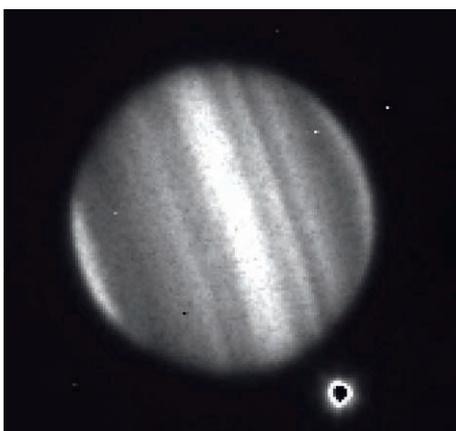


Abb. 2:  
Jupiter bei 1644 nm (Fell). Eines der ersten mit der Kamera aufgenommenen Bilder.

Fig. 2:  
Jupiter at 1644 nm (Fell). One of the first pictures taken with the camera.

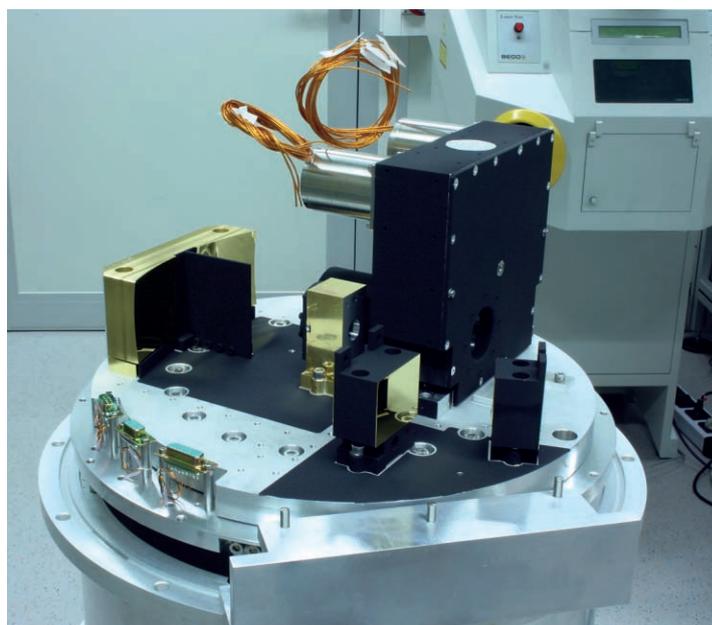


Abb. 3:  
Aufbau der Optik.

Fig. 3:  
View of the optical setup.



Gerd Harnisch



Wieland Stöckl



Simone Fabian



Sandra Müller



Erik Beckert

Die geplante ESA-Weltraummission DARWIN soll im Jahr 2014 erdähnliche extrasolare Planeten basierend auf der Methode der Nulling-Interferometrie detektieren /1, 2/. Dazu wird, auf mehrere Satelliten und Teleskope verteilt, ein Interferometer-Cluster aufgebaut, welches durch konstruktive und destruktive Interferenz das Licht der zu suchenden Planeten von dem ihrer eigentlich dominanten Zentralgestirne separiert. Für dieses Experiment werden u. a. zwei präzise achromatische Phasenschieber benötigt, die am Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg entworfen und durch das Fraunhofer IOF prototypisch realisiert wurden. Aufgrund der cryogenen Umgebungstemperaturen wurde für die Phasenschieber ein weitgehend athermales Design mit ZERODUR™ als Basismaterial gewählt. Insgesamt drei hochpräzise gefertigte Prismen mit Spiegelflächen aus Gold sind in einer Phasenschieber-Baugruppe (Abb. 1) derart zueinander angeordnet, dass bei einer Wellenfrontverzerrung von kleiner  $\lambda/20$  der Vektor der elektrischen Feldstärke des einfallenden Strahls um  $180^\circ$  im Raum gedreht wird. Dies erfordert Ebenheiten der einzelnen Spiegelflächen im Bereich 12 nm rms und eine Genauigkeit der Winkelausrichtung zueinander von kleiner  $10''$ . Zur Eliminierung des Einflusses von Zwischenschichten, z. B. Klebstoff, bei Montage und Einsatz wurden die einzelnen Prismen mit dem Grundkörper ausschließlich und unter Einbehaltung der Justiertoleranzen durch Ansprenge gefügt.

Abb. 1:  
Aufbau einer einzelnen Phasenschieber-Baugruppe.

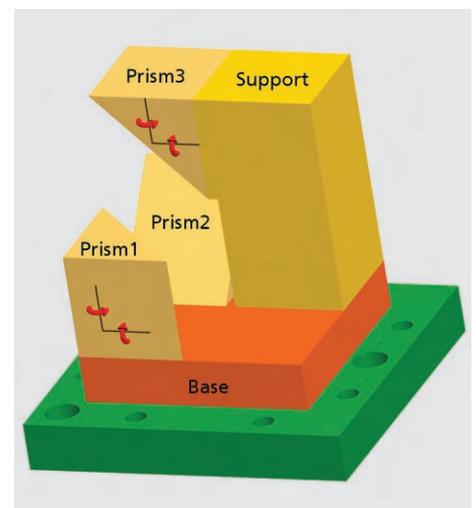
Fig. 1:  
Setup of one individual Phaseshifter assembly.

Parallel zum Entwurf geeigneter Beschichtungs- und Montagevorrichtungen wurden im Rahmen des Projektes geeignete Rohteile qualifiziert. Mittels Beobachtung durch ein Autokorrelationsfernrohr und unter Nutzung hochpräziser Stellelemente erfolgte während der Montage die Winkelausrichtung einzelner Prismenflächen zueinander mit einer Auflösung im Sekundenbereich. Die eingestellte Relativlage der Prismen zueinander wurde durch das Ansprenge minimal im Bereich weniger Sekunden verändert, sodass die Spezifikation der Ausrichtgenauigkeit von  $10''$  für alle Einzelprismen erreicht wurde. Die interferometrische Vermessung zweier montierter Phasenschieber (Abb. 2) zeigte eine Gesamt-Wellenfrontverzerrung von 36 nm rms bis 44 nm rms (Abb. 3). Ebenso wurde die Cryo-Tauglichkeit der angesprengten Phasenschieber in einem Prinzipversuch nachgewiesen.

Gegenwärtig werden die Phasenschieber im experimentellen Umfeld vom MPI Heidelberg erprobt.

#### Literatur:

- /1/ Friedlund, C.: DARWIN – The Infrared Space Interferometry Mission. In: ESA Bulletin, Vol 103 (2000), pp. 20-25.
- /2/ Landgraf, M. et al.: DARWIN – Peering Through the Interplanetary Dust Cloud. In: ESA Bulletin, Vol. 105 (2001), pp. 60-64.



DARWIN is an ESA planned space mission that aims at the detection of extrasolar planets by nulling interferometry. Distributed over several spacecrafts and telescopes, an interferometer cluster creates destructive interference for the light of extrasolar stars and, by constructive interference, enables for the detection of nearby planets. Precise achromatic phaseshifting is mandatory for this setup and one possible approach was investigated at the Max-Planck Institute for Astronomy, Heidelberg. Fraunhofer IOF assembled and characterized two prototype devices according to their specifications.

Due to the cryogenic environment temperatures for the Phaseshifters an athermal design made of ZERODUR™ was chosen. Three high precisely manufactured prisms had to be provided with a gold surface mirror before aligning them with respect to each other (Fig. 1) in a way that the overall wavefront distortion of the beam going through the three mirror setup was less than  $\lambda/20$  while its electric field vector was twisted around in free space by  $180^\circ$ . This required a flatness of the individual mirror surfaces less than 12 nm rms and an angular alignment accuracy within the assembly of better than  $10''$ . To eliminate the influence of any intermediate joining media, e.g. adhesives, during assembly and usage, molecular bonding of the prisms to the base structure was the preferred joining technology while maintaining the achieved alignment tolerances.

For the assembly of the Phaseshifters different coating and handling tools were developed and suitable raw parts were characterized. During assembly with the help of an autocollimation telescope and high precise actuators the angular alignment of the individual prisms was manipulated with a resolution in the seconds range. The aligned position of the prisms remained smaller than  $10''$  during molecular bonding, thus fulfilling the specifications. Interferometer measurements of assembled Phaseshifters (Fig. 2) resulted in overall wavefront distortion values of 36 nm rms to 44 nm rms (Fig. 3). The cryo-suitability of the molecular bonded prism joints was also checked in a proof of principle. Currently, the Phaseshifters are being evaluated in an experimental setup at Max-Planck Institute facilities.

#### References:

- /1/ Friedlund, C.: DARWIN – The Infrared Space Interferometry Mission. In: ESA Bulletin, Vol 103 (2000), pp. 20-25.
- /2/ Landgraf, M. et al.: DARWIN – Peering Through the Interplanetary Dust Cloud. In: ESA Bulletin, Vol. 105 (2001), pp. 60-64.

Abb. 2:  
Gesamtansicht der montierten Baugruppe.

Fig. 2:  
View of an assembled Phaseshifter.

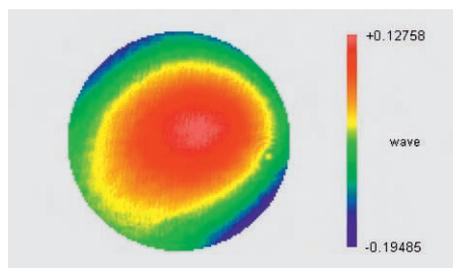
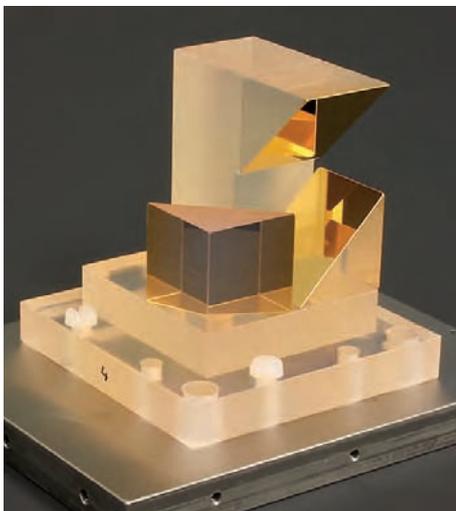


Abb. 3:  
Wellenfrontverzerrung der Gesamt-Baugruppe im Prüfbereich.

Fig. 3:  
Wavefront Distortion (control area) of one Phaseshifter.



Claudia Bruchmann



Hans-Ulrich Abbe



Ramona Eberhardt



Erik Beckert

Die Quanten-Informationsverarbeitung vereinigt die Theorie der Quantenmechanik mit der Praxis der Informationstechnologie, indem Quantensysteme wie z. B. Ionen so beeinflusst werden, dass diese Informationen speichern oder verarbeiten können. Eine Ionenfalle sammelt dazu Ionen in einem elektromagnetischen Feld ein und ermöglicht deren Manipulation mittels Laserimpulsen. Ein Netzwerk solcher Ionenfallen könnte die Basis einer Rechenmaschine der Zukunft bilden. Diese wäre in der Lage, eine Vielzahl von Rechenoperationen simultan durchzuführen und dadurch herkömmlichen Computern weit überlegen /1/. Nach Vorgaben der Arbeitsgruppe »Quantenoptik und Spektroskopie« des Instituts für Experimentalphysik der Universität Innsbruck wurden mehrere Prototypen von Ionenfallen in verschiedenen Layouts realisiert. Die Fallen bestehen aus Multi-Elektrodenstrukturen, die auf jeweils zwei Trägersubstraten appliziert wurden und mit Mikrometer-Präzision horizontal zueinander ausgerichtet sind. Ein Abstandshalter

garantiert den korrekten vertikalen Abstand der Elektroden, während ein zusätzliches Substrat die Kontaktierung der zahlreichen Elektroden ermöglicht und eine mechanisch stabile Basis für die Ionenfallen bildet.

Als Material für die einzelnen Substrate kam eine maschinell bearbeitbare Aluminiumnitrid-Keramik zum Einsatz, welche gleichzeitig die anfallende Verlustleistung, resultierend aus der hochfrequenten Ansteuerung der Ionenfallen, optimal abführen kann. Die Substrate wurden in den geforderten Dicken von 635  $\mu\text{m}$  bzw. 254  $\mu\text{m}$  mittels Schleifen und Polieren vorbereitet. In einem Dünnschichtprozess wurden anschließend die gewünschten Elektrodenstrukturen aufgebracht. Um Freiraum für die im Vakuum zu manipulierenden Ionen zu schaffen, erfolgte die mechanische Strukturierung hochgenauer, miniaturisierter Kavitäten zwischen den Elektroden auf einer Präzisionsfräsmaschine (Abb. 1).

Die einzelnen Substrate wurden mittels Pick&Place aufeinander gestapelt und fixiert (Klebertechnologie). Der Pick&Place-Prozess erfolgte mikroskopunterstützt, so dass durch Überlagerung und Justierung der Bilder der Elektrodenstrukturen diese horizontal mit Mikrometergenauigkeit zueinander ausgerichtet werden konnten.

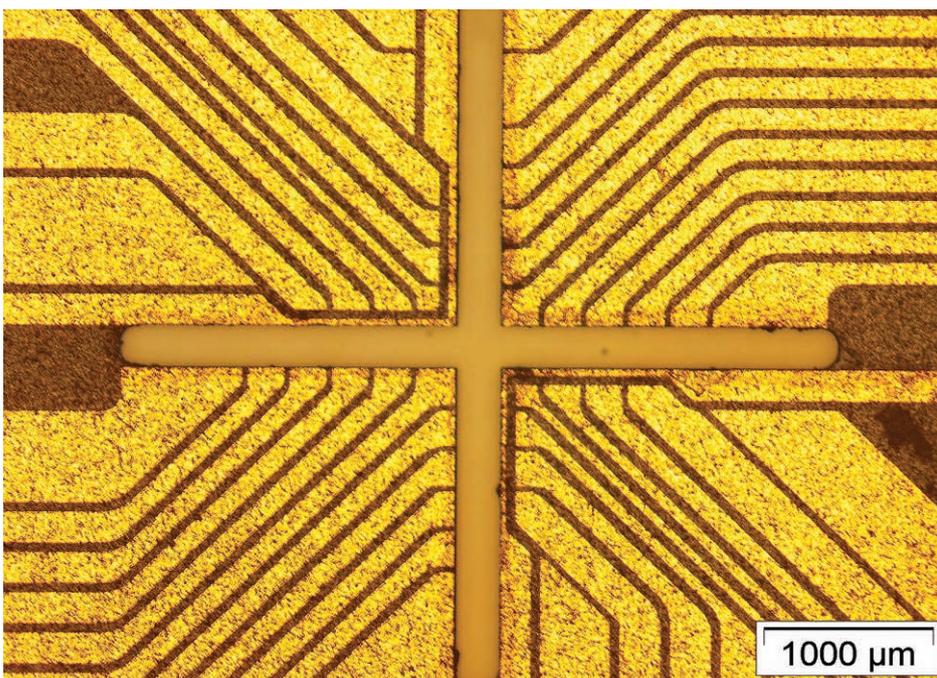
Erste Ergebnisse zeigen die Eignung der prototypisch realisierten Ionenfallen (Abb. 2) für experimentelle Grundlagenuntersuchungen und lassen die Übertragbarkeit der hochpräzisen Justiertechnologie auf alternative Materialsysteme wie beispielsweise Silizium erwarten.

#### Literatur:

/1/ Blatt, R.: Ionen in Reih und Glied.  
In: Physik Journal 4 (2005), Nr. 11, pp. 37.

Abb. 1:  
Mikrofräste Kavität mit Elektrodenstruktur.

Fig. 1:  
Micromilled cavity with electrode structures.



Quantum information processing combines the theory of quantum mechanics and the practice of information technology by manipulating quantum systems such as ions in a way that they represent data to be stored and processed. In an ion-trap ions are captured in an electromagnetic field and can thus be manipulated, e.g. by laser beams. A network of ion-traps could be the basis of a computer of the future, which could simultaneously process a multitude of operations, making it significantly faster than conventional processor architecture [1]. According to the demands of the "Quantum Optics and Spectroscopy" group, Faculty of Experimental Physics at University of Innsbruck, Austria, several ion-traps with different layouts were manufactured. The main features of these traps were multi-electrode structures on carrier substrates that had to be horizontally aligned with

respect to each other and with micron accuracy. A spacer realized an exact vertical distance between the electrodes, while a base substrate provided mechanical stability and pads to electrically connect the various electrodes. The individual substrates were manufactured from a machinable alumina-nitride ceramic that allowed for proper handling of the dissipated power created by the high-frequency control of the ion-traps. The substrates were grinded and polished down to the required thicknesses of 635  $\mu\text{m}$  and 254  $\mu\text{m}$ . The second step was electrode structuring by thinfilm processing. Following this, precise, miniaturized cavities (Fig. 1) were milled into the substrates and between the electrodes on a precision milling machine to create free space for the ions that have to be manipulated in vacuum. Finally the individual substrates were stacked onto each other by pick&place and joined by a vacuum compatible

adhesive. The microscopic view and overlay of the electrode images allowed for an alignment of the electrodes with micron accuracy. Initial experimental results proved the manufactured ion-traps (Fig. 2) to be suitable for manipulating ions in the expected manner. A future option is to use the high precise alignment strategy on substrates that are manufactured from an alternative material system, e.g. silicon.

#### References:

- [1] Blatt, R.: Ionen in Reih und Glied. In: Physik Journal 4 (2005), Nr. 11, pp. 37.

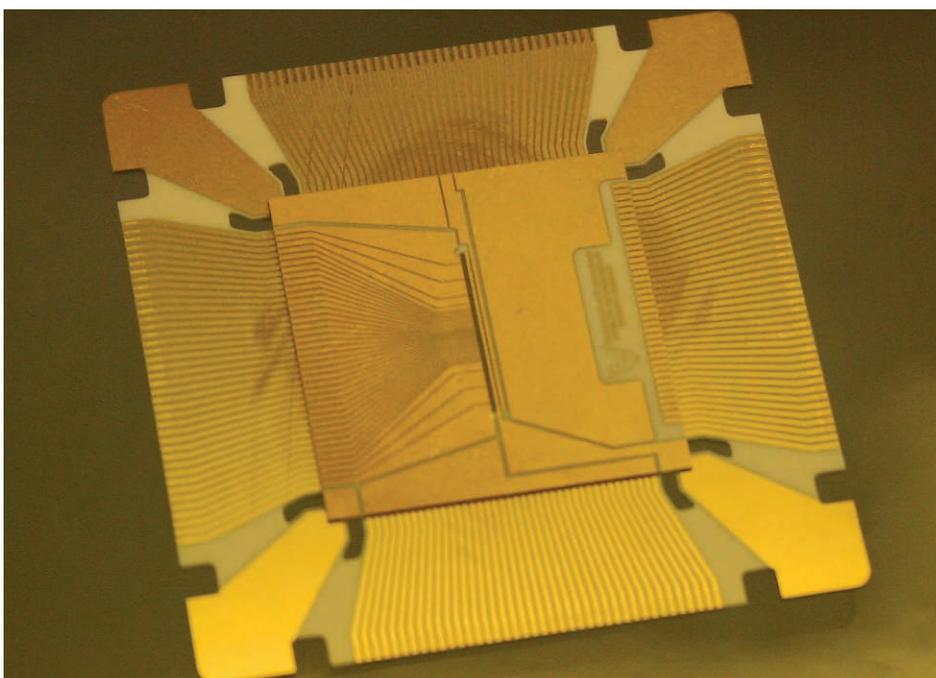


Abb. 2: Ionenfalle mit linearem Layout.

Fig. 2: Ion trap with linear layout.

# Lithographie der nächsten Generation für die Mikrooptik



Uwe D. Zeitner



E.-Bernhard Kley<sup>1</sup>

Die Entwicklung von Lithographieanlagen wird hauptsächlich durch die Road-Map der Mikroelektronik vorangetrieben. In /1/ ist ein umfassender Überblick über die Auswirkungen dieser Entwicklung auf die Mikrooptik-Fabrikation zu finden. Die dort beschriebene Analyse zeigt, dass die Anforderungen der Mikroelektronik an die Lithographie nicht immer zu denen aus der Mikrooptik entstehenden passen. Um die modernsten lithographischen Technologien auch für optische Anwendungen nutzbar zu machen, sind demzufolge speziell angepasste Lithographieanlagen erforderlich. Das IOF hat sich der Weiterentwicklung der lithographischen Technologie für die Optik zusammen mit den Herstellern solcher Anlagen verschrieben. Worin bestehen nun die speziellen Anforderungen der Optik an die Lithographie?

Zunächst sind die in der Optik auftretenden lateralen Strukturgeometrien in den meisten Fällen nicht an die kartesische Orientierung der Strukturen aus der Mikroelektronik angepasst und die Oberflächenprofile sind oft nicht nur binär, sondern haben eher einen kontinuierlichen Verlauf. Beispiele mikrostrukturierter optischer Elemente sind u.a. binäre oder geblazte Gitter, Mikrolinsenarrays, computergenerierte Hologramme und Phasenplatten /2/. Die daraus resultierende Flexibilität hinsichtlich lateraler Kontur und Profilform stellt eine große Herausforderung für die Herstellungstechnologie dar. Hinzu kommen hohe Anforderungen an die laterale Positioniergenauigkeit der Mikrostrukturen, die sich von denen der Mikroelektronik unterscheiden. Auch in Fällen lokaler Strukturgrößen von wenigen Mikrometern können die Gesamtabmaße der Elemente in der Optik 100 mm oder darüber betragen.

Während in der Mikroelektronik Skalierungsfehler nur für aufeinander folgende Herstellungsschritte relevant sind, nicht jedoch die elektrische Funktion beeinflussen, wird in der Optik die erreichbare Wellenfrontgenauigkeit durch solche Fehler signifikant beeinflusst. Diese wird auch durch die absolute Position der Strukturen auf gegenüberliegenden Seiten eines Elements bestimmt. In der Optik folgt daraus eine globalere Anforderung an die Positioniergenauigkeit.

Das Streben nach höchster Positioniergenauigkeit wird im Falle mehrstufiger optischer Oberflächenprofile besonders wichtig. Für deren Herstellung wird häufig die so genannte Binäre-Optik-Technologie eingesetzt /3/. Diese erfordert die Überlagerung verschiedener lithographischer Belichtungen. Um dabei eine optimale Funktion zu realisieren, muss deren Überdeckung deutlich genauer als  $1/10$  der lokalen Strukturperiode sein. Für Perioden in der Größenordnung von wenigen Mikrometern erreicht man das nur mit Überdeckungsfehlern deutlich unter 100 nm.

Für die Realisierung von Elementen mit geringen Wellenfrontfehlern ist weiterhin die Nutzung von Substraten erforderlich, die keine Deformationen oder Verbiegungen unter Einsatzbedingungen zeigen. Dies kann durch ausreichende Dicke der Substrate gewährleistet werden. Auch für diese Anforderung sind Modifikationen der Lithographieanlagen erforderlich, damit solche für die Mikroelektronik ungewöhnlichen Substrate bearbeitet werden können.

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

The development of lithography tools is mainly driven by the road-map of micro electronics. A comprehensive overview about the consequences of this situation on micro-optics fabrication is given in /1/. From the discussion given there it is apparent that the micro-electronics requirements on the lithography tools do not always perfectly fit to the ones arising from micro-optics. Thus, in order to use the cutting edge lithographic technologies for optical applications specially adapted tools are required. The IOF has committed itself to push the development of such tools together with appropriate lithography system developers. But what are the special demands of optics on lithography or on the lithography tool?

First of all the lateral structure geometries in optics are in most cases not well adapted to the Cartesian-oriented structures of micro-electronics and the height profiles are often not only binary but more or less continuous. Examples of micro-structured optical elements are binary or blazed gratings, microlens arrays, computer generated holograms and phase plates etc. /2/. As a consequence the fabrication requires a challenging patterning flexibility with respect to lateral contour and profile shape which, at the same time, is accompanied by tight requirements on positioning accuracy slightly different from the ones in micro-electronics.

This results from the size a single element may have in optics. Even in cases in which the local feature size has dimensions of micrometers, overall extensions of the element in the range of 100 mm or above are common. While in micro-electronics a scaling error is only relevant for subsequent fabrication steps but does not influence the electrical function in optics such an error may have serious influence on the wave front accuracy of the optical function. The wave front accuracy is determined by the absolute position of structures located on different sides of the element and thus, in optics there are applications which have a more global demand on the positioning accuracy.

The quest for highest positioning accuracy becomes of particular importance for non-binary optical structures which are the majority of cases. For the fabrication of such structures often the so called binary optics technology is used /3/. This technique requires the overlay

of different lithography layers. In order to maintain optimal performance the overlay accuracy has to be much less than 1/10 of the local grating period. For local periods in the range of a few micrometers the resulting overlay accuracy should thus be considerably below 100 nm. An extreme effort is required to achieve this value over the whole area covered by the element.

In order to realize elements with low wave-front error it is furthermore essential that the substrates do not show undesired bowing within the used area during their application. This can be managed only by using substrates having a substantial larger thickness compared to the ones used in micro electronics. To make them fit into the lithography machine special adaptations have to be made.

Abb 1:  
50 keV-Elektronensäule (links) und Beladestation (rechts) der SB350 OS.

Fig. 1:  
50 keV electron column (left) and loading area (right) of the SB350 OS.



Nicht zuletzt sind optische Oberflächen in der Regel nicht planar, und die Integration von Mikrostrukturen auf gekrümmten Oberflächen ist von großem Interesse. Ein sehr wichtiger Punkt ist aber, dass die Kombination verschiedener optischer Funktionen in einer Oberfläche die Anzahl der erforderlichen Elemente in einem optischen System und damit dessen Größe, Justageaufwand und Preis verringert. Ein bekanntes Beispiel für eine Struktur, die Nutzen aus einer derartigen Integration ziehen würde, ist eine refraktiv/ diffraktive Hybridlinse für eine farb- und aberrationskorrigierte Optik. Ein Verfahren zum Herstellen von Mikrostrukturen auf nicht-planaren Oberflächen mit einem speziell entwickelten Laserlithographiesystem wurde bereits in unserem Jahresbericht 2004 vorgestellt /4/.

Die vorstehende Diskussion zeigt, dass die standardmäßige lithographische Herstellung von Mikrostrukturen auf dünnen planaren Substraten nicht in allen Fällen ideal für die Herstellung optischer Elemente ist. Das führt zu einer technologiebezogenen Einschränkung der Nutzung mikrooptischer Elemente. Um diese Einschränkungen zumindest teilweise zu überwinden, wurde das Elektronenstrahl-Lithographiesystem Vistec SB350 OS von der Vistec Electron Beam GmbH in Jena entwickelt, das speziell an die Anforderungen optischer Anwendungen angepasst wurde. Dabei stehen die Buchstaben OS im Systemnamen für »Optics Special«. Dieses Elektronenstrahlssystem wurde 2006 in einer komplett neuen Reinraumanlage im IOF installiert. Dort ist auch die benötigte technologische Grundausstattung für die Arbeit mit Elektronenstrahl-Lacken und das Ionenstrahlätzen vorhanden.

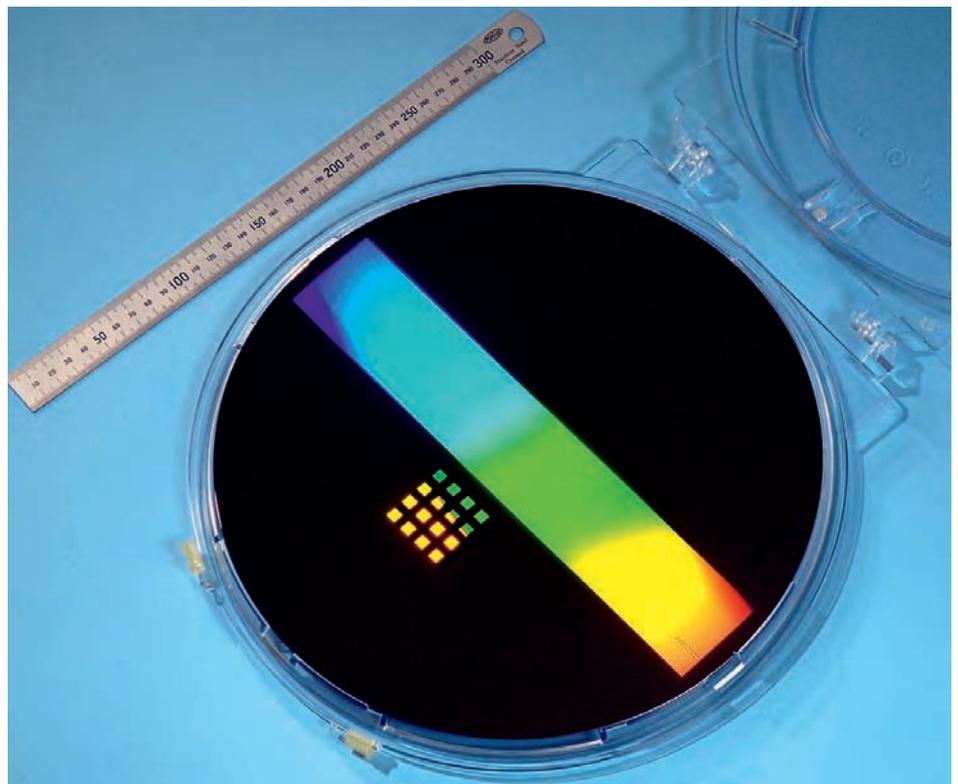


Abb. 2:  
Großes binäres Gitter (280 mm x 50 mm,  
1  $\mu\text{m}$  Periode) auf einem 12"-Siliziumwafer.

Fig. 2:  
Large binary grating (280 mm x 50 mm,  
1  $\mu\text{m}$  period) on a 12" silicon wafer.

Last but not least, optical surfaces are usually not planar and the integration of microstructures on curved surfaces is of great interest. Most importantly the combination of different optical functions into one surface will reduce the number of elements in an optical system and therefore its size, adjustment effort, and price. A prominent example of a structure which would benefit from such integration is a refractive/diffractive hybrid lens for color- and aberration corrected optics. A method to realize micro-structures on non-planar surfaces by a specially developed laser-lithography system has been previously reported in our 2004 Annual Report /4/.

restriction of the use of micro-optical elements. In order to overcome these restrictions at least partially the electron beam lithography system Vistec SB350 OS (Vistec Electron Beam GmbH, Jena) has been developed which is specially adapted to requirements of optical applications. The letters OS stand for "optics special". This e-beam writer has been installed in 2006 in a complete new clean room facility at the IOF. There also the required accompanying technological basis for e-beam resist treatment and ion-beam etching is available. The whole technology chain is capable to handle substrate sizes up to 310 mm extension and 15 mm thickness.

The above discussion shows that the standard lithographic micro-structure generation on thin planar substrates is not in all cases ideally adapted to the fabrication of optical elements. The consequence is a technology related

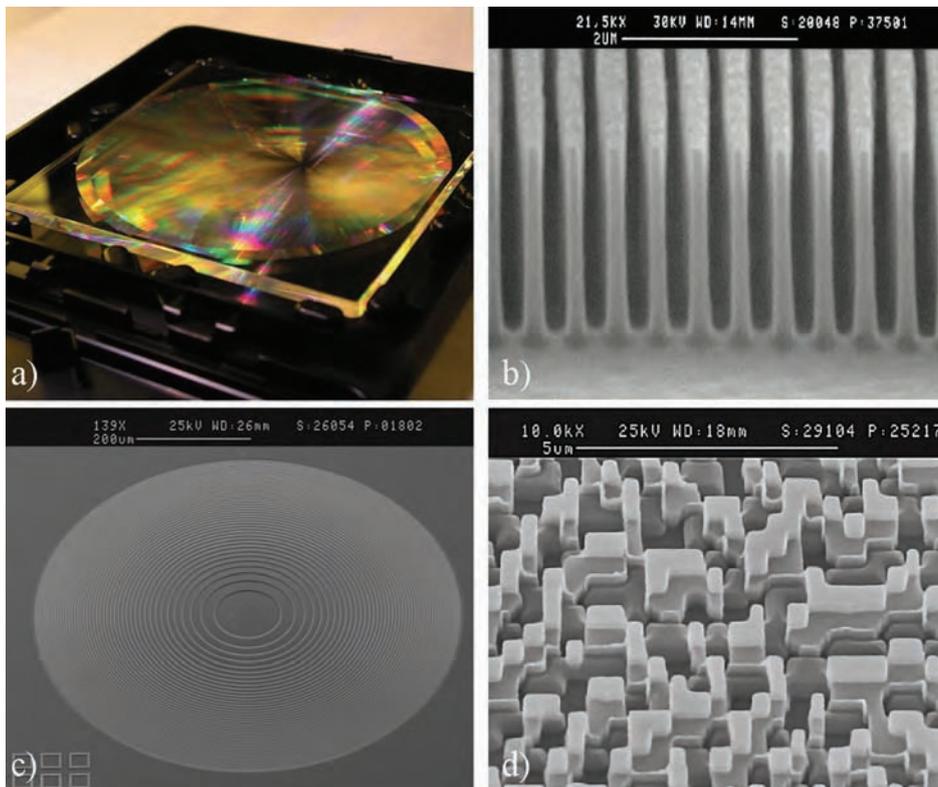


Abb. 3:  
 (a) Computer-generiertes Hologramm für Asphärentests,  
 (b) 2  $\mu\text{m}$  tief in Quarzglas geätztes Gitter mit 440 nm Periode,  
 (c) diffraktive Farbkorrekturlinse für einen Blu-ray DVD-pick-up Kopf,  
 (d) 4-stufiges diffraktives Element.  
 Alle Strukturen sind in Quarzglas geätzt.

Fig. 3:  
 (a) Computer-generated hologram for asphere tests,  
 (b) 440 nm period grating 2  $\mu\text{m}$  deep etched in fused silica,  
 (c) diffractive color correction lens for a Blue-ray DVD-pick-up head,  
 (d) 4-level diffractive element.  
 All structures are etched in fused silica.

Die gesamte Technologiekette kann Substrate mit einer Größe von bis zu 310 mm und einer Dicke von 15 mm verarbeiten.

Das Herz der neuen Anlage ist natürlich das Elektronenstrahlsystem SB350 OS. Mit diesem Gerät kann eine sehr hohe Überdeckungsgenauigkeit der lithographischen Schichten und eine hohe Schreibgeschwindigkeit für mikro- und nanooptische Anwendungen erreicht werden. Die wichtigsten Parameter der SB350 OS sind:

- 50 keV Elektronenenergie,
- Schreibverfahren: variable shaped beam, Zellenprojektion,
- Minimale Strukturgröße < 50 nm,
- Adressraster: 1 nm,
- Stitching und Overlay in einer Schicht < 18 nm,
- Overlay-Genauigkeit (Mask to Mean) < 12 nm.

Abbildung 1 zeigt die Elektronensäule und die Beladestation der SB350 OS.

Um einen sehr hohen Durchsatz zu erreichen, ist ein Zellprojektionsmodus vorgesehen, der ein extrem schnelles Schreiben linearer Gitter ermöglicht. Beispielsweise kann eine Fläche von 100 mm x 100 mm mit einem Gitter mit Perioden von 1 µm, 500 nm oder 200 nm und Zweifachbelichtung innerhalb von 1,5 Stunden geschrieben werden. In diesem Zellprojektionsmodus sind für die Gitterausrichtung vier verschiedene Richtungen (0°, 90° und ± 45°) möglich. Abbildung 2 zeigt ein Gitter mit 1 µm Periode, das mit diesem Modus auf einen 12"-Wafer geschrieben wurde. Die Gitterausdehnung beträgt 280 mm x 50 mm. Ein wichtiger Anwendungsbereich für Gitter mit einer so großen Fläche sind Stretcher-Compressor-Anordnungen für die Manipulation ultrakurzer Laserpulse. Dabei sind die Wellenfrontgenauigkeit, die Größe und der

Beugungswirkungsgrad die wichtigsten Parameter. Es wurden bereits Gitter in Quarzglas mit einem Beugungswirkungsgrad von mehr als 98 % hergestellt.

Abbildung 3 zeigt weitere Beispiele für Strukturen, die mit Elektronenstrahl schreiben und dazugehörigen Techniken wie beispielsweise Trockenätzen oder Replikation hergestellt worden sind. Abgebildet sind großflächige CGH zum Asphärentest, dielektrische Retarder-Gitter mit hohem Aspektverhältnis und verschiedene mehrstufige diffraktiv optische Elemente für Wellenfront- und Farbkorrektur oder Musterprojektion.

Als neue Option ist auch eine Mischung aus Elektronenstrahl- und Laserlithographie möglich. Damit ist eine Herstellung von optischen Mikrostrukturen mit unterschiedlichen Detailgrößenklassen auf einem Substrat oder sogar in einem einzigen optischen Element möglich. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel, bei dem elektronenstrahlgeschriebene Gitter mit Perioden unter einem Mikrometer und lasergeschriebene geblazte Gitter mit einer Periode von 15 µm und einer Tiefe von 5 µm miteinander kombiniert wurden.

Literatur:

- /1/ Schnabel, B.; Microlithographic Pattern Generation for Optics, in *Microoptics – From Technology to Applications*, J. Jahns, K.-H. Brenner eds., Springer, 2004.
- /2/ Gale M.T.; Direct Writing of Continuous-relief Micro-optics, in *Micro-Optics*, H.P. Herzig, ed. (Taylor & Francis, London, 1997).
- /3/ Stern M.; An overview of binary optics process technology, in *Tech. Digest of the Conference on Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Applications*, S. 334-337, OSA, 1994.
- /4/ Zeitner U.D.; Gräßler C.; Laser-Lithographie für Mikrooptik auf gekrümmten Oberflächen, IOF-Jahresbericht 2004, S. 32-33.

The core of the new facility is of course the electron-beam system SB350 OS. With this machine it is possible to achieve a very high overlay accuracy of lithographic layers and high writing speed for micro- and nano-optical applications. The most important parameters of the SB350 OS are

- 50 keV electron energy,
- writing strategy: variable shaped beam, cell projection
- minimum feature size < 50 nm,
- address grid: 1 nm,
- stitching and overlay in one layer < 18 nm,
- overlay accuracy (mask to mean) < 12 nm.

Figure 1 shows the electron column and the loading area of the SB350 OS.

For very high throughput a cell-projection mode is implemented that allows ultra-fast writing of linear gratings.

As an example a 100 mm x 100 mm area can be filled with a grating of 1  $\mu\text{m}$ , 500 nm, or 200 nm period and 2 paths writing within 1.5 hours. Four different orientations ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , and  $\pm 45^\circ$ ) for the grating direction are available in this cell projection mode. A 1  $\mu\text{m}$  period grating written with this cell-projection mode on a 12" diameter wafer is shown in Fig. 2. Its lateral extension is 280 mm x 50 mm. An important application of such large area gratings are stretcher-compressor arrangements for ultra-short laser pulse manipulation. There the wave-front accuracy, size, and diffraction efficiency are the most important parameters. Gratings in fused silica with efficiencies above 98 % have been demonstrated.

Other prominent examples of structures fabricated by e-beam writing and accompanying technologies such as dry etching or replication are shown in Fig. 3. To be seen are large area null-test CGHs for asphere testing, high aspect ratio dielectric retarder gratings, and different multi-level diffractive optical elements for wave-front and color correction or pattern projection.

As a new option also a mix-and-match between electron beam lithography and laser lithography is possible. Thus, the fabrication of optical micro-structures of different feature size classes on one substrate or even in one optical element is possible. An example is shown in Fig. 4. There electron beam written sub-micron period gratings have been combined with laser written blazed gratings of 15  $\mu\text{m}$  period and 5  $\mu\text{m}$  depth.

References:

- /1/ Schnabel, B.: Microlithographic Pattern Generation for Optics, in *Microoptics – From Technology to Applications*, Jahns, J.; Brenner, K.-H. eds., Springer, 2004.
- /2/ Gale, M. T.: Direct Writing of Continuous-relief Micro-optics, in *Micro-Optics*, Herzig, H. P. ed. Taylor & Francis, London, 1997.
- /3/ Stern, M.: An overview of binary optics process technology, *Tech. Digest of the Conference on Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Applications*, pp 334-337, OSA, 1994.
- /4/ Zeitner, U. D.; Gräßler, C.: Laser-lithography for micro-optics on curved surfaces, *IOF Annual Report 2004*, pp. 32-33.

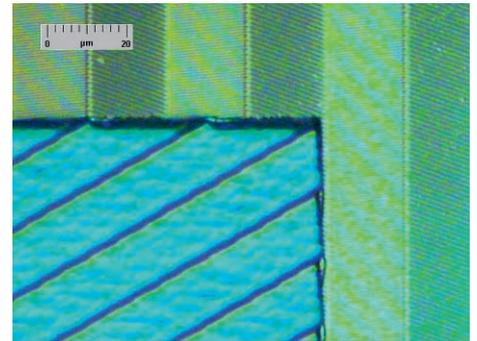


Abb. 4: Kombination von Elektronenstrahl- und Laserlithographie für die Herstellung verschiedener Strukturgrößen in einem einzelnen optischen Element.

Fig. 4: Combination of electron beam and laser lithography for fabrication of different structure classes in a single optical element.

# Blankpressen von Glas als Technologie für Mikro- und Nanooptik



Peter Dannberg



Gilbert Leibeling



Andreas Gebhardt



Wieland Stöckl

Mikrooptische Elemente aus Glas gewährleisten hervorragende Transparenz, Homogenität, Oberflächenpräzision und Stabilität und sind damit favorisiert bei Anwendungen im UV oder mit Hochleistungslasern. Ziel der vorliegenden Untersuchungen war die Nutzung kommerzieller Glaspresstechnologie für die Herstellung dieser Elemente mit Blick auf Strukturauflösung/ Strukturtreue, Ebenheit, Vorder-Rückseitenjustage und optischer Leistungsparameter wie Beugungs- oder Koppelaktivität.

In die Untersuchungen eingeschlossen war die Herstellung entsprechender Werkzeuge, insbesondere von lithografisch erzeugten Mastern. Da sich durch Ultrapräzisions (UP)-Diamantschleifen von z. B. Wolframkarbid Mikrostrukturen nicht erzeugen lassen, wurden zwei Wege beschritten: erstens die spanende Bearbeitung von Nickelphosphorschichten und zweitens das galvanische Aufwachsen von Nickel auf lithografisch erzeugten Mikrostrukturen. Die daraus folgende Beschränkung auf wenige bei  $\sim 400^\circ\text{C}$  pressbare Gläser lässt sich mit typischen Randbedingungen der Mikrooptik (Laser- bzw. monochromatische Lichtquellen, oftmals keine abbildende Optik, (sub-)  $\mu\text{m}$ -Strukturen) durchaus vereinbaren.

Mit beiden Verfahren konnten erfolgreich Abformwerkzeuge erzeugt werden. Um die Strukturtreue auch bei sehr feinen lithografischen Strukturen zu gewährleisten, wurde dabei die Galvanik-Startschicht so ausgelegt, dass sie gleichzeitig als Trennschicht bei der Abformung dienen kann. Zum Einsatz kam eine kommerzielle Glaspresse (Toshiba GMP 311V); Zykluszeiten für die verwendeten Gläser liegen typisch bei 10 – 15 Minuten. Im Anschluss an die Abformung erfolgte eine Nachbearbeitung, z. B. die Vereinzelung auf

einer Wafersäge. Die Optimierung der Geometrie des gepressten Elements besteht in der Vorkompensation der lateralen Geometrie (z. B. beim Maskenentwurf), in der Optimierung der Temperaturprofile zur Minimierung von Durchbiegungen sowie in der lateralen und axialen Justage bei beidseitigen Elementen. Auf eine Kompensation von Profilverfälschungen kann bei den geringen Strukturhöhen von  $< 100 \mu\text{m}$  verzichtet werden.

In einem ersten Anwendungsbeispiel wurde die Beugungseffektivität gepresster optischer Blaze-Gitter mit der laserlithografisch hergestellten Masterstrukturen verglichen. Bis zu den kleinsten Perioden von  $5 \mu\text{m}$  gab es keine messbaren Differenzen, was eine sub- $\mu\text{m}$  formtreue Kopie des Gitterprofils bedeutet.

Die Durchbiegung über  $30 \text{ mm}$  Gitterlänge konnte auf  $< 300 \text{ nm}$  reduziert werden. Selbst die Abformung von Mottenaugenstrukturen zur Entspiegelung ergab erst unterhalb  $500 \text{ nm}$  Wellenlänge  $\sim 1\%$  geringere Transmission als bei der Masterstruktur. Wichtiges Einsatzgebiet der Elemente ist die Strahlformung von Hochleistungs-Laserdioden.

Abbildung 1 zeigt Ansicht und Wellenfrontfehler eines beidseitig gepressten Zylinderlinsenteleskopes (»Beam-Twister«). Die Linsenform (Werkzeug durch UP-Diamantbearbeitung) ist beugungsbegrenzt, der Restfehler entspricht einer axialen Dejustage von  $< 10 \mu\text{m}$ . Weiterhin realisiert wurden bisher diffraktive Redirektor-Elemente sowie Slow-Axis Kollimationslinsen.

# Glass molding as technology for micro- and nano-optics

Glass microoptical elements show outstanding optical transparency, homogeneity, surface precision and stability, making them ideal candidates for use in UV- or high power laser applications. The aim of the present investigation was the evaluation of commercial glass molding equipment for microoptics fabrication in terms of resolution, precision, flatness, top to backside alignment as well as corresponding optical parameters such as diffraction or coupling efficiency. The study also included the generation of replication tools, especially on the basis of lithographical master structures. As the ultra precision (UP) diamond grinding of materials like Tungsten carbide is not capable of generation microstructures, two alternative methods were tried: (i) UP machining of nickel phosphorus, and (ii) replication of lithographical features by Nickel electroplating. Consequently, the choice of glasses is limited to a few that can be processed at  $\sim 400^\circ\text{C}$ . However, this is not critical in view of typical microoptics requirements like laser/ monochromatic illumination, non-imaging optics, and (sub-)  $\mu\text{m}$  features.

Molding tools could be successfully produced using both approaches; in the case of electroplating the initially sputtered metal layer could simultaneously be used as a release layer in the molding process in order to maintain nanometer precision of the molded feature geometry. For the molding itself a commercial glass molding press was used (Toshiba GMP 311V) with typical cycle times of 10 to 15 min. After molding, post processing (e.g. dicing on a wafer saw) was carried out.

Optimization of the geometry of the molded part was carried out mainly by pre-compensation of the lateral geometry (e.g. in the mask layout), by optimization of the temperature profile in order to minimize bowing as well as in the lateral and axial alignment of front to backside; a compensation of profile deviations is not necessary at the moderate structure depths below  $100\ \mu\text{m}$ .

In a first application example the diffraction efficiency of molded blazed gratings was compared to that of the master structures fabricated by laser lithography; there was no significant difference down to the smallest periods of  $5\ \mu\text{m}$  corresponding to a sub- $\mu\text{m}$  accuracy of the molded profile. Even the replication of anti-reflecting moth-eye patterns showed only a small drop in the sample transmission ( $\sim 1\%$ ) below  $500\ \text{nm}$  wavelength compared to the master structure. The bow across  $30\ \text{mm}$  long samples was reduced below  $300\ \text{nm}$ .

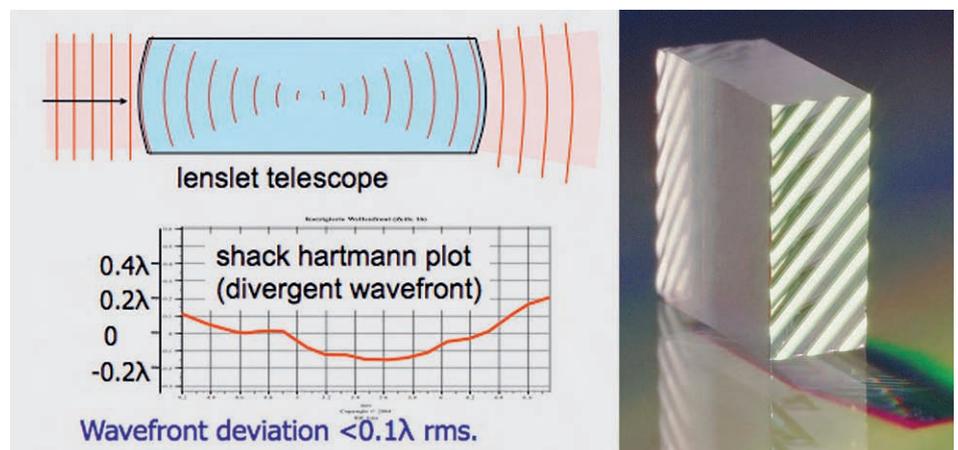
A major application of the elements is the beam forming of high power laser diode bars. As an example, geometry and wavefront measurement plot of

a double sided cylindrical microlens array ("beam twister") is shown in Fig. 1. The remaining deviation corresponds to a defocus of  $< 10\ \mu\text{m}$  whereas the lenslets themselves (tool fabricated by UP machining) are diffraction limited.

Furthermore, diffractive redirector elements as well as lens arrays for slow axis collimation were realized.

Abb. 1: Beam-twisting Teleskop-Arrays zur Laserstrahlformung: Geometrie, einzelner Chip sowie gemessene Wellenfront eines einzelnen Teleskopes bei  $850\ \text{nm}$ .

Fig. 1: Beam twisting telescope arrays for laser beam forming: sketch of geometry, single chip, and measured wavefront of a single telescope at  $850\ \text{nm}$ .



# Ultrapräzisionsbearbeitung – Technologie für innovative Optikelemente



Ralf Steinkopf



Andreas Gebhardt



Robert Jende



Johann P. Zänkert <sup>1</sup>

<sup>1</sup> LINOS Photonics GmbH & Co. KG

Kompakte Bauweise, hohe Abbildungsleistung und die Integration mehrerer Funktionen in einem Bauelement sind Anforderungen an innovative Optikelemente. Anwendungen aus dem Automotive-Bereich (Head up Display) oder der Laseroptik (Strahlformung) zeigen, dass die Serienfabrikation von Bauelementen mit asymmetrischer Geometrie oder von multifunktionalen Arrays Defizite in den verfügbaren Fertigungstechnologien aufweist.

Im Verbundprojekt »Flexible Prototypen- und reproduzierbare Serienfabrikation innovativer Optikelemente – FINO“ /1/ wurden neue Technologien entwickelt, um diese komplexen Anforderungen zu erfüllen. Es wurde die gesamte Prozesskette vom Design bis zur Fertigung grundlegend untersucht und exemplarisch an ausgewählten Beispielen erprobt. Schwerpunkt der Arbeiten am Fraunhofer IOF war die Ultrapräzisionsbearbeitung von Prototypen und Formenmaterialien für die Heißformgebung optischer Gläser. Zwei Technologieansätze wurden verfolgt:

1. Das optische Element wird direkt durch Diamantdrehen oder -fräsen (Fly-Cutting) erzeugt. Zu bearbeitende Materialien sind in der Regel PMMA oder Aluminium. Die realisierten optischen Elemente können unmittelbar zur Verifizierung und Optimierung des Systems genutzt werden.

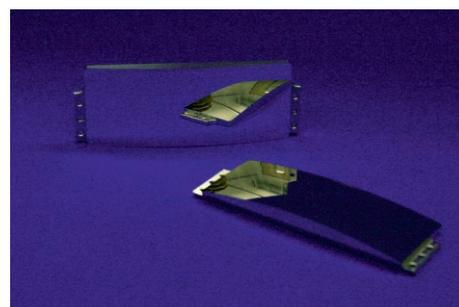
2. Das Element wird durch Urformen oder Umformen optischer Kunststoffe (Spritzguss/Heißprägen) erzeugt, wobei Soft-Werkzeuge in einfach zu bearbeitenden Materialien wie Messing oder Neusilber hergestellt werden. In diesem Fall stehen technologische Aspekte des Replikationsverfahrens im Vordergrund der Untersuchung. Durch ultrapräzise Fräsbearbeitung sind Optikelemente mit großen Abweichungen von Symmetrie und sphärischer Gestalt hergestellt worden.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen den Prototyp eines Freiformspiegels, sowie Werkzeugeinsätze zum Spritzgießen einer Off-Axis Asphäre. Neben der Realisierung von Korrekturzyklen zur Optimierung der Oberflächenform sind auch wirtschaftliche Verfahrensaspekte berücksichtigt worden. So konnte eine deutliche Reduzierung der Bearbeitungszeit beim Raster-Fly-Cutting durch die Optimierung der Verfahrensparameter und den Einsatz großer Werkzeugradialen erreicht werden.

Für die Serienfertigung von Optiken durch Blankpressen von Glas wurden Untersuchungen zur ultrapräzisen Bearbeitung von Warmarbeitsstählen durchgeführt. Basiswerkstoff für die dazu verwendeten Präzisionswerkzeuge ist das kubische Bornitrid (CBN). Neben Dreh- und Fräsprozessen wurde hierbei insbesondere das Fertigungsverfahren Hobeln untersucht. Mit diesem Verfahren können strukturierte Optikflächen erzeugt werden. Die Resultate zeigen, dass durch die Verwendung von Werkzeugen mit spezieller Schneidenpräparation Rauheitswerte  $< 30 \text{ nm rms}$  möglich sind. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in einem multifunktionalen Array aus Werkzeugstahl zum Heißprägen optischer Gläser (Abb. 3) umgesetzt. Die Realisierung erfolgte mit einer 4-achsigen Ultrapräzisionsmaschine (Abb. 4).

Abb. 1:  
Freiform, gefräster Prototyp aus Aluminium.

Fig. 1:  
Freeform, milled prototype from Aluminium.



# Ultra precision machining – Technology for innovative optical elements

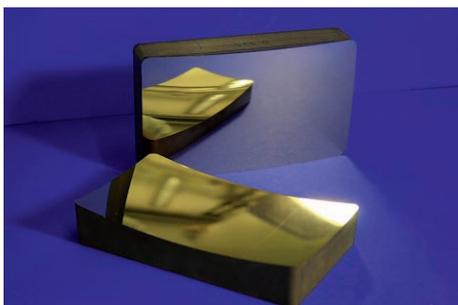
Compact designs, high imaging capacity and the integration of several functions in one element are typical requirements for innovative optics. Applications in the automotive industry (head-up displays) or telecommunications (fiber-coupling) show that series production of optical components with asymmetrical geometry reveals deficits in the available manufacturing technology.

To overcome these shortcomings and develop technologies for series production of innovative optical elements, the BMBF project “Flexible prototype manufacturing and reproducible series production of innovative optical elements” was developed /1/. The entire process chain from design to manufacturing was investigated and tested exemplarily with selected examples. The focus of work at the IOF was on Single Point Diamond Turning (SPDT) of optical materials for prototypes and form materials of selected mold technologies. For prototyping two technologies were pursued:

1. The prototype is produced by direct shaping using technologies such as turning or milling (Fig. 1). Typical prototype materials are PMMA or aluminium. The produced optical elements can be used directly for the verification and optimization of the system.

Abb. 2:  
Softwerkzeugeinsatz für das Prototyping.

Fig. 2:  
Soft tool for prototyping.



2. The prototype is produced by injection molding or hot embossing. The mold inserts are cut in materials such as brass or nickel silver (soft tools) which can be worked on well with SPDT. Here, technological aspects of the mold process form the focus of the investigation.

Figures 1 and 2 show a freeform mirror prototype as well as off-axis-aspheric inserts for injection molding. Correction cycles have been used to improve the contour accuracy. Alongside optical tolerances, economical aspects were also considered. In this way, a clear reduction of operating time could be achieved with raster Fly Cut by varying the process parameters and the use of large tool radii.

For serial production of glass-optics by means of hot embossing, ultra precision machining of steel was the focus of the investigation. Besides the turning and milling processes, planing as a manufacturing method was examined. Structured optics can be produced with such a technique. A suitable tool material is cubic boron nitride (CBN). In particular, use of tools with a special surface finish are possible here, and surface roughness values down to 30 nm rms have been achieved with such tools. The results of the investigations were applied in a multi-functional array from steel for hot embossing of optical glasses (Fig. 3). A 4-axis freeform machine (Fig. 4) was used for realization.

#### References:

- /1/ Zänkert, J. (Hrsg.): Report of the BMBF project: Flexible prototype manufacturing and reproducible series production of innovative optical elements – FINO, ISBN 39810759-4-3

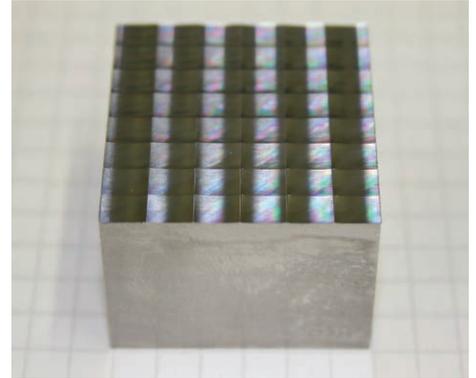


Abb. 3:  
Linsenarray aus Stahl zum Abformen von Glas.

Fig. 3:  
Lens array from steel for casting glass.

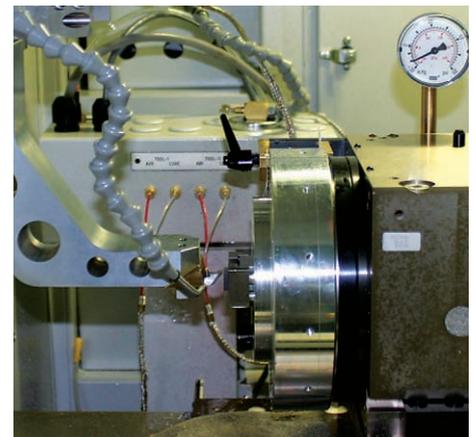


Abb. 4:  
Ultrapräzisionsbearbeitung (Hobeln) eines  
Werkzeugeinsatzes.

Fig. 4:  
Freeform machine (ruling) of steel mold.

# Strategien für die prozessintegrierte Nanorauheits-Kontrolle durch Streulichtmethoden



Angela Duparré



Sven Schröder



Stefan Glied



Andreas Tünnermann

Die stürmischen Entwicklungen in der Nanotechnologie ziehen neuartige Anforderungen an eine produktionsumfeldgerechte Messtechnik nach sich. Ein Schwerpunkt dabei sind Mess- und Auswerteverfahren zur Bestimmung von Rauheits- und funktionsbezogenen Kenngrößen. Streulichtmethoden bieten sich prinzipiell zur berührungsfreien, robusten und effizienten Analyse von Nanostrukturen an /1/, sind jedoch noch weitgehend auf den Einsatz im Labor und entsprechend labortypische Probengeometrien beschränkt. Grundlagen, Konzepte und Strategien für eine fertigungsrelevante Umsetzung bis hin zum prozessintegrierten Einsatz werden daher gegenwärtig im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1159 im Teilprojekt »Funktionsbezogene Bewertung von Nanorauheiten auf fertigungsrelevanten Oberflächen durch Streulichtmessverfahren (NanoStreu)« untersucht. Wesentliche Schritte sind dabei u. a.:

- Klassifizierung von Streulichtmessprinzipien, Definition von Bedingungen für die Anwendung im Produktionsumfeld.

- Bewertung der Verfahren hinsichtlich ableitbarer Kenngrößen (Rauheitskenngrößen (Abb. 1), Ultrahydrophobie /2/), Umfang und Handhabbarkeit der Messdaten, Messzeit.
- Übergang zu Mess- und Auswertekonzepten für den Einsatz zur Qualitätskontrolle auf fertigungsrelevanten Flächen. Das bedeutet einerseits große Fertigungsflächen mit Ausdehnungen bis zu einigen m<sup>2</sup> und andererseits Mikroflächen.

Beispiele für die spätere Anwendung reichen von der Inspektion von Mikrolinsenarrays (Abb. 2) bis hin zur Prozesskontrolle bei der Fertigung von diamantgedrehten Oberflächen (Abb. 3).

Aus den Untersuchungen ergab sich, dass bei Mikroflächen infolge des stark reduzierten Beleuchtungsfleck-Durchmessers Fluktuationseffekte in den Messkurven in Betracht gezogen werden müssen (Abb. 2, orange Kurve). Es konnte gezeigt werden, dass diesen Effekten z. B. durch Vergrößerung der Detektorapertur entgegengewirkt werden kann (Abb. 2, braune Kurve) /3/.

Für diamantgedrehte Oberflächen besteht die Zielsetzung in einer prozessintegrierten Rauheitskontrolle, die eine effiziente Optimierung der Fertigungsparameter während der Herstellung ermöglicht. Streulichtmessungen zeigten, dass die Bestimmung von Rauheitsanteilen unmittelbar entsprechend ihrem Einfluss auf die optische Funktion vorgenommen werden kann und muss.

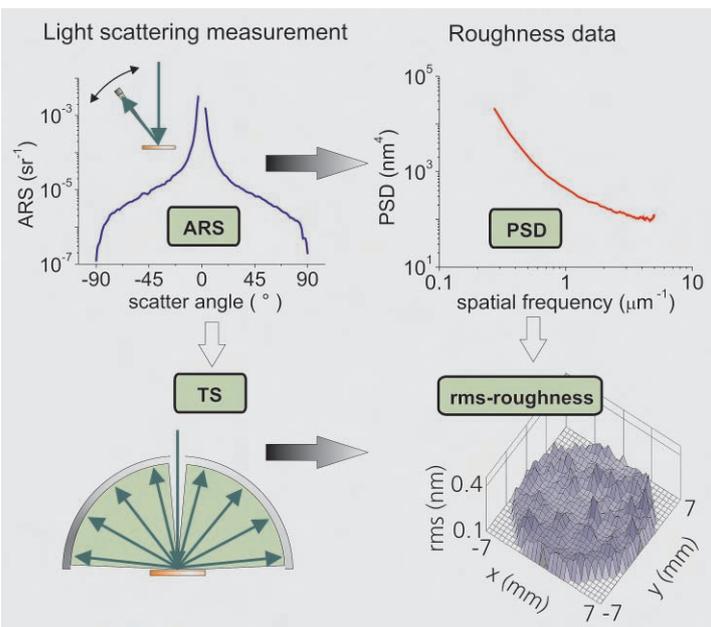


Abb. 1: Bestimmung von Rauheitskenngrößen durch Streulichtmethoden schematisch, ARS – angle resolved scattering, TS – total scattering, PSD – power spectral density.

Fig. 1: Determination of roughness properties with light scattering techniques, ARS – angle resolved scattering, TS – total scattering, PSD – power spectral density.

# Strategies for in-process nanoroughness control using light scattering techniques

The tremendous developments in the field of nanotechnologies result in novel challenges for industry-tailored measurement techniques. This in particular holds for methods to determine roughness as well as functional parameters. Light scattering techniques offer major benefits to meet these requirements [1]. Until now, however, these techniques have been largely confined to laboratory-based applications. The basics and concepts for their adaptation to close-to-process measurement are investigated in the project "Close-to-production nano-roughness assessment by light scattering measurement" (NanoScatt), part of the DFG priority program SPP 1159. The basic steps hereby comprise:

- Classification of light scattering measurement techniques, requirements for close-to-production applications.
- Assessment of the procedures regarding deducible parameters (roughness (Fig. 1), ultrahydrophobicity [2]), complexity and handling of measurement data, measurement time.
- Transition to measurement and analysis concepts for the quality control of production surfaces; large-scale surfaces with areas up to  $\sim m^2$  as well as micro surfaces.

Applications range from the inspection of micro lens arrays (Fig. 2) to process control during the production of diamond turned surfaces (Fig. 3).

Our investigations revealed that, especially for micro surfaces, fluctuation effects of the measurement curves have to be considered as result of the reduced illumination spot size (Fig. 2, orange curve). It was demonstrated that these effects can be reduced, for instance, by using a larger detector aperture (Fig. 3, brown curve) [3].

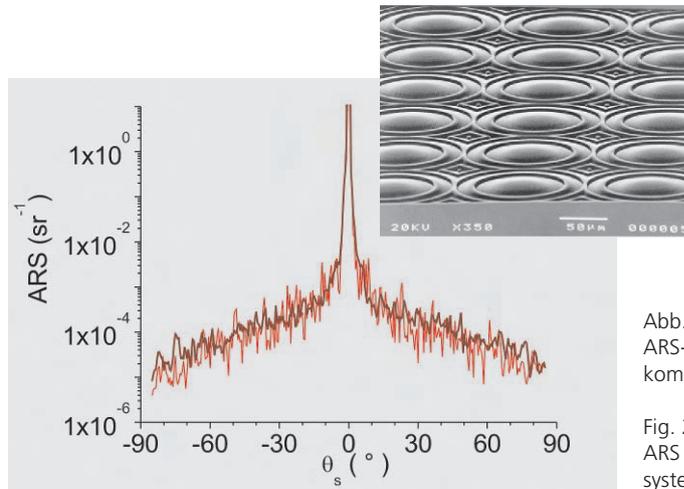


Abb. 2: ARS-Messung an Mikrosystemkomponenten.

Fig. 2: ARS measurement of micro system components.

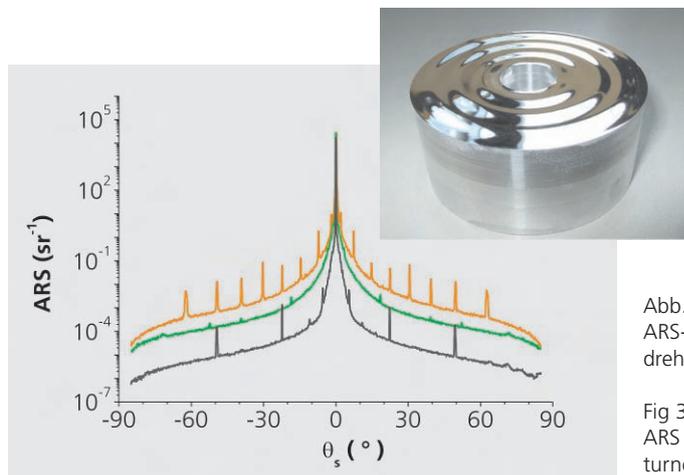


Abb. 3: ARS-Messung an diamantgedrehten Oberflächen.

Fig 3: ARS measurement of diamond-turned surfaces.

For diamond-turned surfaces, the ultimate goal is an in-process roughness control enabling an efficient optimization of the tooling parameters during fabrication. Light scattering measurements revealed that the determination of roughness contributions must be performed according to their impact on the optical performance of the component.

## References:

- /1/ A. Duparré, 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.
- /2/ A. Duparré, M. Flemming, G. Notni, A. Tünnermann, Nanorauheit statt Lotusstruktur: Chancen für ultrahydrophobe optische Oberflächen, Photonik 2 (2005) S. 62-65.
- /3/ S. Schröder, A. Duparré und A. Tünnermann, Bewertung von Nanorauheiten durch Streulichtmessung, Technisches Messen 73 (2006) 35-42.



Andreas Brückner



Jacques Duparré



Peter Dannberg



Sylke Kleinle



Andreas Bräuer

Im Gegensatz zu klassischen abbildenden Systemen (z. B. kommerzielle Digitalkamera) ermöglicht es das Abbildungsprinzip der künstlichen Facettenaugen /1/ Licht aus einer Richtung mehrfach in verschiedenen Kanälen aufzunehmen. Dieses Prinzip kann in der Natur im neuronalen Superpositionsauge der Fliege (Abb. 1) beobachtet werden. Hinter jeder Facette des Fliegenauges verbergen sich mehrere Rezeptoren, die in verschiedene Richtungen blicken. Jede Raumrichtung für sich wird jedoch durch mehrere Rezeptoren aus benachbarten Facetten erfasst, deren Signale auf neuronaler Ebene wieder gebündelt werden. Das Insekt benutzt diese Mehrfacherfassung um eine höhere Lichtausbeute zu erreichen.

Dieses Prinzip kann in künstlichen Facettenaugen für eine farbbempfindliche Bilderfassung genutzt werden. Da ein digitaler Bildwandler die Lichtintensität im sichtbaren Spektralbereich weitgehend unabhängig von deren Farbzusammensetzung misst, verwendet man in den meisten herkömmlichen Digitalkameras Farbfilter, um die Intensität des roten, grünen und blauen Lichtanteils zu bestimmen. Pro Farbpixel benötigt man diese drei Farbintensitätswerte.

Die Farb-Facettenaugenkamera (Abb. 2) extrahiert drei Bildpunkte pro Kanal. Diese sind so angeordnet, dass jeder Punkt des Gesichtsfeldes durch drei Pixel aus verschiedenen Kanälen mit je einem Rot-, Grün- und Blaufilter erfasst

wird. Durch einfaches Umsortieren der Pixel ergibt sich nun ein Farbbild. Im Gegensatz zu herkömmlichen Digitalkameras, wo durch eine Bayer-Farbfiltermatrix an jedem Punkt des Bildes nur eine Farbinformation gewonnen wird, ist hier keine Interpolation zwischen den Signalen nötig.

Die Herstellung erfolgt durch mehrfache Fotolithografieprozesse. Die Lochblendenarrays werden auf der Rückseite eines Glassubstrates in Ti oder Cr erzeugt (Abb. 3, rechts). Auf der Vorderseite strukturiert man zunächst Aperturblenden in einem Black Matrix Polymer (PSK2000, Brewer Science), auf denen dann nacheinander Polymer-Farbfilterstreifen (PSC, Brewer Science) belichtet und entwickelt werden. Die Abformung des Mikrolinsenarrays auf den Farbfiltern stellt den letzten Herstellungsschritt dar (Abb. 3, links). Danach werden die Kameraobjektive vereinzelt und mit Hilfe eines UV-aushärtenden Klebers auf einen monochromen digitalen Bildwandler (Modell Saentis, ZMD Dresden) montiert. Eine angepasste Softwareschnittstelle ermöglicht die Umsortierung der Pixel und Anzeige der Farbbilder.

Der Farbkontrast stellt eine zusätzliche Information dar, die mit der künstlichen Facettenaugenkamera gewonnen werden kann. Dies steigert die Attraktivität dieses bildgebenden Sensors gerade in Hinsicht auf das niedrige räumliche Bildauflösungsvermögen von 70 x 40 Pixeln (Abb. 4 und Abb. 5).

Abb. 1: Schematische Darstellung eines neuronalen Superpositionsauges.

Fig. 1: Schematic section of a neural superposition eye.

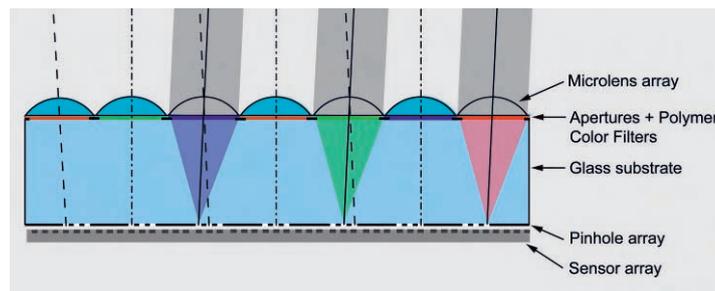
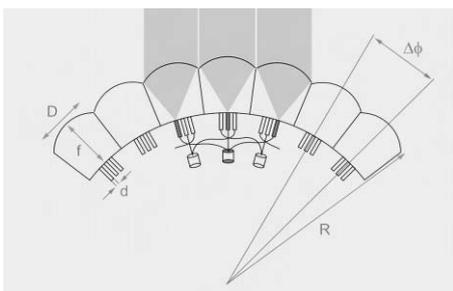


Abb. 2: Layout der Farb-Facettenaugenkamera mit einer Dicke von 450  $\mu\text{m}$ .

Fig. 2: Layout of an artificial compound eye color camera with a thickness of 450  $\mu\text{m}$ .

# Artificial compound eye for color vision

In contrast to classical imaging systems (e.g. commercial digital cameras), artificial compound eyes /1/ open up the possibility of collecting light coming from one direction in different channels. This principle is also found in nature, for instance in the neural superposition eye of a fly (Fig. 1).

Here, several photoreceptors image different points within the field-of-view of a single facet. However, each object point is imaged by multiple facets and the related signals are accumulated in the first synaptic layer of the eye. This redundant process is used to increase light sensitivity.

In artificial compound eyes the same principle enables color sensitive imaging. Due to their broad spectral sensitivity optoelectronic sensors of digital still cameras apply color filters to record the intensity of the blue, red and green content of the incoming light separately. For each color pixel in the image these three color intensity values are required.

The artificial compound eye color camera extracts three image points per channel (Fig. 2). The geometrical setup is designed such that each object point is imaged through a red, green and blue color filter in different channels. The color image results from simply rearranging the pixels of the recorded image. In contrast to the Bayer-pattern filters of conventional digital still cameras, where only single color information is measured in each pixel, here no interpolation between the pixels is needed.

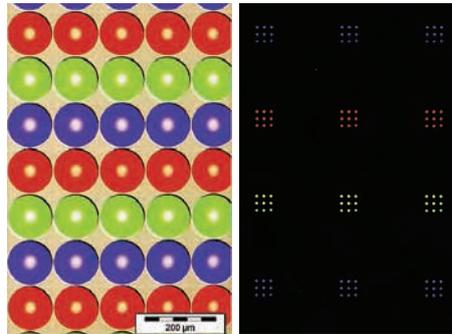


Abb. 3:  
Links: Aufsicht auf das Mikrolinsenarray (ø 125 µm) mit darunter liegenden Farbfilter- und Blendenstrukturen  
Rechts: Gruppen von 3 x 3 Lochblenden (ø 3 µm) auf der Rückseite.

Fig. 3:  
Left: Top view of the microlens array (ø 125 µm) with color filter stripes on top of the circular apertures.  
Right: Array of 3 x 3 illuminated pinholes with ø 3 µm on the back side.

An artificial compound eye color camera is fabricated using several steps of photolithography. At first a pinhole array is structured on the back of a glass substrate in a Ti or Cr layer (Fig. 3, right). Circular apertures are initially created on the front side using a black matrix polymer (PSK2000, Brewer Science). After that, the color filter stripes are written into 1.5µm thick polymer resist layers (PSC, Brewer Science) on top of the apertures. Finally, a micro-lens array is replicated on top of these color filters (Fig. 3, left). Afterwards the objectives are isolated and each is attached to an optoelectronic sensor (Saentis, ZMD Dresden) with a UV-curable adhesive. A modified software interface fulfils the pixel rearrangement and display.

Color contrast is a source of additional information which can now be sensed with an artificial compound eye camera. Due to the characteristic low image resolution, here 70 x 40 pixels, it increases the attractiveness of imaging with artificial compound eyes (Fig. 4 and Fig. 5).

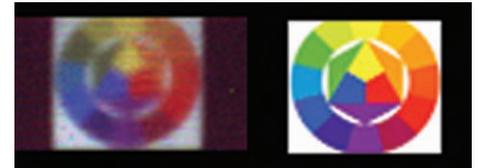
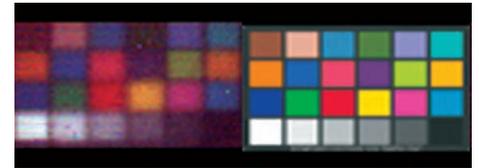
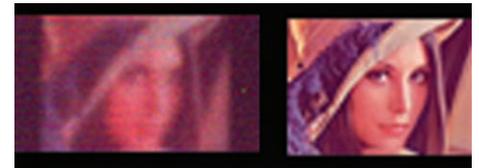


Abb. 4:  
Vergleich zwischen aufgenommenen Testbildern (links) und Original (rechts).

Fig. 4:  
Comparison between recorded (left) and original images (right).

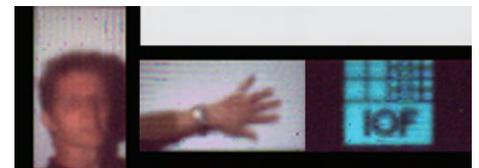


Abb. 5:  
Lebendige Motive und Institutslogo, Gesichtsfeldgröße: 20° x 11°.

Fig. 5:  
Living motifs and the logo of the institute. The device has a field-of-view of 20° x 11°.

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

# Miniaturisierte Laserprojektoren



Andreas Bräuer



Peter Schreiber



Bernd Höfer

Die Anforderung, Miniatursysteme zu entwickeln, die z. B. als Digitalprojektoren in mobile Geräte wie Laptops, PADs oder HUD's integriert werden können, war Motivation für die Arbeiten auf dem Gebiet der Laserprojektion. In den entstandenen Funktionsdemonstratoren wurden direkt modulierbare Laserdioden mit einem Mikroscoannerspiegel zu einem kleinen bildgebenden System kombiniert.

Das Funktionsprinzip beruht auf einer modulierten Laserstrahlung, die kollimiert und von einem in 2 Achsen schwenkbaren Scannerspiegel abgelenkt wird. Der in Resonanzfrequenz schwingende Spiegel scannt dann sinusförmig (Lissajous-Figur) die Projektionsfläche ab. Entsprechend der Bildpunktposition, der Durchlaufgeschwindigkeit und des Helligkeitswertes des dargestellten Bildpunktes wird der Laser an dieser Position entsprechend moduliert. Bei Resonanzfrequenzen des Scannerspiegels im Bereich von 30 kHz und Modulationsfrequenzen der Laser größer 10 MHz kann eine VGA Darstellung mit 640 x 480 Pixel erreicht werden.

Die Vorteile der Laserprojektion sind vor allem der realisierbare Farbraum, der gute Kontrast und die große Tiefenschärfe.

Ein roter Halbleiterlaser dient im ersten Demonstrator als Lichtquelle, deren Strahlung, durch eine Mikrooptik kollimiert, auf einen in 2 Achsen schwenkbaren Scannerspiegel trifft. Der eingesetzte Mikroscoannerspiegel und dessen Ansteuerung wurden im Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme Dresden entwickelt und hergestellt. Die geringe Baugröße der Laserdiode und des Scannerspiegels ermöglichen es, einen miniaturisierten Laserprojektor zu fertigen, dessen Volumen gerade einmal 1,4 cm<sup>3</sup> beträgt (Abb. 1 und 2).

Im zweiten Demonstrator wurden zwei Halbleiterlaser für die Farben Rot und Blau mit einem frequenzverdoppelten Konversionslaser für die Farbe Grün kombiniert. Über den Mikroscoannerspiegel werden die drei Farbstrahlen auf die Bildfläche projiziert. Mit einer angepassten Ansteuerung der einzelnen Laserquellen und des Scannerspiegels kann das entsprechende Farbbild bzw. Video erzeugt werden. Der Miniaturisierung sind hier im Augenblick noch Grenzen gesetzt, da die grüne Laserquelle noch nicht als direkt modulierbarer Halbleiterlaser zur Verfügung steht. Das Lasermodul mit den Ansteuereinheiten hat gegenwärtig ein Volumen von 7,5 x 10 x 2,5 cm<sup>3</sup> (Abb. 3 und 4).

Laufende Entwicklungen zur weiteren Miniaturisierung und Leistungserhöhung der benötigten Laserquellen werden Abmessungen von Zigarettenschachtelgröße möglich machen.

Abb. 1: Projektorkopf monochrom ROT.

Fig. 1: Monochrome RED projector head.

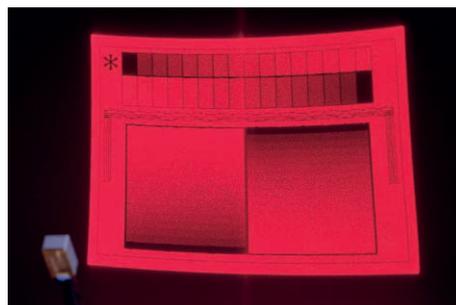
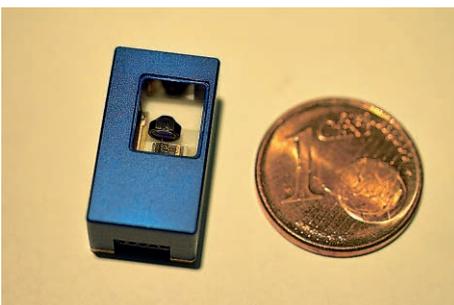


Abb. 2: Graustufenabbildung monochrom ROT.

Fig. 2: Grey scale image monochrome RED.

# Miniaturized laser projectors

Micro optical digital projection systems to be integrated into mobile devices like Laptops, PDAs, or HUDs are the aim of work on laser projection. Directly modulated laser diodes have been combined with a MEMS scanning mirror in operational demonstrations to form a small image projection system.

The operational principle is based on one modulated, collimated laser beam that is reflected by a scanning mirror oscillating about two axes. The sinusoidal oscillation at resonance frequency scans the projection area (Lissajous figure). The laser intensity is modulated corresponding to the mirror position, mirror velocity and brightness at every image point. VGA projection at 640 x 480 pixels can be attained when working with 30 kHz resonance frequency of oscillation and 10 MHz minimum laser modulation. Large color space, high contrast and high focal depth are the main advantages of laser projection. As a first demonstration a red semiconductor laser is used as light source. Its radiation is micro-optically collimated and scanned over the projection area by means of scanning mirror with two axes.

Abb. 3: RGB Projektor.

Fig. 3: RGB projector.



The scanning mirror and its control unit were developed and manufactured at Fraunhofer Institute for Photonic Microsystems Dresden. The small dimensions of both, the laser diode and the mirror enabled the production of a miniaturized laser projector with a volume of about 1.4 cm<sup>3</sup> (Figs. 1 and 2).

In the second demonstration, two semiconductor lasers emitting red and blue, respectively, and a frequency-doubled laser emitting in green were used for a full color light source. The different collimated beams are combined and projected by one scanning mirror. Color pictures or videos can be generated using an adapted control of the discrete light sources and of the scanning mirror.

The degree of miniaturization is limited due to the lack of green emitting semiconductor lasers. The dimensions of the projector including light sources and control unit is currently 7.5 x 10 x 2.5 cm<sup>3</sup> (Figs. 3 and 4).

Current developments towards further miniaturization and higher laser power output will enable the reduction in size of the color projector down to that of a cigarette packet.

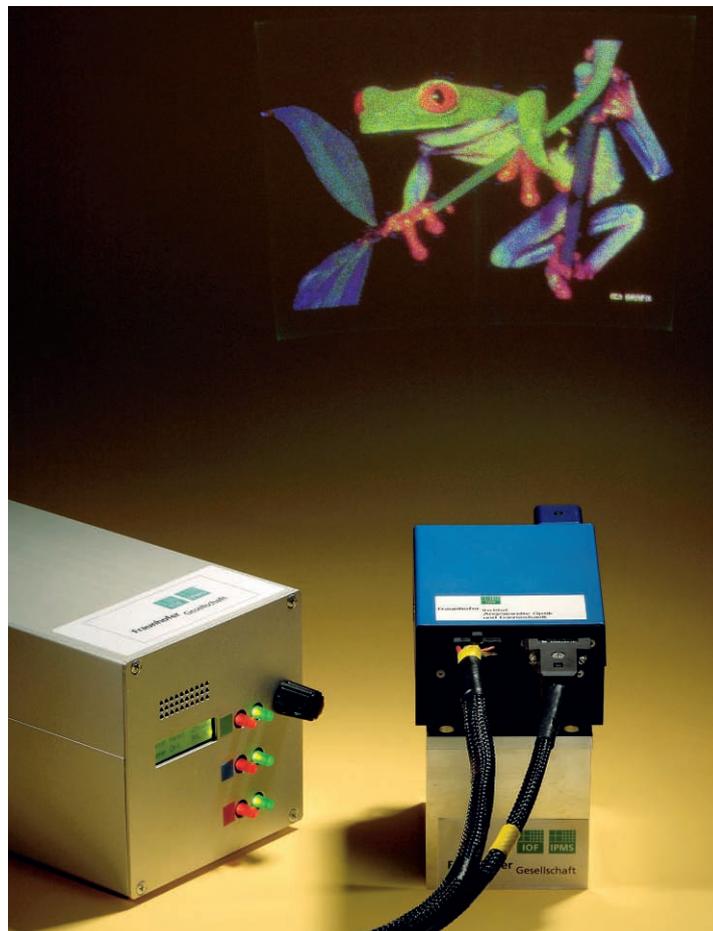


Abb. 4: RGB Projektion.

Fig. 4: RGB image.

# Opto- und thermo-mechanisches Design von Hochleistungsfaserlasern



Thomas Peschel



Jens Limpert <sup>1</sup>



Ulrich Streppel



Christian Wirth



Christoph Damm



Ramona Eberhardt



Andreas Tünnermann

Das Konzept des Faserlasers stellt eine der aussichtsreichsten Möglichkeiten dar, optische Leistungen bis in den Bereich einiger Kilowatt bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität für Anwendungen in Forschung und Produktion bereitzustellen.

Im Rahmen eines internen Forschungsprogramms der FhG\* sollen die notwendigen Technologien für ein Kilowatt-cw-Lasersystem entwickelt und ein Prototyp aufgebaut werden. Zentrale Optik- und Mechanikkomponenten wurden konzipiert und deren Betriebsverhalten mittels FEM simuliert. Um die erforderliche Pumpleistung möglichst effizient in die aktive Faser einkoppeln zu können, wurde eine an die Parameter der Faser angepasste Freistrahloptik entworfen und realisiert. Im Vorfeld der Konstruktion wurde das thermo-optische Verhalten der Kieselglaslinsen in Abhängigkeit von der Laserleistung simuliert, um die Auslegung der Linsen zu optimieren und deren Einfluss auf die erreichbare Strahlqualität und -stabilität abschätzen zu können (Abb. 1). Bei einer Laserleistung von 5 kW kommt es, vor allem durch Absorption in den Antireflexschichten, zur Ausbildung einer thermischen Linse mit einer optischen Wegdifferenz von ca.  $\lambda/6$ .

Von großer Bedeutung ist weiterhin das Temperaturmanagement der Faser, die durch den Quantendefekt eine vom aktiven Laserkern ausgehende Erwärmung erfährt. Diese belastet die Faser sowohl thermisch als auch mechanisch /1/ und kann im ungünstigsten Fall zu einer Verschlechterung der Strahlqualität führen. Deshalb kommt angepassten Aufbaukonzepten eine enorme Bedeutung zu /2-4/.

Die Faser wird auf ihrer gesamten Länge von mehreren Metern über ihre Mantelfläche an eine Wärmesenke angebunden, die gleichzeitig die stabile Einbettung der Faser erlaubt und sie so auch vor mechanischer Beanspruchung und Umgebungseinflüssen schützt. Die Einbettung der Faser innerhalb der Wärmesenke erfolgt in mehreren Windungen, so dass die gesamte Faser in einem kompakten (geschlossenen), robusten Gehäuse (Abb. 3) untergebracht wird, welches durch die integrierte Wasserkühlung für den Abtransport der entstehenden Wärme sorgt. Die Anbindung an die Wärmesenke wurde mittels FEM für verschiedene Materialien modelliert und die Temperaturverteilung innerhalb und außerhalb der Faser im Betrieb simuliert (Abb. 2). Durch die Einbettung kann auch bei einer Verlustleistung von bis zu 100 W/m der Faserkern auf Temperaturen unter 120 °C gehalten werden.

#### Literatur:

- /1/ Limpert, J. u.a.: Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation, *Optics Express*, Vol. 11, No. 22 (2003), 2982.
- /2/ Liem, A. u.a.: Air-clad large-mode-area photonic crystal fibers: power scaling concepts up to the multi-kW range, *SPIE Proceedings Vol. 5335* (2004), 158-169.
- /3/ Beckert, E.: Ebene Keramiksubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2005.
- /4/ Deutsches Patent DE 10347450 A1, Keramiksubstrate mit integrierten mechanischen Strukturen zum direkten Fassen von optischen Bauelementen, 2005.

<sup>1</sup> Friedrich-Schiller-Universität, Jena

\* Gefördert durch die Fraunhofer-Gesellschaft, MAVO 814970

# Opto- and thermo-mechanical design of high power fiber lasers

The fiber laser represents one of the most promising concepts for providing optical power in the range of several kilowatts with diffraction limited quality for applications in research and production. In the framework of an internal research program of the Fraunhofer-Gesellschaft\* essential technologies for a kilowatt cw fiber laser system are to be developed and a prototype built. Optical and mechanical key components have been designed. Their behavior under operational conditions has been simulated with the finite element method (FEM). To reach a high pumping efficiency, a specially adapted free space optical system has been designed. To optimize the layout of the system and to estimate the impact on the beam quality and stability the thermo-optical response of the silica lenses has been modeled as a function of the emitted laser power (see Fig. 1). Primarily due to residual absorption in the anti-reflection coatings a thermal lens with an OPD of appr.  $\lambda/6$  evolves at a laser power of 5 kW. The thermal management of the fiber itself is another important challenge. Due to the quantum defect of the laser process the fiber core is heated, resulting in both thermal and mechanical loads on the fiber material /1/. In the worst case the thermal gradient inside the fiber can compromise the beam quality. For this reason, well-adapted packaging concepts for the fiber are necessary /2-4/.

\* Supported by the Fraunhofer-Gesellschaft under MAVO 814970

To provide optimum cooling the outer surface of the fiber is connected to a water-cooled heat sink along its whole length of several meters. This also allows for a stable embedding of the fiber and protects it against environmental influences. The fiber is wound up in a spiral shape, so that its whole length is covered by a robust housing that also carries away the generated heat. The connection between fiber and heat sink has been modeled by FEM to simulate the temperature distribution under operating conditions (see Fig. 2). Even at a power level of 100 W/m the fiber core can be kept at temperatures below 120 °C.

#### References:

- /1/ Limpert, J. u.a.: Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation, Optics Express, Vol. 11, No. 22 (2003), 2982.
- /2/ Liem, A. u.a.: Air-clad large-mode-area photonic crystal fibers: power scaling concepts up to the multi-kW range, SPIE Proceedings Vol. 5335 (2004), 158-169.
- /3/ Beckert, E.: „Ebene Keramiksubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme“, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2005.
- /4/ Deutsches Patent DE000010347450A1, „Keramiksubstrate mit integrierten mechanischen Strukturen zum direkten Fassen von optischen Bauelementen“, 2005.

Abb. 2: Querschnitt durch Faser und Wärmesenke mit Temperaturverteilung bei einer Wärmelast von 100 W/m.

Fig. 2: Cross section of the temperature distribution in fiber and heat sink under a thermal load of 100 W/m.

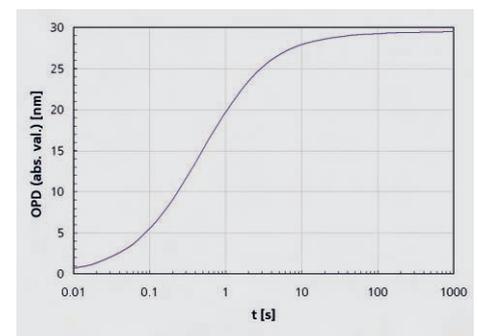
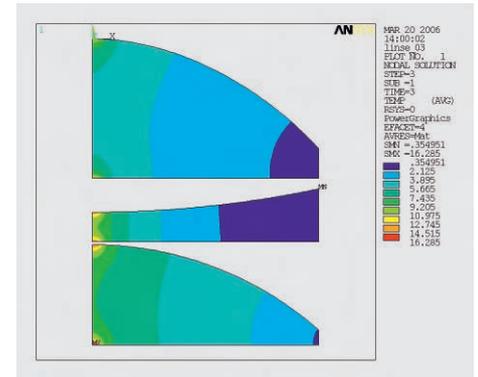
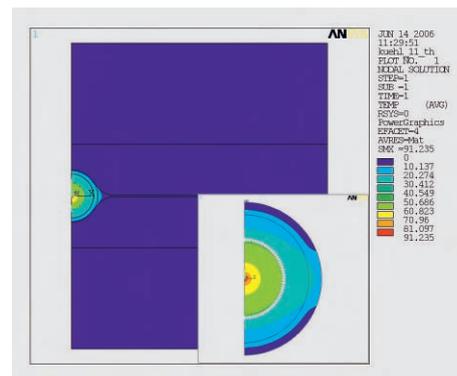


Abb. 1: FEM-Simulation der Temperaturverteilung in der Einkoppeloptik (oben) und der zeitlichen Entwicklung des Wellenfrontfehlers in einer einzelnen Linse (unten) bei einer Strahlleistung von 5 kW.

Fig. 1: FEM-simulation of the temperature distribution in the coupling optics (top) and of the evolution of the corresponding wavefront error in a single lens (bottom) at a laser beam power of 5 kW.

Abb. 3: Laboraufbau zur Kühlung eines kW-Faserlasers.

Fig. 3: Laboratory setup for cooling a kW class fiber laser.





Boris Pradarutti



Claudia Brückner



Stefan Riehemann



Gunther Notni



Gabor Matthaues<sup>1</sup>



Stefan Nolte<sup>1</sup>

THz-Strahlung (0,1 THz – 10 THz) durchdringt Papier, trockenes Holz und die meisten Kunststoffe und besitzt eine hohe Sensitivität bezüglich Wasser. Zudem existieren viele Rotationsübergänge von interessanten Molekülen, so z. B. von organischen Substanzen, Medikamenten und illegalen Drogen, die man mit THz-Strahlung identifizieren und detektieren kann. Um die bestehenden Laborsysteme für den THz-Bereich in industrietaugliche Systeme für Sicherheits- und Qualitätsmanagement zu überführen, ist eine Optimierung der Systeme hinsichtlich Leistungsübertragung, Abbildungsqualität und Kompaktheit erforderlich.

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 /1/. Das hierauf aufbauende THz-Ultrakurzpulssystem wurde bereits in /2/ beschrieben. Zur bildgebenden Darstellung werden Proben in einem fokussierten THz-Strahl abgerastert und vermessen. Auftretende Vielfachpulse werden durch selbst entwickelte Algorithmen getrennt und auf Amplitude, Phasenlage und Spektrum hin analysiert.

Die Auswertung der Absorption ermöglicht die Untersuchung von Kleidung, geschlossenen Paketen und Briefumschlägen auf Drogen und Waffen (Abb. 1). Materialien mit sehr geringem Brechungsindexunterschied weisen in der relativen Phasenlage der ultrakurzen Pulse einen hohen Kontrast auf (Abb. 2). Es lassen sich sowohl Fehlstellen in Proben als auch Dichteschwankungen mit hoher Genauigkeit überprüfen. Durch spezielle Messverfahren konnte die Messzeit für solche Proben um bis zu zwei Größenordnungen verringert werden.

Zur Optimierung von Leistungsübertragung und Abbildungsqualität wird klassisches Ray-Tracing durch wellenoptische Propagationmethoden ergänzt. Abbildung 3 zeigt ein mit ZEMAX optimiertes Systemdesign zum Durchrastern von Testobjekten. Das System ist als doppeltes Gaußstrahlteleskop ausgeführt. Dadurch ist der Gaußsche Strahlradius an der Stelle des Testobjekts, welches sich im Zwischenfokus des Systems befindet, und an der Stelle des Detektors frequenzunabhängig. Durch Verwendung höherer Asphärenkoeffizienten konnte eine beugungsbegrenzte Abbildung realisiert werden. Die Linsen wurden durch Ultrapräzisionsdrehen aus Zeonex®, das im THz-Bereich einen frequenzunabhängigen Brechungsindex besitzt, hergestellt.

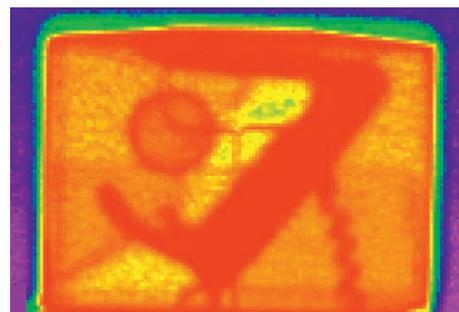
Gefördert im Rahmen der internen Programme der FhG (MAVO 813907).

#### Literatur:

- /1/ 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).
- /2/ Pradarutti, B.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Matthaues, G.; Nolte, S.: Systemtechnische Grundlagen für THz-Imaging Systeme, Jahresbericht Fraunhofer IOF (2005).

Abb. 1: Taschenmesser und Aspirin®-Tablette in einem geschlossenen Paket (Falschfarbendarstellung der THz-Absorption).

Fig. 1: Penknife and Aspirin® pill in a closed parcel (false color representation of THz absorption).



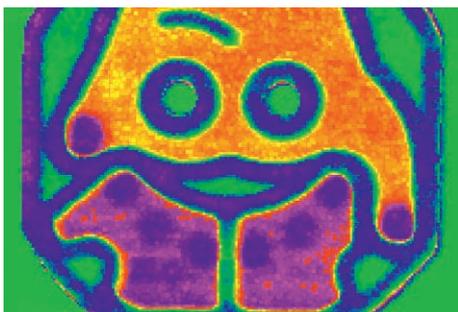
<sup>1</sup> Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik

THz radiation penetrates paper, dry wood and plastics and possesses a high sensitivity to water. Many interesting molecules have rotational transitions e.g. organic substances, pharmaceuticals and drugs, which can be identified and detected by THz radiation. To improve existing laboratory systems to industrial-suited table-top devices for security and quality management applications, optimization with respect to power transmission, image quality and compactness is required.

The basis of the THz system is a femtosecond fiber laser amplifier developed in cooperation with the Institute of Applied Physics (IAP) /1/. This laser sets new standards in robustness, power and compactness. The THz system based on this laser has already been described (see /2/). For imaging, the samples are scanned in a focused THz beam. The resulting multiple pulses are separated and analyzed by self developed algorithms with respect to amplitude, phase and spectra. The analysis of absorption offers possibilities to investigate cloth, closed parcels and envelopes for the detection of drugs or weapons (see Fig. 1).

Abb. 2:  
Polystyrolvorlage zum Metallguss  
(Falschfarbendarstellung der THz-  
Ultraschurzpulsphase).

Fig. 2:  
Polysterene pattern for iron cast (false color  
representation of THz ultrashortpulse phase).



Materials with a low refractive index difference show high contrast in the relative phase of the ultrashort pulses (see Fig. 2). Both imperfections and density inhomogeneities can be identified with high accuracy. Due to special measurement methods the scan time for such samples can be reduced by two orders of magnitudes.

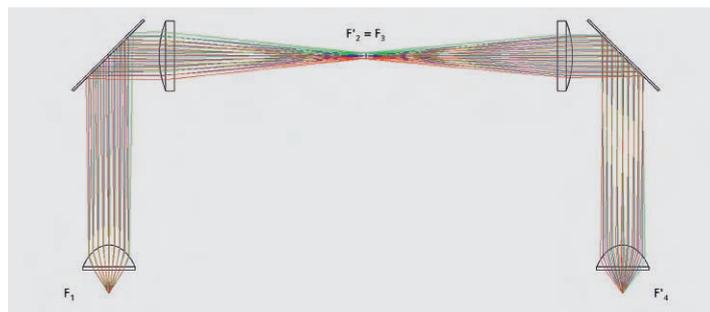
For the optimization of power transmission and image quality, classical ray tracing is supplemented by wave optical propagation methods. Fig. 3 shows a system design for sample scanning optimized by ZEMAX. The system is designed as double Gaussian beam telescope. Therefore the Gaussian beam radius at the place of the sample in the intermediate focus and at the detector position is frequency independent. By using higher aspheric coefficients a diffraction limited image can be realized.

The lenses are produced by single-point diamond turning out of ZEONEX®, which has a frequency independent refractive index for THz wavelengths.

Supported by the FhG internal program (MAVO 813907).

Abb. 3:  
Design eines doppelten Gaußstrahlteleskops in ZEMAX.

Fig. 3:  
Design of a double Gaussian beam telescope in ZEMAX.



## References

- /1/ 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).
- /2/ Pradarutti, B.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Matthaeus, G.; Nolte, S.: Systemtechnische Grundlagen für THz-Imaging Systeme, *Jahresbericht Fraunhofer IOF* (2005).



Henrik Banse



Erik Beckert



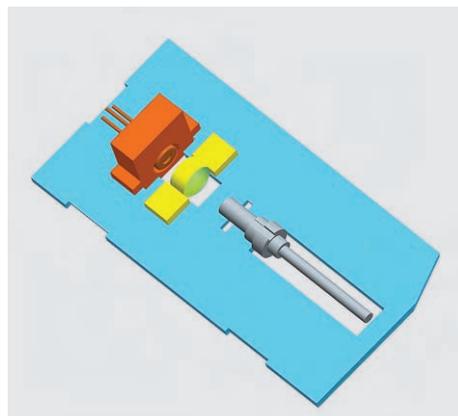
Frank Buchmann <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Askion GmbH, Gera

Als Strahlquelle für die Fluoreszenzmikroskopie wurde zusammen mit der Firma Askion GmbH, Gera, eine fasergekoppelte Laserlichtquelle (Abb. 1) im roten (633 nm) und nahen UV-Wellenlängenbereich (405 nm) aufgebaut. Gefordert wurden ein kompaktes Systemdesign, das Optik und Elektronik auf einer gemeinsamen Plattform integriert und eine langzeitstabile Ausführung der Fügestellen. Nachdem Versuche mit Klebstoffverbindungen zeigten, dass diese bei dauerhafter Einwirkung der Laserstrahlung degradieren und die Stabilität der Koppeffizienz nicht gewährleistet werden konnte, wurde das Laserstrahl-löten als alternatives Fügeverfahren ausgewählt. Im Rahmen des Innovationsclusters JOIN sollte untersucht werden, wie diese Löttechnologie kompatibel zu Verfahren der hybriden Elektronikfertigung ausgeführt werden kann und mit welchem Ergebnis das Fügeverfahren das Justierergebnis der Faserkopplung beeinflusst.

Abb. 1:  
Montierte Faserkopplung.

Fig. 1:  
Fiber-coupling assembly.



Die keramische Systemplattform /1/ zur Montage (Abb. 2) des optoelektronischen Systems basiert auf einer Mehrlagen-Leiterplatte aus LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics), in die Fassungsstrukturen zur Aufnahme der optischen Elemente /2/ eingebettet wurden. Benetzungsflächen auf der Systemplattform zur flussmittelfreien Applikation von Lot während des Fügens der optischen Bauelemente sind sowohl als Dickschicht-Metallisierungen in AgPd und Au als auch als Dünnschicht-Metallisierung Ti/Cr/Au ausführbar /3/. Die Untersuchungen zur Benetzung ergaben, dass nur das Dünnschicht-System bei flussmittelfreier Prozessführung eine reproduzierbare Benetzbarkeit aufwies.

Um den Einfluss des Lötprozesses auf das Justierergebnis der einzelnen Bauelemente zu minimieren, wurden Hilfselemente (Abb. 3) eingesetzt, die unabhängig vom räumlichen Justierzustand des Bauelements jeweils einen minimalen Fügspalt bereitstellen. Die während des Fügevorgangs durch Benetzung des durch einen Laser umgeschmolzenen Lotes AgSn und dessen Abkühlung auf Raumtemperatur auftretende Dejustierung im Bereich weniger Mikrometer wurde experimentell vermessen und ist ausreichend für die geforderte Koppeffizienz. Gegenstand weiterer Arbeiten werden die Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Benetzung und die Qualifizierung der während des Fügens auftretenden systematischen Fehler sein.

#### Literatur:

- /1/ Beckert, E. Ebene Keramiksubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2005.
- /2/ Deutsches Patent DE 10347450 A1, Keramiksubstrate mit integrierten mechanischen Strukturen zum direkten Fassen von optischen Bauelementen, 2005.
- /3/ Banse, H.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Stöckl, W., Laser Beam Soldering – a New Assembly Technology for Microoptical Systems, Microsystems Technologies 11, 2005, S.186-193.

# Laser beam soldered fiber coupling assembly for UV-applications

For fluorescence microscopy a fiber coupled laser source in the red (633 nm) and near UV-wavelength (405 nm) range has been developed (Fig. 1) together with Askion GmbH, Gera. Requirements were not only a compact system design that integrates optics and electronics on a common platform, but also, especially for the UV laser source, a long-term stable design of the joints within the assembly. First experiments with adhesively bonded optical elements showed that the joints significantly degraded under constant impact of UV radiation, thus lowering the fiber coupling efficiency. Consequently, laser beam soldering was chosen as a promising alternative. Within the innovation cluster JOIN framework the adaptability of the

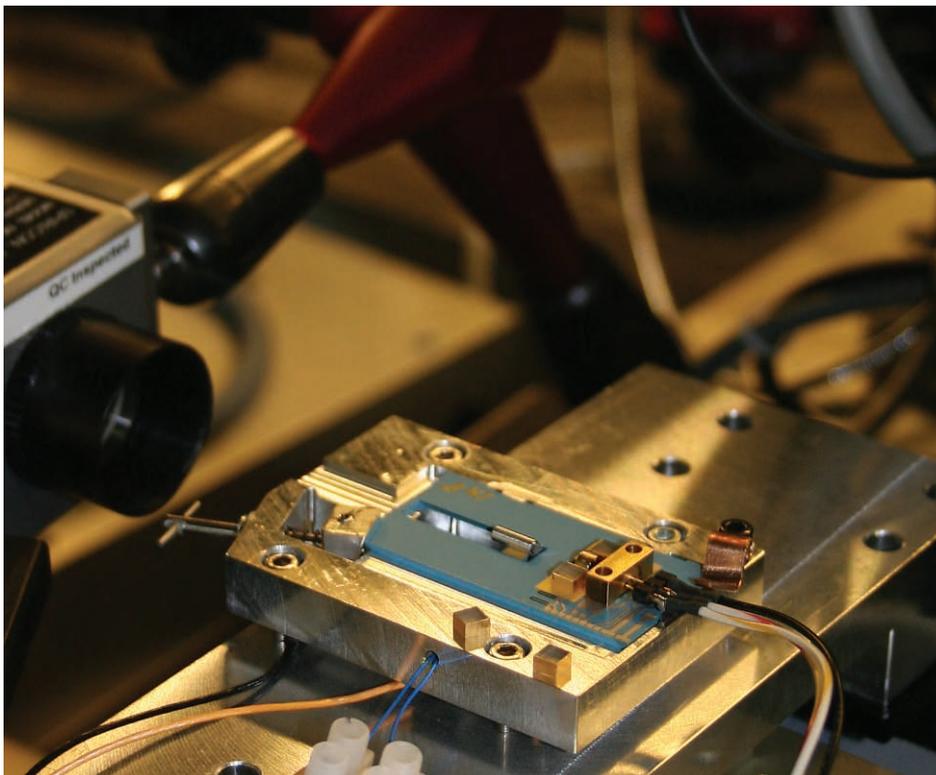
soldering technology to technologies of hybrid electronics manufacturing and the influence of this joining technology on the alignment and long-term stability of the fiber coupling assembly was investigated. Figure 2 shows the ceramic system platform /1/ for the assembly of the opto-electronic system. Within this platform, provided by a multilayer printed circuit board made of LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics), mounting structures are embedded /2/ for easy assembly of the optical components. Wetting surfaces for a flux-free application of solder during joining of the optical components were created by standard thick film printing of AgPd and Au, but also by thin film application of a Ti/Cr/Au metallization /3/. Investigations of their wettability

showed that only the thin film system provides a reproducible wetting behavior.

In order to minimize the influence of the solder process on the aligned position of the individual optical components, guiding elements (Fig. 3) were introduced that minimize the joining gap independent of the actual alignment state. Thus the AgSn-solder, reflowed by a laser, lead to a misalignment only in the range of a few microns during wetting and cooling down again to room temperature. This was measured to be sufficient for the required coupling efficiency. Future work will concentrate on the optimization of the wetting behavior and the evaluation of systematic errors during laser beam soldering.

Abb. 2:  
LTCC-Systemplattform.

Fig. 2:  
LTCC system platform.

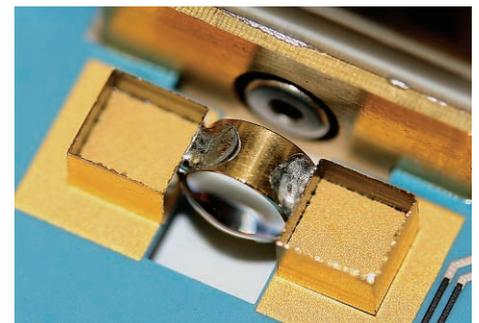


## References:

- /1/ Beckert, E.: Ebene Keramiksubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2005.
- /2/ German Patent DE000010347450A1, Keramiksubstrate mit integrierten mechanischen Strukturen zum direkten Fassen von optischen Bauelementen, 2005.
- /3/ Banse, H.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Stöckl, W.: Laser Beam Soldering – a New Assembly Technology for Microoptical Systems, Microsystems Technologies 11, 2005, S.186-193.

Abb. 3:  
Hilfselemente zur Minimierung des Fügespalts.

Fig. 3:  
Elements to reduce the joining gap.



# Metamaterialien mit negativem Brechungsindex für die Überwindung der Abbeschen Auflösungsgrenze



Thomas Pertsch <sup>1</sup>



Carsten Rockstuhl <sup>1</sup>



Uwe Hübner <sup>2</sup>



Christoph Etrich <sup>1</sup>



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

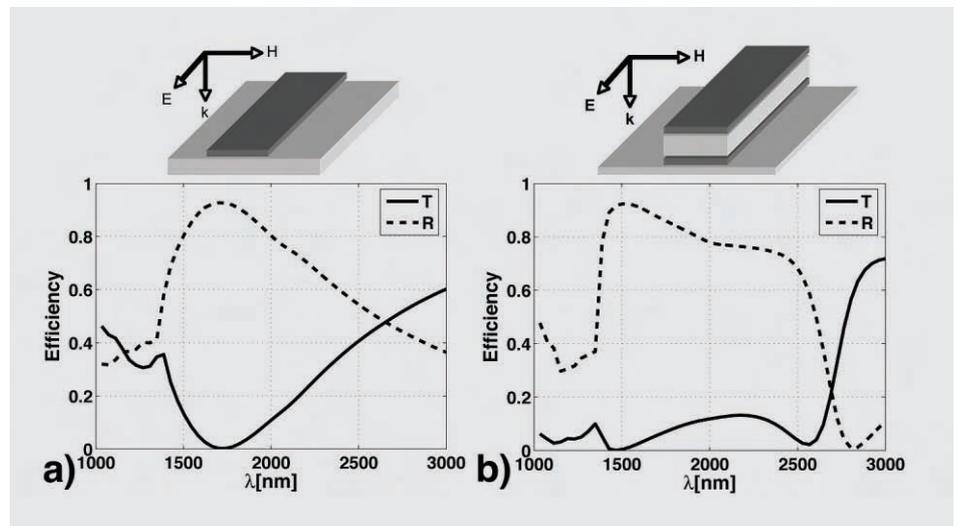
## Einleitung

In natürlichen Kristallen sind die Atome periodisch mit Gitterkonstanten von 0,5 nm angeordnet. Diese Abstände sind um Größenordnungen kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. Da das einfallende Licht diese räumlichen Details nicht auflöst, kann das Material als ein effektives homogenes Medium beschrieben werden. In natürlichen Materialien sind die molekularen elektrischen Dipole bei Frequenzen des Lichtes aktiv. Sie werden durch die elektrische Feldkomponente angeregt. Magnetische Dipole, die aktiv auf das hochfrequente magnetische Feld des Lichtes reagieren könnten, wurden trotz intensiver Suche in natürlichen Materialien bis jetzt nicht gefunden. Als elektromagnetische Metamaterialien (MM) werden künstlich hergestellte Metall-Dielektrika Kompositstrukturen bezeichnet, die ebenfalls charakteristische Strukturdimensionen besitzen, die wesentlich kleiner als die Wellenlänge

der einfallenden Strahlung sind /1-5/. Somit können Metamaterialien auch durch effektive Materialparameter beschrieben werden. Die Materialeigenschaften sind aber durch die Einstellung der Resonanzeigenschaften der einzelnen Metallstrukturen theoretisch viel weiter wählbar, als in natürlichen Materialien. Neben den aus natürlichen Materialien bekannten aktiven elektrischen Dipolen, sind in Metamaterialien auch aktive magnetische Dipole herstellbar. Dies bewirkt neben der Anregung der elektrischen Dipole durch das elektrische Feld und damit einer Beeinflussung der effektiven Permittivität, auch eine Anregung der magnetischen Dipole durch das magnetische Feld und damit eine Änderung der effektiven Permeabilität. Verschiedene Geometrien, welche entweder die elektrische oder die magnetische Resonanz oder beide Resonanzen aufweisen, wurden bereits für unterschiedliche spektrale Bereiche vorgeschlagen. Eine gleichzeitige starke Anregung der elektrischen und magnetischen Resonanz in

Abb. 1: Transmission (T) und Reflexion (R) simuliert mit Rigorous Diffraction Theory a) für einen Nanodraht, b) für ein Nanodrähtepaar mit einer 180 nm PMMA Schicht.

Fig. 1: Transmission (T) und Reflection (R) simulated with rigorous diffraction theory a) for a nanowire, b) for a pair of nanowires with a dielectric PMMA layer of 180 nm between the wires.



- <sup>1</sup> Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik
- <sup>2</sup> Institut für Physikalische Hochtechnologie Jena
- <sup>3</sup> GmBU Halle/S.
- <sup>4</sup> Fraunhofer IOF

# Metamaterials with negative refraction index for overcoming the Abbe limit

## Introduction

Response to the electric and magnetic fields of light waves in a conventional crystal is determined by a collective response of periodically arranged atoms or molecules. In a typical situation of interaction between electro-magnetic waves and a matter, sizes of the atoms or molecules are of an order of magnitude smaller than the wavelength of light. Due to this fact such material can be considered as a homogeneous medium. In this medium phase velocity may depend on the propagation direction and the electrical dipoles can be in resonance with the frequency of incoming light. In contrast, any active natural "magnetic dipoles" which would be induced by an incoming light have not yet been found.

Electromagnetic metamaterials (MM) are often artificial metal-dielectric composite structures with metal-metal distances that are still smaller than the wavelength of light [1-5]. Therefore such materials can also be described by effective material parameters. Properties of such materials are adjustable in a broader way than in conventional materials by controlling the resonances associated with a single metal structure. In metamaterials it becomes possible to fabricate electric dipoles as well as magnetic ones. Therefore it is evident that the excitation of a resonance of the electric field will influence the effective permittivity, whereas a resonance of the magnetic field will alter the effective permeability. Recently, various geometries, which exhibit either electric, magnetic or both resonances in different frequency domains have been proposed. A simultaneous excitation of the electric and magnetic resonances at the same frequency allows for the creation of a medium with a negative refractive index (negative index material (NIM)). In this material

a series of counterintuitive physical effects, like reverse Snell' law, reverse Doppler and Cherenkov effects, and amplification of the evanescent waves have been predicted. Using some of the properties makes it possible to realize imaging systems with sub-wavelength resolution.

## Theoretical description

Metal-dielectric composite structures consisting of single or paired gold nanowires, separated by a thin PMMA or SiO<sub>2</sub> film on a glass substrate are shown in Fig. 1. The transmission and reflection in Fig. 1 has been simulated by using a rigorous diffraction theory, and permittivity of gold has been described by a Drude model. A parameter retrieval algorithm has been used in order to determine effective permittivity and permeability – see Fig. 2.

A single plasmonic resonance is produced by illuminating a single gold nanowire structure. The resonance can be spectrally tuned by tailoring the geometrical parameters of the gold nanowire. Double nanowire structures consist of two gold nanowires and a dielectric spacing layer between them. These structures can produce magnetic and electric resonances in different spectral ranges. Spectral position of the magnetic resonance is controllable by increasing of the height of the dielectric layer (Fig. 3).

A 3D FDTD simulation of magnetic field distribution has been performed in order to identify the type of resonances. A current in the nanowires induces circular magnetic fields with opposite flow directions, as shown in Fig. 4c. In the upper wire the magnetic field is directed clockwise whereas it is counterclockwise in the lower one.



Arkadi Chipouline <sup>1</sup>



Ulf Bauerschäfer <sup>3</sup>



Frank Garwe <sup>1</sup>



Falk Lederer <sup>1</sup>



Andreas Tünnermann <sup>1,4</sup>

einem bestimmten spektralen Bereich an derselben Struktur oder in zwei Strukturen einer Einheitszelle, welche wesentlich kleiner als die Wellenlänge sind, ermöglicht es in diesem engen spektralen Bereich ein Medium mit einem negativen Brechungsindex zu erzeugen (Negativ-Index-Materialien (NIM)). Diese Materialien besitzen eine Reihe interessanter physikalischer Eigenschaften. So zeigen sie einen umgekehrten Snell'schen Brechungswinkel, umgekehrte Doppler- und Cherenkov-Effekte und können evaneszente Wellen verstärken. Einige dieser Eigenschaften würden es ermöglichen, Abbildungssysteme mit sub-Wellenlängen-Auflösung zu realisieren.

## Theoretische Beschreibung

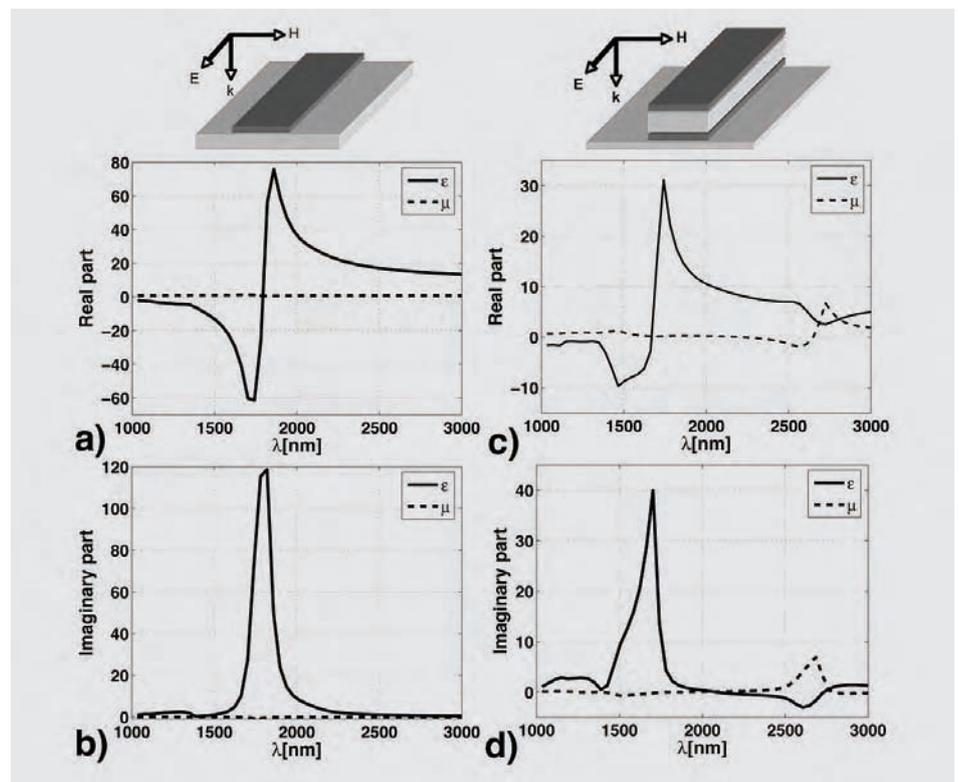
Abbildung 1 oben zeigt schematisch Metall-Dielektrika Kompositstrukturen, welche aus einfachen oder gepaarten Gold-Nanodrähten mit einer zwischenliegenden PMMA oder SiO<sub>2</sub> Schicht auf einem Glassubstrat bestehen. Die Transmissions- und Reflexionseigenschaften in Abb. 1 sind mit Hilfe der Fourier-Modal-Methode simuliert worden. Die Permittivität von Gold ließ sich gut durch das Drude-Modell beschreiben und die effektiven Materialparameter konnten durch Anwendung eines Parameter-Retrieval Algorithmus ermittelt werden (Abb. 2).

Abb. 2:

Für Systeme aus Abb. 1 mit dem Parameter Retrieval Algorithmus berechneter Realteil (a, c) und Imaginärteil (b, d) für die Permittivität und die Permeabilität.

Fig. 2:

Real (a, c) and imaginary parts (b, d) of permittivity and permeability for systems shown in Fig.1 calculated with parameter retrieval algorithm.



These properties of the current are strong evidence that the permeability resonance can be compared with an effective LC oscillator. The flow of the current is effected by an electric field that acts as a driving force for the movement of the electrons.

However, application of the parameter retrieval algorithm to this specific geometry is impossible without ambiguity. The reason is the significantly increased sample thickness, which complicates an identification of the correct order in inverse trigonometric functions. However, the small maxima in the region of minimum transmission in Fig. 5e provide evidence for a negative refraction index in a small spectral range. For another structure with a smaller dielectric layer (Fig. 5c), a negative refraction index can be found (Fig. 5f).

## Realization

All nanostructures were realized with the help of layer-by-layer technology. An intrinsic advantage of this technology is the possibility of tailoring cell geometry in each layer independently. Figures 5a and 5b show an AFM scan and a REM image of paired gold nanorods and different thicknesses of dielectric layers between them. The samples demonstrate a high accuracy of the multilayer alignment. The measured and simulated reflection and transmission spectra show two spectrally well-separated resonances (Fig. 5d) for a small spacing. The electric resonance at 1500 nm is associated with plasmonic excitation of currents in both nanowires at equal phase, the magnetic resonance at 2750 nm is associated with currents in both nanowires at a phase delay of  $\pi$ .

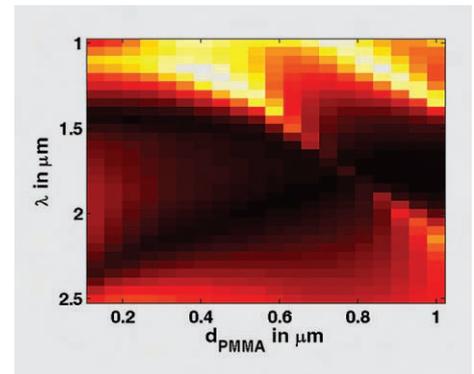
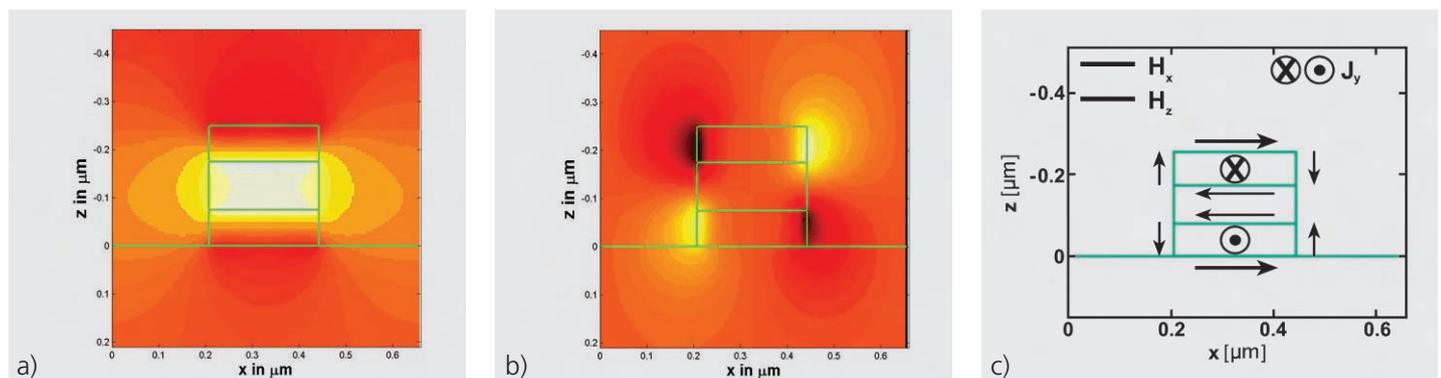


Abb. 3: Transmittierte Amplitude als Funktion der Dicke der PMMA Schicht und der Wellenlänge (schwarz = Resonanz oder Minimum der Transmission).

Fig. 3: Transmitted amplitude as a function of the thickness of spacing layer and the wavelength. (black = resonances or minimum of transmittance).

Abb. 4:  
3D FDTD Simulation eines Nanodrahtpaares mit dünner PMMA Schicht bei der Wellenlänge der magnetischen Resonanz.  
a)  $H_x$  Komponente in einem  $(x,z)$ -Schnitt;  
b)  $H_z$  Komponente in einem  $(x,z)$ -Schnitt;  
c) schematische Darstellung des oszillierenden Feldes, der induzierte Strom fließt in den Drähten in entgegengesetzte Richtungen.

Fig. 4:  
3D FDTD simulation of the magnetic field in a gold nanowire pair with a 100 nm PMMA layer between at the wavelength of magnetic resonance.  
a)  $H_x$  component in a  $(x,z)$ -cut;  
b)  $H_z$  component in a  $(x,z)$ -cut, the illuminating field propagates in positive  $z$ -direction and has an  $x$ -component of the magnetic field;  
c) oscillating field is schematic shown that induces currents that flow in opposite direction within the two wires.



Bei der Einstrahlung von Licht auf eine einfache Gold-Nanodrahtstruktur wird nur eine plasmonische Resonanz erzeugt, welche durch Veränderung der geometrischen Parameter des Gold-Nanodrahtes spektral verschoben werden kann. Doppelstrukturen, welche aus zwei Gold-Nanodrähten und einer in der Mitte liegenden dielektrischen Schicht bestehen, können eine magnetische und eine plasmonische Resonanz in zunächst verschiedenen spektralen Bereichen erzeugen.

Durch Erhöhung der Dicke der dielektrischen Schicht lässt sich die Lage der magnetischen Resonanz kontrollieren (Abb. 3).

Die Art der Resonanzen konnte durch FDTD-Simulation der magnetischen Feldverteilung, welche mit induzierten Strömen verbunden ist, untersucht werden (Abb. 4). Hier sind zirkuläre Magnetfelder mit entgegengesetzten Richtungen in den einzelnen Nanodrähten zu erkennen. Diese oszillierenden Felder induzieren einen Strom, welcher entgegengesetzt in den Nanodrähten fließt. Das lässt darauf schließen, dass die Permeabilitätsresonanz mit einem effektiven LC-Oszillator verglichen werden kann. Der Stromfluss wird durch ein elektrisches Feld bewirkt, welches als eine zusätzliche treibende Kraft für die Elektronen gesehen werden kann.

Aufgrund der dicken dielektrischen Zwischenschicht kann für diese Doppelstrukturen nicht mehr der Parameter-Retrieval-Algorithmus zur Berechnung der Materialparameter angewandt werden. Jedoch lässt die Aufspaltung des Transmissionsminimums auf einen schmalen spektralen Bereich mit negativem Brechungsindex schließen. An anderen Strukturen mit nicht so dicken dielektrischen Schichten (Abb. 5c) lässt sich ein negativer Brechungsindex simulieren.

---

## Realisierung

Die oben beschriebenen Strukturen sind durch eine Layer-by-Layer Herstellung realisiert worden. Der Vorteil dieser Technologie besteht in der Möglichkeit der Herstellung unabhängiger Geometrien in jedem Layer. Abbildungen 5a und 5b zeigen eine AFM und eine Quasi 3D REM Aufnahme von Feldern gepaarter Nanodrahtstrukturen mit verschiedenen dicken dielektrischen Zwischenschichten. Diese Aufnahmen demonstrieren die hohe Genauigkeit der Multi-Layer Anordnungen. Die gemessenen und gerechneten Reflektions- und Transmissionsspektren für die Struktur in Abb. 5a zeigen in Abb. 5d eine elektrische Resonanz bei 1500 nm und eine magnetische Resonanz bei 2750 nm, wobei die elektrische Resonanz mit der phasengleichen plasmonischen Anregung von Strömen in beiden Nanodrähten verbunden ist, während die magnetische Resonanz durch eine phasenverschobene Anregung der Ströme in den beiden Nanodrähten zustande kommt.

Wird die dielektrische Schicht zwischen den Nanodrähten groß genug gewählt, überdecken sich beide Resonanzen im Spektralbereich und es entsteht ein kleines Maximum in der Transmission bei 1900 nm (Abb. 5e und Insert in Abb. 5e).

In einer weiteren Probenserie wurden die Gold-Nanodrahtpaare mit einem gepaarten Gold-Nanogitter in einer Einheitszelle kombiniert. Für die Strukturen wirkt das Gitter als ein verdünntes Metall, welches die effektive Permittivität verändert. In dieser Konfiguration ist die Permittivität für Frequenzen kleiner der Plasmafrequenz negativ und somit wird der Brechungsindex im spektralen Bereich der magnetischen Resonanz negativ (Abb. 5f).

Diese Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (Unternehmen Region) unterstützt.

## Literatur:

- /1/ Pendry, J. B.; Holden, A. J.; Robbins, D. J., Stewart, W. J.: Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 47, 2075 (1999).
- /2/ Smith, D. R.; Padilla, W. J.; Vier, D. C.; Nemat-Nasser, S. C.; Schultz, S.: Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Phys. Rev. Lett.* 84, 4184 (2000).
- /3/ Shalaev, V. M.; Cai, W.; Chettiar, U. K.; Yuan, H.; Sarychev, A. K.; Drachev, V. P.; Kildishev, A. V.: Negative index of refraction in optical metamaterials *Opt. Lett.* 30, 3356 (2005).
- /4/ Garwe, F.; Rockstuhl, C.; Etrich, C.; Hübner, U.; Bauerschäfer, U.; Setzpfandt, F.; Augustin, M.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.; Lederer, F.: Evaluation of gold nanowire pairs as a potential negative index material, *Appl. Phys. B* 84, 139 (2006).
- /5/ Dolling, G.; Enkrich, C.; Wegener, M.; Soukoulis, C. M.; Linden, S.: Simultaneous Negative Phase and Group Velocity of Light in a Metamaterial, *Science*, 312, 892 (2006).

By changing the spacing between the nanowires the higher wavelength resonance is primarily affected, shifted towards the smaller wavelength region. By an appropriate choice of the spacing both resonances may coincide and a small maximum in the transmission minimum arises at 1900 nm (Fig. 5e and insert in Fig. 5e).

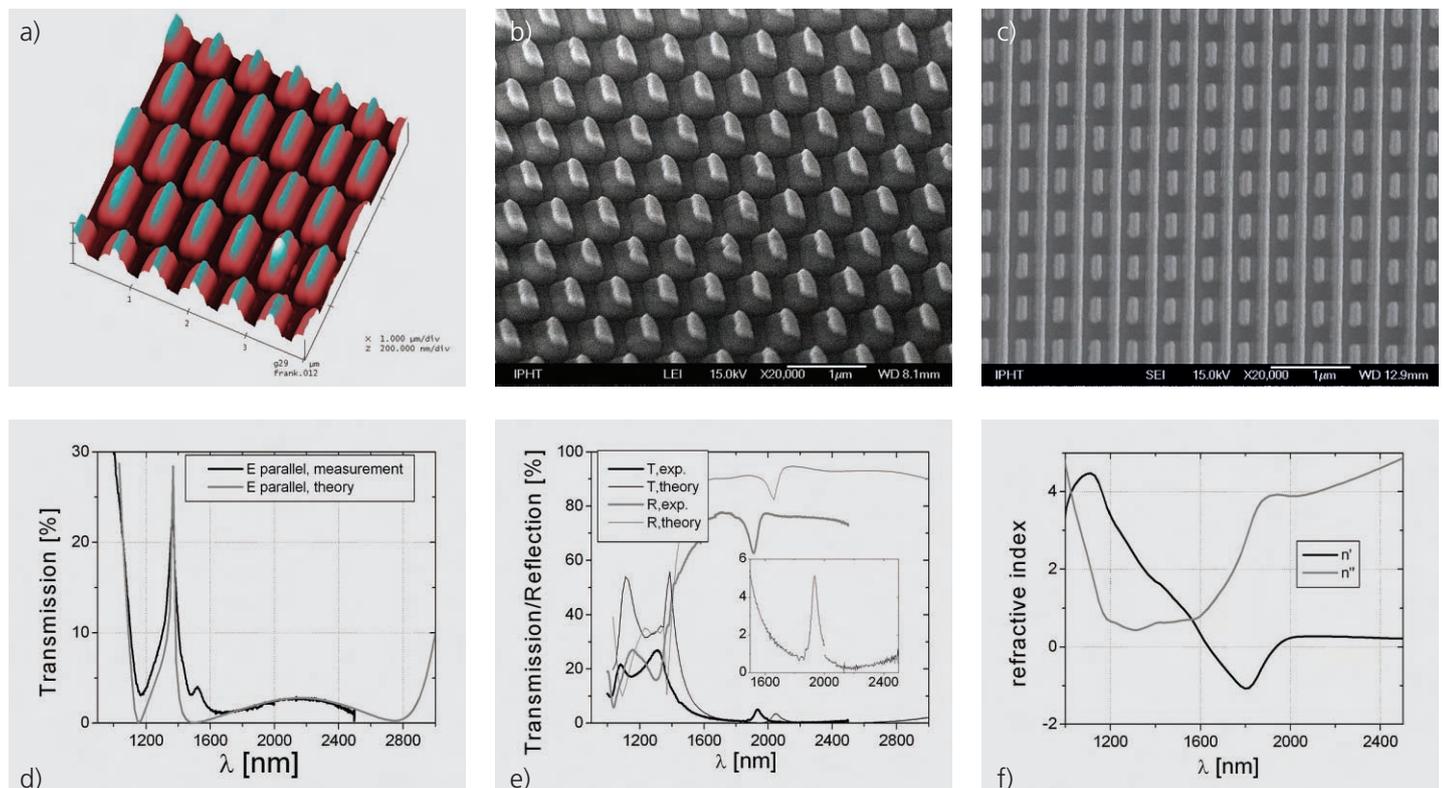
In a second series of samples gold nanorod pairs were combined with gold nanograting pairs in the unit cell (Fig.5c). The nanograting acts as a diluted metal to alter an effective permittivity according to a Drude-type dispersion relation. As the effective permittivity in such configuration is negative for frequencies smaller than the plasma frequency, a negative refractive index has been obtained in the vicinity of the magnetic resonance (Fig. 5f).

Abb. 5:

a) AFM Aufnahme eines Feldes von Gold-Nanodrahtpaaren mit 180 nm SiO<sub>2</sub> Zwischenschicht; b) Quasi 3D REM Aufnahme eines Feldes von Gold-Nanodrahtpaaren mit 600 nm SiO<sub>2</sub> Zwischenschicht; c) REM Aufnahme eines Feldes von gepaarten Gold-Nanodrähten mit gepaarten Gold-Nanogittern; d) Vergleich von Simulation und Experiment für die Transmission und Reflexion der Strukturen in a); e) Vergleich von Simulation und Experiment für die Transmission und Reflexion der Strukturen in b); f) simulierter Brechungsindexverlauf für Strukturen in c).

Fig. 5:

a) AFM image of gold nanowires separated by 180 nm SiO<sub>2</sub>; b) Quasi 3D REM image of gold nanowires separated by 600 nm of SiO<sub>2</sub>; c) REM image of combination of gold nanorod pairs with gold nanograting pairs; d) simulated and measured transmission spectra for the structure in a); e) simulated and measured transmission and reflection spectra of the structure in b); f) simulated effective refractive index for the structure in c).



Support bei the Federal Ministry of Education and Research (Unternehmen Region) is acknowledged.

References:

- /1/ Pendry, J. B.; Holden, A. J.; Robbins, D. J., Stewart, W. J.: Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 47, 2075 (1999).
- /2/ Smith, D. R.; Padilla, W. J.; Vier, D. C.; Nemat-Nasser, S. C.; Schultz, S.: Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, Phys. Rev. Lett. 84, 4184 (2000).
- /3/ Shalaev, V. M.; Cai, W.; Chettiar, U. K.; Yuan, H.; Sarychev, A. K.; Drachev, V. P.; Kildishev, A. V.: Negative index of refraction in optical metamaterials Opt. Lett. 30, 3356 (2005).
- /4/ Garwe, F.; Rockstuhl, C.; Etrich, C.; Hübner, U.; Bauerschäfer, U.; Setzpfandt, F.; Augustin, M.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.; Lederer, F.: Evaluation of gold nanowire pairs as a potential negative index material, Appl. Phys. B 84, 139 (2006).
- /5/ Dolling, G.; Enkrich, C.; Wegener, M.; Soukoulis, C. M.; Linden, S.: Simultaneous Negative Phase and Group Velocity of Light in a Metamaterial, Science, 312, 892 (2006).

# Lichtpropagation in fs-Lasergeschriebenen Wellenleitern



Alexander Szameit <sup>1</sup>



Jonas Burghoff <sup>1</sup>



Stefan Nolte <sup>1</sup>



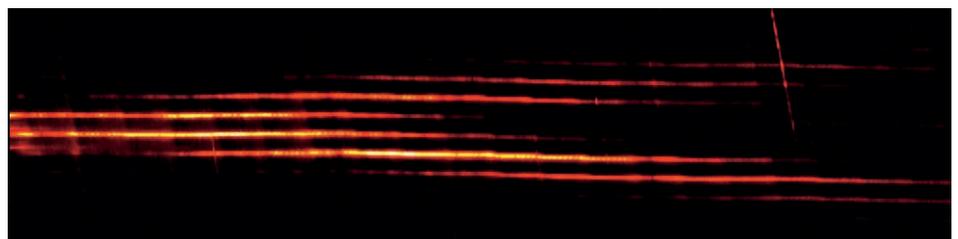
Andreas Tünnermann <sup>1,2</sup>

Mit Hilfe ultrakurzer Laserpulse im Femtosekundenbereich lassen sich die optischen Eigenschaften transparenter Materialien gezielt verändern. Werden diese intensiven Pulse in ein Volumenmaterial fokussiert, so kommt es im Fokus zu nichtlinearer Absorption, was in einem optischen Durchbruch und der Bildung eines Mikroplasmas resultieren kann. Daraus resultieren Bindungsbrüche, strukturelle Änderungen und die Ausbildung von Spannungen, die zu einer lokalen permanenten Veränderung des Brechungsindex führen. Durch Bewegen des Fokus lassen sich so ausgedehnte Strukturen erzeugen, in denen Licht geführt werden kann. So können z. B. vergrabene Wellenleiter im Inneren verschiedenster transparenter Gläser realisiert werden <sup>/1/</sup>. Durch die dreidimensionale Geometrie lassen sich Kreuzungspunkte leicht vermeiden und die Packungsdichte erhöhen. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die lokale periodische Brechzahlmodifikation in Fasern und Wellenleitern, wodurch flexibel Faser-Bragg-Gitter <sup>/2/</sup> auch in nicht photosensitiven Fasern realisiert werden können.

Die Technologie des direkten Einschreibens von Wellenleitern in das Volumen transparenter Materialien mit Hilfe von fs-Pulsen kann relativ einfach auf die Erzeugung verschiedener ein- und zweidimensionaler Wellenleiterarrays erweitert werden <sup>/3/</sup>. Solche Wellenleiterarrays eignen sich als Modell für die Untersuchung der Physik diskreter Systeme. Dabei unterscheidet sich die Lichtausbreitung in diskreten Wellenleitersystemen fundamental von der Lichtausbreitung in herkömmlichen (isotropen) Medien. Dies führt zu einer Vielzahl an ungewöhnlichen und interessanten Effekten, deren genaues Verständnis für eine spätere technologische Nutzung unabdingbar ist. In Wellenleiterarrays, in denen die einzelnen Wellenleiter dicht genug beieinander liegen, können die Wellenleiter nicht mehr einzeln betrachtet werden. Vielmehr koppelt das Licht evaneszent von einem Wellenleiter in seine Nachbarwellenleiter über, was dazu führt, dass sich das Licht selbst bei ursprünglich nur einem angeregten Wellenleiter im Laufe der Lichtausbreitung über mehrere Wellenleiter verteilt.

Abb. 1:  
Lichtausbreitung in einem fs-geschriebenen Wellenleiterarray, wobei in zwei benachbarte Wellenleiter eingekoppelt wurde. Eine direkte Visualisierung ist über die Fluoreszenz von Farbzentren, die den Wellenleitern überlagert sind, möglich.

Fig. 1:  
Light propagation in a fs-written waveguide array. The light is coupled into two adjacent waveguides. A direct visualization is realized by observing the fluorescence of color centers collocated with the waveguides.



# Propagation of light in femtosecond laser written waveguides

Ultra-short laser pulses with duration in the femtosecond range permit the modification of the optical properties of transparent materials. When these intense pulses are focused into the bulk of a transparent material, nonlinear absorption in the focal volume takes place. At sufficiently high intensities this will lead to optical breakdown and the formation of a micro-plasma, resulting in bond breaking, structural changes and induced stress. As a consequence the refractive index will be permanently modified at the location of the laser focus. By moving the sample with respect to the focal spot, buried refractive index profiles can be generated in various transparent glasses which allow guiding of light /1/. Due to the three-dimensional flexibility, crossings can be easily avoided and the packaging density can be significantly increased in such optical network architecture. Further applications can be found in localized periodic refractive index changes in waveguides and fibers. Here, this technique allows the flexible realization of Fiber-Bragg gratings even in non-photosensitive fibers /2/.

It is straightforward to use the fs direct writing technology for the fabrication of one- and two-dimensional waveguide arrays /3/. Such waveguide structures serve as a model for investigating the behavior of discrete systems. In these devices the light propagation is fundamentally different from light propagation in conventional (isotropic) media. This leads to numerous unusual and interesting effects, which require an exact understanding before any technical exploitation.

If the waveguides within the array are stacked closely together the optical properties of the system are no longer defined by the single waveguides. Instead light couples from one waveguide to another via the evanescent field. This leads to a spreading of the intensity distribution even if only one waveguide is excited. To study these effects, a direct visualization of the light propagation would be ideal. However, scattered light cannot be used in this case due to the low propagation losses. Instead, use can be made of color centers which are generated during the writing process. Their fluorescence can be directly used to monitor the light propagation. This works extremely well in OH rich fused silica as was shown recently (Fig. 1).

In addition to linear light propagation, nonlinear effects arising at high intensities are of special interest in discrete media. In glasses the nonlinear Kerr-effect starts to balance the evanescent coupling for increasing input power. As a consequence, the light is trapped in the excited waveguide – a so-called discrete spatial soliton is formed (Fig. 2). The formation and propagation of these solitons is especially interesting in two-dimensional waveguide arrays /4/. While the solitons are stable in the arrays, no stable solutions can be found in isotropic media. This makes the array structures interesting candidates for opto-optical switches. However, one has to be aware that the fs-direct writing process does not only modify the linear but also the nonlinear optical properties /5/. This can be used as an additional degree of freedom in the design of such nonlinear waveguide arrays.

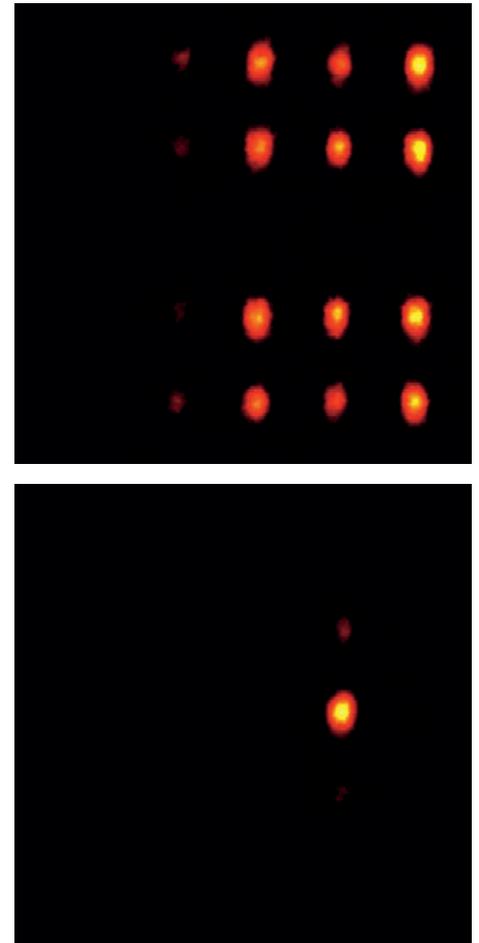


Abb. 2: Intensitätsverteilung am Ende eines 5 x 5 Wellenleiterarrays bei geringer (oben) und hoher (unten) Eingangsleistung. Die Ausbildung eines diskreten Solitons, dessen Intensitätsverteilung sich bei der Propagation nicht ändert, kann so beobachtet werden.

Fig. 2: Near-field intensity distribution at the exit of a 5 x 5 waveguide array for low (top) and high (bottom) input power. The formation of a discrete spatial soliton is visible.

Für eine Untersuchung dieser Effekte ist die direkte Visualisierung der Lichtverteilung während der Propagation wünschenswert, aufgrund der geringen Streulichtverluste jedoch nur schwer zu realisieren. Eine direkte Visualisierung gelingt allerdings durch Detektion der Fluoreszenz von Farbzentren, die bei der Wellenleiterherstellung erzeugt werden. Wie wir kürzlich zeigen konnten, funktioniert dies besonders effizient in OH-reichem Quarzglas (Abb. 1).

Neben der angesprochenen linearen Lichtausbreitung ist insbesondere die Erforschung nichtlinearer Effekte in diskreten Medien, die bei der Propagation von Licht bei hohen Intensitäten auftreten, ein wichtiger Aspekt. In Gläsern sorgt der nichtlineare Kerr-Effekt bei ansteigender Eingangsleistung zu einer Kompensation der evaneszenten Kopplung – das Licht ist im angeregten Wellenleiter »gefangen« (Abb. 2). Die Bildung und Ausbreitung solcher sog. räumlichen Solitonen ist insbesondere in zweidimensionalen Wellenleiterarrays interessant /4/. In solchen diskreten Strukturen sind die Solitonen stabil – im Gegensatz zu isotropen Medien. Damit sind diese Strukturen beispielsweise für opto-optische Schalter interessant. Allerdings konnten wir beobachten, dass nicht nur der lineare, sondern auch der nichtlineare Brechungsindex durch die Laserstrukturierung verändert wird /5/\* . Dies bietet einen weiteren Designfreiheitsgrad bei der Realisierung nichtlinearer Wellenleiterarrays.

Besonders interessant ist die Erweiterung der Technologie fs-geschriebener Wellenleiter auf kristalline Materialien. Hier ist neben der Ausnutzung kubischer nichtlinearer Effekte vor allem die Untersuchung quadratischer nichtlinearer Effekte von Bedeutung, die in Gläsern nicht auftreten. Neben Wellenleitern in kristallinem Silizium – die Basis für eine elegante Kombination von Optik und Elektronik auf einem Chip – /6/ konnten wir jüngst dämpfungsarme Wellenleiter in Lithiumniobat erzeugen. In diesen Wellenleitern gelang durch Phasen Anpassung Frequenzverdopplung von Laserstrahlung bei 1064 nm auf 532 nm (Abb. 3). Die Konversionseffizienz betrug 49 %, was einer normierten Konversionseffizienz von 0,6 %/(W cm<sup>2</sup>) entspricht /7/. Die Ausnutzung des elektrooptischen Effektes eröffnet zudem das Potential für eine direkte Modulation der Phase, was für die Realisierung eines elektrooptischen Modulators genutzt werden kann.

Teile dieser Arbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert (Schwerpunktprogramm 1157 und Forschergruppe 532). Jonas Burghoff wird durch den Schott-Jenaer-Glas-Fonds und Alexander Szameit durch die Jenoptik AG unterstützt.

Literatur:

- /1/ Itoh, K.; Watanabe, W.; Nolte, S.; Schaffer, C. B.: Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials, *MRS Bulletin* 31, 620 – 625 (2006).
- /2/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortac, B.; Limpert, J.; Nolte, S. Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium Fiber Laser based on intracore femtosecond written Fiber Bragg Grating, *Opt. Lett.* 31, 2390 – 2392 (2006).
- /3/ Szameit, A.; Blömer, D.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Hexagonal Waveguide Arrays Written with fs-Laser Pulses, *Appl. Phys. B* 82, 507 – 512 (2006).
- /4/ Szameit, A.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.: Two-dimensional soliton in cubic fs laser written waveguide arrays in fused silica, *Opt. Express* 14, 6055 – 6062 (2006).
- /5/ Blömer, D.; Szameit, A.; Dreisow, F.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Nonlinear refractive index of fs-laser-written waveguides in fused silica, *Opt. Express* 14, 2151 – 2157 (2006).
- /6/ Nejadmalayeri, A. H.; Herman, P. R.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of optical waveguides in crystalline silicon by mid-infrared femtosecond laser pulses, *Opt. Lett.* 30, 964 – 966 (2005).
- /7/ Burghoff, J.; Grebing, C.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Efficient frequency doubling in femtosecond laser-written waveguides in lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.* 89, 081108 (2006).

Another interesting topic is the transfer of the fs-direct writing approach to crystalline media. Alongside cubic non-linearity, quadratic nonlinear effects which cannot be found in glasses are especially important. Apart from waveguides in crystalline silicon providing the basis for an elegant combination of optics and electronics onto the same chip /6/ low loss waveguides in lithium niobate could recently be manufactured. These waveguides allowed phase-matched frequency doubling of 1064 nm laser radiation with a conversion efficiency of 49 % corresponding to a normalized conversion efficiency of  $0.6 \text{ \%}/(\text{W cm}^2)$  /7/.

Furthermore, the use of the electro-optic effect provides the potential for direct phase modulation as necessary for the realization of an electrooptical modulator.

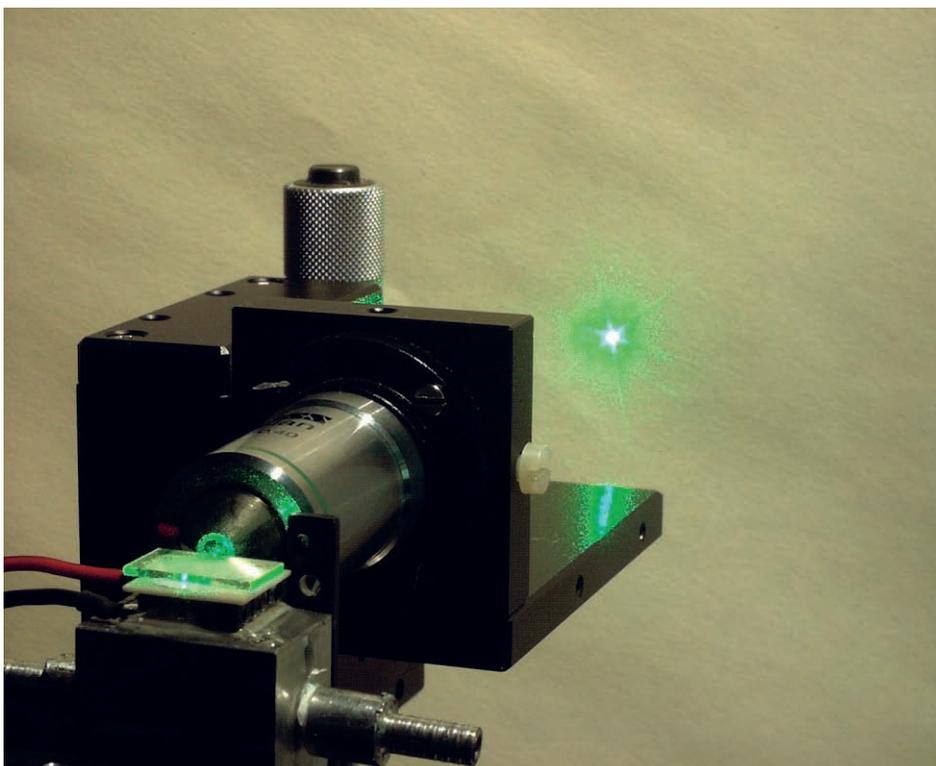
Parts of this work were funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (Priority Program 1157 and Research Unit 532). J. Burghoff acknowledges support by the Schott-Jenaer-Glas-Fonds and A. Szameit by the Jenoptik AG.

#### References:

- /1/ Itoh, K.; Watanabe, W.; Nolte, S.; Schaffer, C. B.: Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials, *MRS Bulletin* 31, 620 – 625 (2006).
- /2/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortac, B.; Limpert, J.; Nolte, S. Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium Fiber Laser based on intracore femtosecond written Fiber Bragg Grating, *Opt. Lett.* 31, 2390 – 2392 (2006).
- /3/ Szameit, A.; Blömer, D.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Hexagonal Waveguide Arrays Written with fs-Laser Pulses, *Appl. Phys. B* 82, 507 – 512 (2006).
- /4/ Szameit, A.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.: Two-dimensional soliton in cubic fs laser written waveguide arrays in fused silica, *Opt. Express* 14, 6055 – 6062 (2006).
- /5/ Blömer, D.; Szameit, A.; Dreisow, F.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Nonlinear refractive index of fs-laser-written waveguides in fused silica, *Opt. Express* 14, 2151 – 2157 (2006).
- /6/ Nejadmalayeri, A. H.; Herman, P. R.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of optical waveguides in crystalline silicon by mid-infrared femtosecond laser pulses, *Opt. Lett.* 30, 964 – 966 (2005).
- /7/ Burghoff, J.; Grebing, C.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Efficient frequency doubling in femtosecond laser-written waveguides in lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.* 89, 081108 (2006).

Abb. 3:  
Frequenzkonversion in einem fs-geschriebenen Wellenleiter in Lithiumniobat.

Fig. 3:  
Frequency conversion in a fs-written waveguide in lithium niobate.



# Neue Entwicklungen auf dem Gebiet optischer Schichten



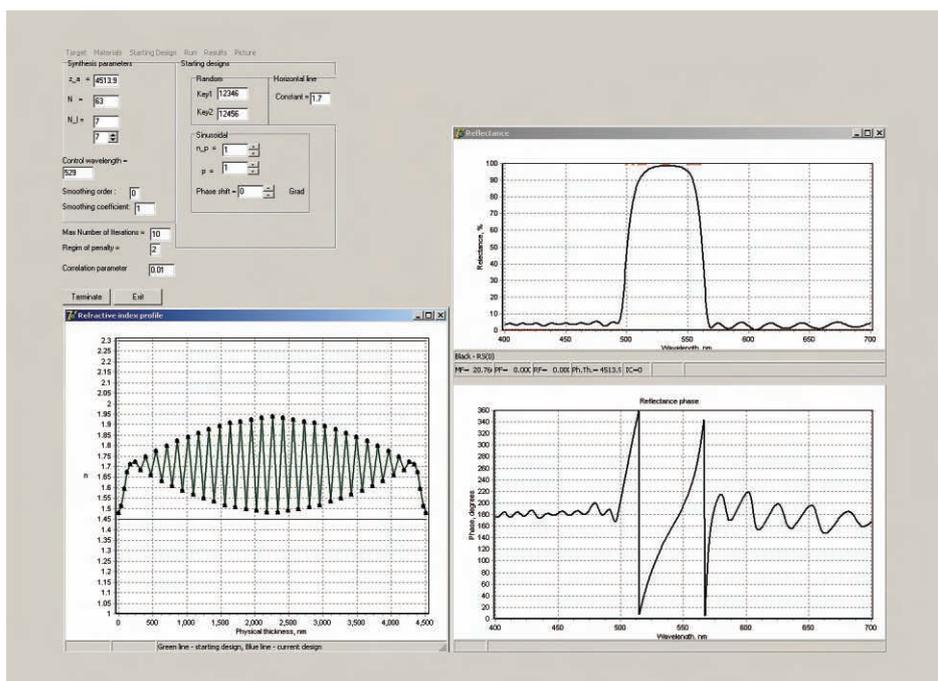
Norbert Kaiser

Eine der grundlegendsten optischen Technologien, die zu einer erheblichen Leistungssteigerung optischer Systeme geführt hat, sind optische Beschichtungen. Mit optischen Schichten können Oberflächen für die vielseitigen Anforderungen einer extrem reichhaltigen Palette von modernen und zukünftigen optischen Anwendungen maßgeschneidert werden. Neben der Möglichkeit der direkten Anpassung der spektralen Transmissionseigenschaften sind optische Schichten in der Lage eine Vielzahl anderer Oberflächeneigenschaften zu realisieren, wie z. B. die Umweltstabilität der Oberflächen, die Abriebfestigkeit oder Selbstreinigungseffekte. Die nächste Generation von optischen Schichten wird noch weiter gehen und optische

Eigenschaften mit anderen anspruchsvollen Anforderungen verbinden, etwa Sensorfunktion oder die Kontrolle von selektiven Übertragungsparametern. Schon heutzutage sind optische Schichten in nahezu allen optischen Komponenten, von Brillengläsern über Fließbandprodukte wie Ferngläser, CD Spieler, Kameras bis hin zu »high end«-Produkten, wie sie in der Grundlagenforschung oder in der Laser- und Informationstechnologie benötigt werden, funktionsbestimmend. Auf vielen »high tech«-Gebieten definiert die Qualität optischer Schichten die technologischen Grenzen und die Effizienz des optischen Systems und der damit verbundenen Anwendung. Daher werden optische Schichten als eine der entscheidenden Schlüsseltechnologien angesehen, die auch weiterhin den Fortschritt in vielen Applikationen und zukünftigen Entwicklungen bestimmt. Dieser Beitrag informiert über neue Entwicklungen auf dem Gebiet optischer Schichten am IOF Jena.

Abb. 1: Rugate Design Modul zur Berechnung der Reflexion eines apodisierten Rugatefilters mit einer Gesamtdicke von 4514 nm. Unten links: Brechzahlprofil. Oben rechts: Filterreflexion bei senkrechtem Lichteinfall. Unten rechts: Phase der reflektierten Welle.

Fig. 1: Rugate design module calculating the reflectance of an apodized rugate filter with a physical thickness of 4514 nm. Bottom on left: Refractive index profile, top on right: normal incidence reflectance, bottom on right: reflectance phase.



## Einführung

Optische Schichten, in der Regel mehrlagig, dienen zum Einstellen der optischen Eigenschaften (Reflexion, Transmission, Absorption) einer Oberfläche. Ihre Funktion beruht auf dem Interferenzeffekt und den intrinsischen Eigenschaften (Absorption) der Schichtmaterialien. Optische Schichten müssen sub-nm genau, also atomgenau, hergestellt werden. In den letzten Jahren wurden dabei erhebliche Fortschritte erzielt, die vor allem auf den Gebieten Design, Herstellung und Charakterisierung liegen. Es gibt jedoch noch erhebliche Defizite, um mit den Anforderungen an die moderne Optikentwicklung Schritt zu halten. Diese stellen einen wichtigen Forschungsschwerpunkt am IOF Jena dar.

# Latest developments in the field for coatings for optical instrumentation

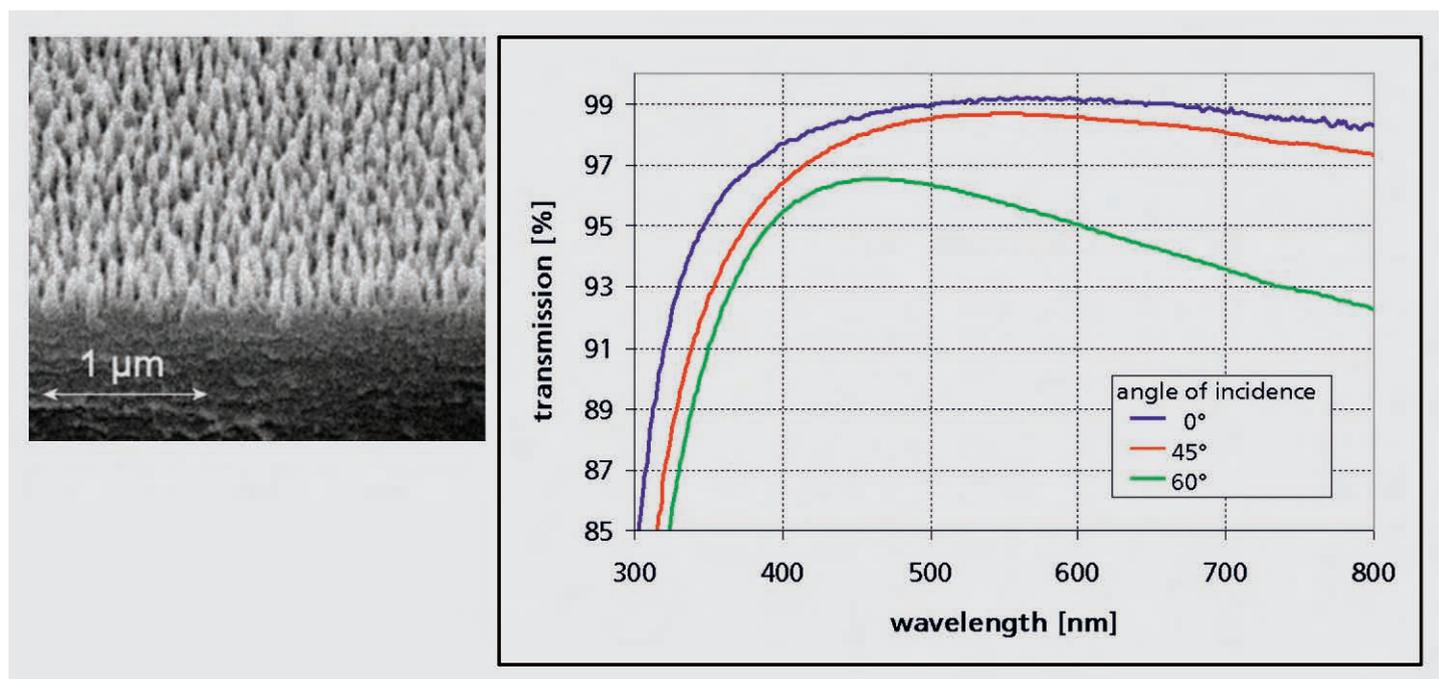
Optical devices are addressing an ever-increasing number of industrial and research applications: imaging and vision, health care, security, space, telecommunications, transportation, industrial process control, laser fusion, solar energy utilization etc. As users expect increasingly demanding performances optical systems designers and manufacturers are faced with growing challenges. This overview will be devoted to coatings, with special emphasis on the latest IOF developments in the fields of optical instrumentation. Examples of theoretical, experimental, and technological aspects will cover both fundamental and applied research, as well as development, practical techniques and applications.

## Introduction

Optical coatings are usually multilayer film structures used to obtain desired transmittance, reflectance and absorbance from surfaces. The characteristic may be due to the intrinsic property of the material (e.g. metal reflectors) or due to interference effects. Today optical thin films are involved in numerous optical systems where they constitute a key to their ultimate performance. For most applications, high accuracy is required on both the optical and non-optical properties, including low-loss energy balance, mechanical and thermal behaviour, damage threshold and non-linear properties.

Abb. 2:  
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer PMMA-Oberfläche mit Antireflexstruktur (links) und gemessene Transmission einer beidseitig geätzten PMMA-Scheibe für unterschiedliche Lichteinfallswinkel (rechts).

Fig. 2:  
Scanning electron micrograph of PMMA surface with ion-etched antireflective microstructure (left) and spectral transmission for different light incidence angles, measured after etching of both sides of a plane sample (right hand).



## Schichtdesign

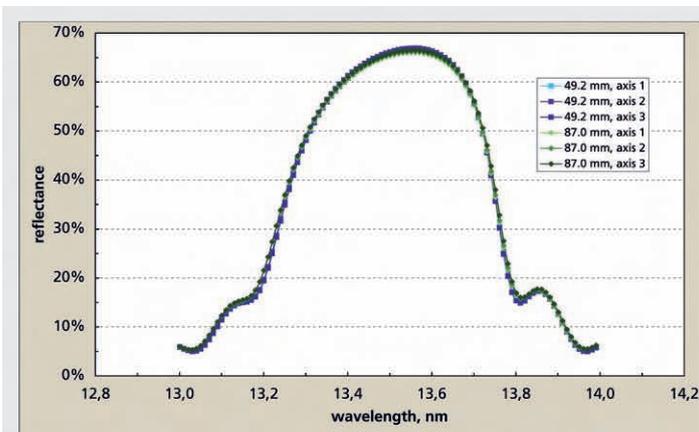
Das Schichtdesign ist der erste Schritt bei der Schichtherstellung. Es entsteht eine Schichtfolge für den Herstellungsprozess, ein Leitfaden für die Monitorierung der Schichten während der Herstellung und die Grundlage für die Erkennung von Beschichtungsfehlern (reverse engineering). Moderne Designsoftware kann nur in einer engen Symbiose mit den praktischen Aspekten der Schichtherstellung erfolgreich eingesetzt werden. Im Unterschied zum klassischen Optikdesign gibt es das reine Schichtdesign als ein abgeschlossenes Tätigkeitsfeld nicht. Das Schichtdesign ist ein Bestandteil der Schichtherstellung und wird in der Regel von den Personen durchgeführt, die auch die Schichten herstellen und charakterisieren. Am IOF wurden neue Designwerkzeuge entwickelt, die besonders für inhomogene Brechzahlverläufe (Abb. 1) hervorragende Produktionsunterstützung gewährleisten [1].

## Optische Schichten für transparente Kunststoffe

Präzisions- und Gebrauchsoptiken aus transparenten Kunststoffen ersetzen heute an vielen Stellen optische Bauteile aus Glas. Von Vorteil sind das geringe Gewicht sowie die hohe Bruchfestigkeit, aber in besonderem Maße auch die Möglichkeiten zur Formgebung. So können komplizierte asphärische Oberflächen im Spritzgussverfahren oder Fresnelstrukturen durch Heißpressen kostengünstig in hohen Stückzahlen abgeformt werden. Die für High-End-Produkte immer häufiger geforderte optische Funktionalisierung, hauptsächlich die Entspiegelung (Abb. 2), sowie verbesserte Kratzschutz- und Barriereigenschaften können durch Aufdampfen von dünnen Schichten erzielt werden. Die Entwicklung von qualitativ hochwertigen Beschichtungen für Kunststoffoptiken ist zu einem wesentlichen Faktor im Verdrängungswettbewerb mit den klassischen Glasoptiken geworden.

Abb. 3:  
Mo/Si beschichteter EUV-Kollektorspiegel speziell für Hochleistungs-LPP-Quellen.  
 $R > 66,5\%$ ,  $\lambda = 13,500\text{ nm}$ , Bandbreite der R-Kurve  $> 0,510\text{ nm}$ , Standardabweichung der Peakwellenlänge =  $0,001\text{ nm}$  (Messungen: PTB Berlin, BESSY II).

Fig. 3:  
Mo/Si coated EUV collector mirror for high-power LPP sources.  $R > 66.5\%$ ,  $\lambda = 13.500\text{ nm}$ , Bandwidth of reflectivity at half maximum  $> 0.510\text{ nm}$ , standard deviation of peak wavelength =  $0.001\text{ nm}$  (measurements: PTB Berlin, BESSY II).



Great progress has been made in almost all aspects. However, there are still problems and barriers to overcome. Identification and possible solutions represent an important aspect of research and development at IOF Jena.

---

## Coating Design

Coating design is part of the manufacturing process of optical coatings itself. It generates the layer sequence for the production run, assists the monitoring of the deposition process during the run, and enables a reverse engineering after the run. Computer-assisted coating design does not reduce the need for comprehensive knowledge, skill, and experience in thin-film optics both in theory and in practice. Coating design needs thin-film design software consisting of packages for input, analysis, refinement, synthesis, and manufacturing assistance. New IOF tools give insight into how optical coatings function and how they might be designed to meet given requirements (Fig. 1) /1/.

---

## Multifunctional coatings and structures on plastic optics

Injection moulded or hot-embossed polymer optics can replace glass optics as long as improved properties or lower costs can be achieved with the plastic parts. The problems with handling polymers in coating processes stimulate new coating or treatment techniques /2/. An alternative possibility to decrease the reflection on polymer surfaces is the use of appropriate layers with decreasing effective index

from substrate site to air. Investigations show that the application of special ion bombardment conditions leads to stochastic antireflective structures on acrylic surfaces: so-called "NANO-moth eyes" (Fig. 2). The plasma source of a Leybold APS has been used to perform the etching step. The performance of the antireflective structure is much less sensitive to the angle of light incidence compared to interference coatings.

In summary, this procedure should be favourably applied on curved and microstructured surfaces, but only on surfaces that do not have to be touched or cleaned later. Cost effective mass production may be possible by direct ion etching for small optical parts, as well as by replication of the structure onto larger parts.

---

## XUV Optics

Today, XUV optics is regarded as one of the most important segments in optics. It can sufficiently extend the application of the modern optics, satisfy the gradual requirements in fabrication of high volume integrated circuits, space optics, and novel characterization methods for materials and life sciences, and therefore is an intensively active research field at IOF Jena /3/.

XUV optics can be found in many applications starting with extreme ultraviolet lithography, space technologies, and synchrotron radiation (Fig. 3). Meanwhile, it plays a significant role in many development fields, such as physics, chemistry, astrophysics, biology, medicine. The efficiency of numerous applications in innovative and future technology fields are still limited by the quality of XUV optics.

Eine hochinteressante Alternative zur Entspiegelung durch Interferenzschichtsysteme bietet das Einbringen einer Subwellenlängen-Oberflächenstruktur mit Antireflexeigenschaften /2/. Diese kann praktisch z. B. mit einer Ionenquelle APS (Leybold-Optics) hergestellt werden (Abb. 2).

## XUV Optiken

Optiken für kurze und extrem kurze Wellenlängen im XUV sind heute einer der kritischsten Bereiche der Optischen Technologien. Die extremen Anforderungen sind nur mit sehr hohem Zeit- und Kostenaufwand schrittweise realisierbar. Nur wenige Entwickler und Hersteller weltweit haben dieses Niveau erreicht. Motiviert sind die Anstrengungen durch den riesigen und profitablen Halbleitermarkt. Aber auch zahlreiche Anwendungen außerhalb der Lithographie wie XUV-Astrooptiken, Synchrotronoptiken und XUV-Mikroskope haben dazu geführt, dass dieser extreme Spektralbereich intensiver Forschungsgegenstand am IOF ist /3/. Neue Anwendungen in verschiedenen Bereichen der Festkörper- und Astrophysik, Chemie, Biologie und Medizin sind derzeit nur noch von Fortschritten der Optiken begrenzt. Heute liegt der Schwerpunkt jedoch auf der EUV-Lithographie. Die definierte Abscheidung hochreflektierender Gradientenschichtsysteme auf ultrapräzise gefertigten Substraten ist gegenwärtig eine der größten Herausforderungen (Abb. 3).

## Aktuelle Entwicklungen

Die wichtigsten Trends /4 – 6/ sind:

- Prozesskontrolle und in-situ Monitoring (siehe Abb. 4)
- Transfer neuer Beschichtungstechnologien in die Produktion
- Beschichtungen für die Lithographie (193 nm Immersion und EUV 13,5 nm)
- Beschichtung von Kunststoffen
- Multifunktionale Schichtsysteme (optisch, mechanisch, elektrisch)
- Spannungsreduzierte Schichtsysteme
- Metall-dielektrische Systeme für die Luft- und Raumfahrt

## Zusammenfassung

Schichttechnologien sind für die Entwicklung von konkurrenzfähigen Neuerungen in der Optik eine unabdingbare Voraussetzung. Das enorme wirtschaftliche Potential wird noch unterstrichen von den großen Nettoumsätzen, die mit optischen Schichten erzielt werden. In vielen Technologiegebieten schwankt das Verhältnis der Kosten des fertigen Produktes zu den Schichtkosten zwischen 10 und 1000.

Im Laufe der schnellen Entwicklung der optischen Technologien werden die europäischen Firmen durch neue anspruchsvolle Aufgaben herausgefordert, die aktuellen Produktionszyklen für optische Schichten und Komponenten zu revolutionieren.

Als Hauptanwendungen seien hier die Informationstechnologie, die Halbleiterlithographie, die Medizin, neue Laseranwendungen und die »life sciences« genannt. All diese stellen an die Dünnschichttechnologie Anforderungen, die weit über die Grenze der momentan verwendeten Beschichtungstechniken hinausreichen.

Literatur:

- /1/ Stenzel, O.; Kaiser, N.: dieser Jahresbericht, S. 76.
- /2/ Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.: dieser Jahresbericht, S. 78.
- /3/ Yulin, S. et al.: dieser Jahresbericht, S. 80.
- /4/ Amra, C.; Kaiser, N.; Macleod, A. (Eds.): *Advances in Optical Thin Films II*, September 13 – 15, 2005, Jena, SPIE Vol. 5963.
- /5/ Kaiser, N.: *Optical coatings – trends and challenges for the present and the future*, *Glass Coatings*, 44-50, 3 (2005).
- /6/ Kaiser, N.; Pulker, H. K. (Eds.): *Optical Interference Coatings*, Springer Series in Optical Sciences, Volume 88 (2003).

## Actual Topics

Focus is on optical films that combine optical design with micro structural features tailored on the nm- and  $\mu\text{m}$ -scale and engineered band gap to functional characteristics such as mechanical and chemical protection, electrical conductivity, gas and vapour permeability, and others. Evaluation of film stability and integrity in harsh physical and chemical environments, their compatibility with novel substrate materials (including organic polymers), business aspects, experimental designs, and industrial scale-up are important as well.

Some actual trends /4 – 6/ are:

- Integration of coating technologies into production lines
- Process control and monitoring (see Fig. 4)
- Optical and protective coatings on plastics
- Coatings for lithography (193 nm immersion and EUV 13.5 nm)
- Multifunctional systems (optical, mechanical, electrical)
- Stress reduced systems
- Metal-dielectrical systems for air and space applications

## Summary

Optical coatings provide the means to engineer the properties of optical surfaces according to the various demands of an extremely broad range of applications in modern and future Optical Technologies. Besides the direct adjustment of the spectral transfer function, optical coatings are employed to optimise a variety of other surface characteristics including for example environmental stability, abrasion resistance or self-cleaning effects. The next generation of optical coatings will even go further and combine optical properties with other sophisticated features as for instance with a sensory functionality or also with an active control of selected transfer parameters. Today, optical coatings can be found in nearly every technical device, from ophthalmic glasses, to mass products such as cameras, binoculars, price scanners, or disc players, up to high-end products including complex optical systems for fundamental research, information and laser technology.

In many high technology areas, the quality of the available optical coatings defines the technical limits of the optical systems and the efficiency of the related applications. Therefore, optical coatings are considered as one of the critical enabling technologies governing further progress in many future developments and applications. As a direct key for the development of competitive innovations in the Optical Technologies, leadership in optical thin film technology is an indispensable prerequisite at IOF for an economic area of highest technology status.

### References

- /1/ Stenzel, O.; Kaiser, N.: this report, p. 77.
- /2/ Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.: this report, p. 79.
- /3/ Yulin, S. et al.: this report, p. 81.
- /4/ Amra, C.; Kaiser, N.; Macleod, A. (Eds.): Advances in Optical Thin Films II, September 13 – 15, 2005, Jena, SPIE Vol. 5963.
- /5/ Kaiser, N.: Optical coatings – trends and challenges for the present and the future, Glass Coatings, 44-50, 3(2005).
- /6/ Kaiser, N.; Pulker, H. K. (Eds.): Optical Interference Coatings, Springer Series in Optical Sciences, Volume 88 (2003).

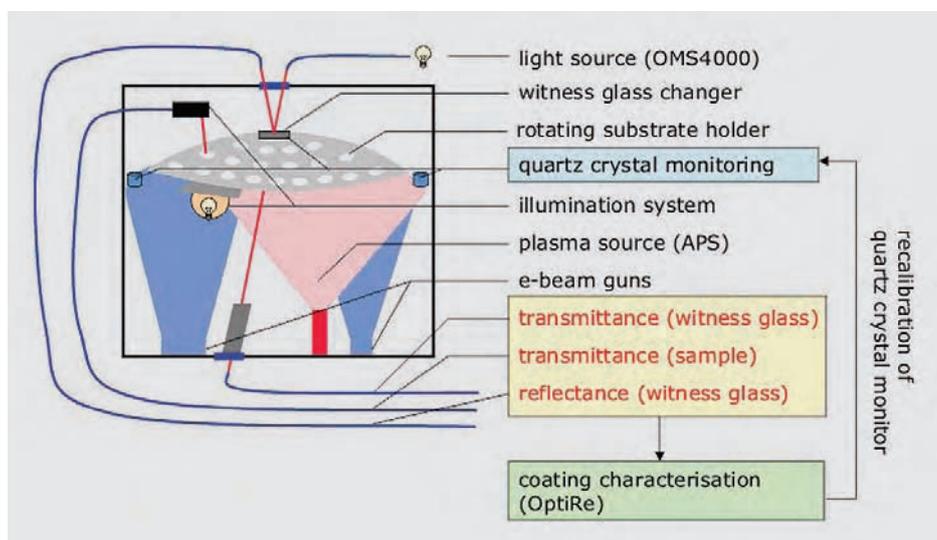


Abb. 4: Prinzip des optischen Breitbandmonitoring für plasma-ionengestützte Beschichtungen.

Fig. 4: Principle of optical broadband monitoring for plasma-ion assisted electron beam evaporation.

# Moderne Dünnschichtoptik jenseits des homogenen und isotropen Schichtmodells



Olaf Stenzel

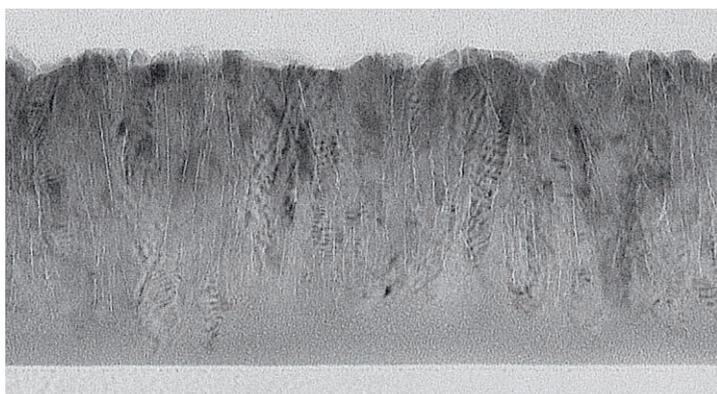


Norbert Kaiser

Der übliche theoretische Apparat der Dünnschichtoptik basiert auf einer Reihe von spezifischen Modellannahmen wie »absoluter« Glattheit und Parallelität der als unendlich dünn angenommenen Grenzflächen, sowie optischer Homogenität und Isotropie der Schichtmaterialien. Einschlägige kommerziell verfügbare Softwarepakete sind in ihrer Anwendbarkeit ebenfalls mehr oder weniger stark an die Relevanz dieser Annahmen gebunden. Dabei handelt es sich bei optischer Homogenität und Isotropie um Idealvorstellungen, die in der Praxis nie hundertprozentig gegeben sind. Abbildung 1 zeigt als extremes Beispiel die elektronenmikroskopische Querschnittsaufnahme einer durch Elektronenstrahlverdampfung abgeschiedenen Hafniumoxidschicht. Bedingt durch das verspätet einsetzende Säulenwachstum kann die Schicht weder als optisch homogen noch optisch isotrop angesehen werden. Häufig besteht das Ziel der Optimierung von Schichtabscheideprozessen dann darin, den Wunschvorstellungen von Isotropie und Homogenität in der Praxis möglichst nahe zu kommen. In einer alternativen Herangehensweise kann natürlich auch versucht werden, durch gezielte Präparation inhomogener oder anisotroper Materialien optische Beschichtungen mit neuartigen Eigenschaften zu erzielen.

Abb. 1:  
TEM-Querschnittsaufnahme einer etwa 200 nm dicken Hafniumoxidschicht.  
Aufnahme: Ute Kaiser, Universität Ulm.

Fig. 1:  
TEM-cross section image of an approximately 200 nm thick hafnium oxide layer.  
Courtesy: Ute Kaiser, University of Ulm.



Der korrekte Umgang mit Inhomogenitäten und Anisotropien ist daher für die Dünnschichtoptik aus zweierlei Hinsicht bedeutsam. Zum einen ist das Verständnis der dadurch bedingten optischen Effekte wesentlich für die korrekte Interpretation von an realen Systemen gemessenen Spektren. Zum anderen geht es um das Ausloten der Möglichkeiten anisotroper und inhomogener Schichtsysteme zum Erzielen neuartiger optischer Spezifikationen. Beispiele für derartige Systeme sind Rugatefilter, GBO-Schichten, oder auch Gitter-Wellenleiter-Strukturen (GWS) – vgl. Abb. 2. Alle diese Systeme gehen hinsichtlich ihrer spektralen Eigenschaften über die konventionellen Schichtsysteme hinaus und nehmen eine Zwischenposition zwischen konventionellen Schichtsystemen und photonischen Kristallen bzw. auch plasmonischen Systemen ein.

Die Abteilung Optische Schichten am Fraunhofer IOF hat in den letzten Jahren umfangreiche Forschungsarbeiten an derartigen Systemen geleistet und in diesen Bereichen Kompetenzen aufgebaut. Die entsprechenden Systeme sind in Abb. 2 grün unterlegt. Dabei gelang es, flexibel einstellbare spektral selektive Absorber auf Metallinselbasis zu erzeugen, neuartige winkeltolerante Breitbandentspiegelungen mit Gradientenschichten zu realisieren, sowie notch-Filter fürs VIS oder NIR auf der Basis von Rugatesystemen bzw. Gitter-Wellenleiter-Strukturen zu präparieren. Das Angebot des IOF betrifft in dieser Hinsicht Designstudien, Optimierung des Herstellungsprozesses inklusive der Ausarbeitung von Monitoringstrategien, sowie Training zu physikalischen Hintergründen und Einsatzbereichen derartiger inhomogener und anisotroper Schichtsysteme.

Gefördert durch BMWa, Förderkennzeichen 16IN0114 und 16IN0150, und TMWFK, Förderkennzeichen B507-02004.

# Thin film optics beyond the homogeneous and isotropic layer model

The commonly used theoretical apparatus of thin film optics is based on a series of specific model assumptions such as infinitesimally thin, absolutely smooth and parallel interfaces, as well as optical homogeneity and isotropy of the layer materials. Often, the applicability of commercially available thin film spectra calculation software also presumes the relevance of these model assumptions. However, in practice, completely homogeneous or isotropic materials do not occur. For the sake of illustration, Fig. 1 shows an extreme case – the cross section image of a hafnium oxide layer as prepared by electron beam evaporation. Due to the columnar growth mechanism, the film is neither homogeneous nor isotropic. Usually, deposition conditions are therefore optimized with the purpose of coming as close as possible to the ideals of homogeneity and isotropy of the films. But in principle, an alternative approach could be tried: the intentional preparation of (strongly) inhomogeneous or isotropic films may result in coatings with new and superior properties.

Therefore, the correct treatment of inhomogeneities and anisotropies in thin film optics is important from two points of view: Firstly, it enables an understanding of the optical behavior of practically deposited films in a more sophisticated manner. Secondly, use can be made of the unique properties of inhomogeneous and anisotropic films to meet challenging specifications which are inaccessible to conventional optical coatings. Examples for such approaches are provided by rugate filters, Giant-Birefringent Optics (GBO)-coatings, or Grating Waveguide Structures (GWS) – see Fig. 2. All these systems show extraordinary optical performance and hold an intermediate position between conventional coatings and photonic crystals or plasmonic systems. In recent years, the Optical Coatings Department at IOF has conducted ex-

tensive research projects in the area of inhomogeneous coatings. The main fields of competence are highlighted in Fig. 2 by green fields. Some highlights of this research were the preparation of spectrally selective absorber coatings on noble metal island film basis, the deposition of omnidirectional broadband antireflection coatings with gradient index layers, and notch filters for the VIS or NIR on rugate- or GWS-basis. In this respect, IOF offers design studies, optimization of the preparation technique, evaluation of a suitable monitoring strategy, and also training in the physical background and application fields of prospective inhomogeneous and anisotropic coating designs.

Sponsored by BMWA, contract number 16IN0114 and TMWFK, contract number B507-02004.

Abb. 2: Beispiele inhomogener und anisotroper optischer Schichtsysteme.

Fig. 2: Examples of inhomogeneous and anisotropic layer systems.

Optically homogeneous	Optically isotropic	Pure materials or nanoscopically homogeneous mixtures		Composites, colloids or porous layers	
		Non-absorbing	Absorbing	Non-absorbing	absorbing
yes	yes	Conventional dielectric coatings	Conventional (selective) absorbers, metal films	composite dielectric coatings	Cermets, metal island films
	no	Giant birefringent optics (GBO)	Polarizer foils	Metal island films	
no	yes	Rugates, Gradient index layers		Rugates, Gradient index layers,	Motheye structures
	no	GWS Reflectors	GWS Absorbers	Photonic crystals and Plasmonics	

# Haftfeste Beschichtung von PMMA – von der Prozessentwicklung zur industriellen Nutzung



Ulrike Schulz



Peter Munzert



Norbert Kaiser

Aufgrund seiner hervorragenden optischen Eigenschaften wird der Kunststoff Polymethylmethacrylat (PMMA) bevorzugt für die Substitution von Glas eingesetzt. Für Anwendungen in der Präzisionsoptik und Sensorik ist die Vergütung der Teile mit optischen Interferenzschichten erforderlich (Abb. 1). In Vakuumprozessen aufgebraute Beschichtungen auf PMMA zeigen jedoch meist nur eine sehr geringe Haftfestigkeit. Unter dem Einfluss von Vakuum-UV-Strahlung und hochenergetischer Teilchen dominieren Seitenkettenabbau und Degradation. Die an vielen Kunststoffen zur Haftverbesserung erfolgreich angewendeten Plasmavorbehandlungen der Substratoberfläche haben deshalb keinen positiven Effekt.

Ein am Fraunhofer IOF in Jena entstandenes Patent beschreibt den Schutz des PMMA-Substrats vor Degradation während des Beschichtungsprozesses durch eine ohne Plasmaeinwirkung aufgebraute erste Schicht [1]. Weitere Schichten können dann auch mit Plasmaeinwirkung, also mittels Elektronenstrahlverdampfung abgeschieden und auch durch Ionenbeschuss aus einem Plasma verdichtet werden. Eine auf diesem Prinzip basierende Technologie zur Entspiegelung von PMMA wurde in den vergangenen Jahren mehrfach in die industrielle Anwendung überführt. Die erreichbaren optischen Eigenschaften sind in Abb. 2 dargestellt.

Aktuelle Beispiele aus dem Jahr 2006 sind die Transferleistungen zu den Firmen Jenoptik Polymer Systems GmbH in Triptis und Fuji Magnetics GmbH in Kleve (Abb. 3 und 4). Traditionell auf die Fertigung von Kunststoffoptik durch Spritzgießen spezialisiert, haben beide Firmen in den letzten Jahren auch in moderne Beschichtungstechnik investiert. Das IOF war von Anfang an Kooperations-

partner, so auch bei der Ausbildung des Fachpersonals für die Anlagenbedienung. Die Diplomingenieurinnen Yvonne Sölter und Tina Bräutigam fertigten in den Jahren 2003 und 2004 ihre Diplomarbeiten in der Gruppe Kunststoffbeschichtung des IOF an, bevor sie im Auftrag der Firmen speziell an der Beschichtungsanlage für die Kunststoffbeschichtung geschult wurden. Heute sind beide in ihren Firmen für die Beschichtung von Spritzgussoptik und die Einführung neuer innovativer Technologien verantwortlich. Für den PMMA-Prozess wurden mit den Industriepartnern zunächst Lizenzverträge geschlossen und anschließend wurde das spezielle Know-how in mehrtägigen Schulungen am IOF vermittelt.

#### Literatur:

- [1] Munzert, P.; Scheler, M.; Schulz, U.; Kaiser, N.: Fraunhofer-Gesellschaft, Optisches Schichtsystem und Verfahren zur haftfesten Beschichtung mit einem optischen Schichtsystem, DE10201492A1.

Abb. 1: Beschichtete Kunststoffkomponenten.

Fig. 1: Coated plastic lenses.



# High-adherent coatings on PMMA – from process development to industrial application

Polymethylmethacrylat (PMMA) is preferred as a substitute for glass in optical components because of its excellent optical properties. The coating of the plastic parts with interference layers is required for precision optical and sensor applications (Fig. 1). However, coatings deposited on PMMA by vacuum processes typically show a bad adhesion to the substrate. Treatment with vacuum ultraviolet radiation or high energetic particles PMMA tends to result in side-chain decomposition and other types of degradation. Plasma treatments, successfully applied to improve the adhesion properties of many polymers, do therefore not show beneficial effects on PMMA.

A patent developed at IOF in Jena describes a coating process that provides good protection against degradation on PMMA solely by the absorption of damaging radiation in a first protective layer /1/. In a second step, further layers of interference systems can be deposited by applying electron beam

evaporation and plasma ion assistance. A broadband antireflection coating for PMMA that is based on this invention has been transferred to industrial applications several times in the last few years. Figure 2 shows the spectral performance obtainable.

Actual examples from 2006 are transfers to the companies Jenoptik Polymer Systems GmbH in Triptis and Fuji Magnetics GmbH in Kleve. Both companies specialize in injection molding for polymer optical systems and have invested in modern coating equipment and techniques in recent years (see Figs. 3 and 4). As co-operation partners, Fraunhofer IOF has not only delivered coating technologies but also trained the staff to run the coating machines. Yvonne Sölter und Tina Bräutigam completed their diploma theses in engineering in the polymer coatings working group at IOF in the years 2003 and 2004, respectively. Since then, both have qualified in the special field of vacuum coating on polymers at IOF, as contracted with the companies.

Abb. 2: Transmissionsspektren von PMMA mit und ohne Antireflexbeschichtung.

Fig. 2: Transmission spectra of PMMA before and after deposition of antireflective coating.

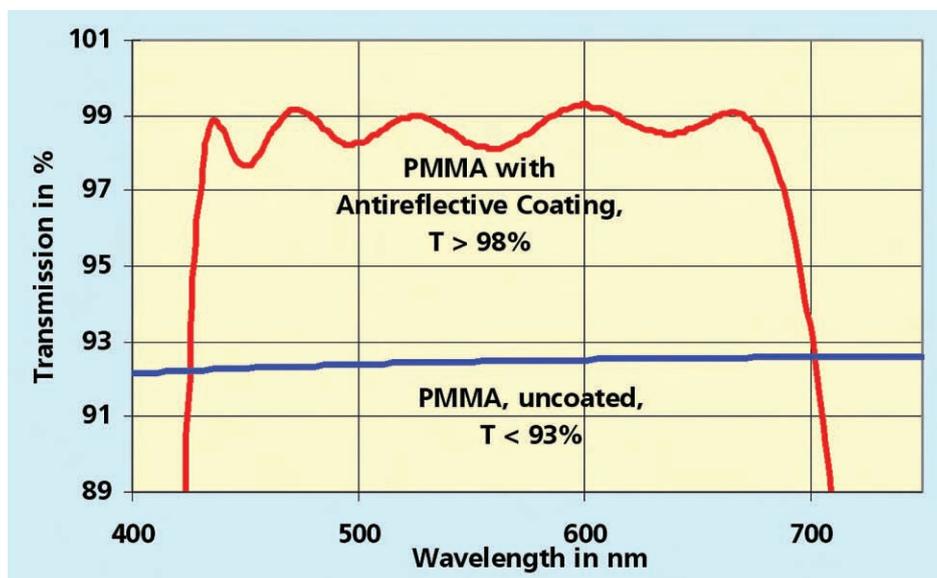


Abb. 3: Dipl.-Ing. Yvonne Sölter bei Anlieferung der Beschichtungsanlage zur Firma Jenoptik Polymer Systems in Triptis.

Fig. 3: Dipl.-Ing. Yvonne Sölter during delivery of the coating machine to Jenoptik Polymer Systems in Triptis.



Abb. 4: Dipl.-Ing. Tina Bräutigam vor der Beschichtungsanlage SyrusPro bei Fuji Magnetics in Kleve.

Fig. 4: Dipl.-Ing. Tina Bräutigam in front of her coating machine at the coating facility of Fuji Magnetics in Kleve.

Today, Yvonne and Tina are responsible for the coating of injection molding optics and the implementation of new innovative technologies in this field. In case of the PMMA process, license agreements were initially signed with partners in industry, and the special know-how has been taught at courses held at Fraunhofer IOF.

/1/ Munzert, P.; Scheler, M.; Schulz, U.; Kaiser, N.: Fraunhofer-Gesellschaft, Optisches Schichtsystem und Verfahren zur haftfesten Beschichtung mit einem optischen Schichtsystem, DE10201492A1.



Sergiy Yulin



Nicolas Benoit



Torsten Feigl



Norbert Kaiser



Shannon Hill <sup>1</sup>



Tom Lucatorto <sup>1</sup>



Eric Gullikson <sup>2</sup>

Manish Chandhok <sup>3</sup>, Ming Fang <sup>3</sup>, Melissa Shell <sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA

<sup>2</sup> Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA

<sup>3</sup> Intel Corporation, Hillsboro, OR, USA

Die Lebensdauer Mo/Si beschichteter Abbildungsoptiken stellt eine der größten Herausforderungen der Produktionseinführung der Extrem-Ultraviolett-Lithographie (EUVL) dar. Problematisch bei der Verwendung von Mo/Si Multilayer-Optiken ist die Verringerung der Reflexion auf Grund von Kohlenstoffkontaminationen und Oxidation der Silizium-Deckschicht bei intensiver EUV-Bestrahlung. Hierbei ist die Degradation der Optiken vor allem von den Umgebungsparametern, wie dem Wasser- und Kohlenwasserstoff-Partialdruck, abhängig (Abb. 1). In der Vergangenheit wurden zahlreiche Methoden zum Schutz der Optiken untersucht, zum Beispiel der Einsatz von Ruthenium- und Kohlenstoff-Deckschichten. Obwohl die Lebensdauer von EUV-Optiken hiermit deutlich erhöht werden konnte, genügen sie bisher noch immer nicht den Anforderungen an kommerzielle EUVL-Tools.

Am Fraunhofer IOF Jena wurden Untersuchungen zu Titandioxid (TiO<sub>2</sub>) und Rutheniumdioxid (RuO<sub>2</sub>) durchgeführt um deren Potential als Deckschichtmaterialien für EUVL-Optiken zu evaluieren. Die Optimierung des Schichtdesigns sowie der Herstellungsparameter der Mo/Si Systeme erfolgte in Bezug

auf Maximalreflexion sowie Strahlungsstabilität. Die Synchrotronbestrahlung am National Institute of Standards and Technology (NIST) mit einer mittleren Leistungsdichte von ~ 5 mW/mm<sup>2</sup> unter verschiedenen Vakuumbedingungen wurde zur Optimierung der Deckschichten genutzt.

Mo/Si Multilayerspiegel mit optimierter TiO<sub>2</sub>-Deckschicht mit einer EUV-Reflexivität von 66,9 % zeigen einen Reflexionsverlust von 0,6 % nach einer Strahlungs dosis von 760 J/mm<sup>2</sup> bei einem Wasserpartialdruck von 3 x 10<sup>-5</sup> Pa (Abb. 2, links). Der Reflexionsverlust kann durch partielle Oxidation der Si-Unterschicht erklärt werden. Dahingegen konnte bei Mo/Si Multilayerspiegeln mit optimierter RuO<sub>2</sub>-Deckschicht und einer ursprünglichen EUV-Reflexivität von 65,7 % keinerlei Reflexionsverlust nach Synchrotronbestrahlung nachgewiesen werden (Abb. 2, rechts).

Die Kombination von hoher Strahlungsstabilität und optischen Eigenschaften von Mo/Si Schichtsystemen mit TiO<sub>2</sub>- und RuO<sub>2</sub>-Deckschichten unterstreicht ihre potentielle Nutzung für EUVL-Optiken.

Wir danken der Intel Corporation für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeiten.

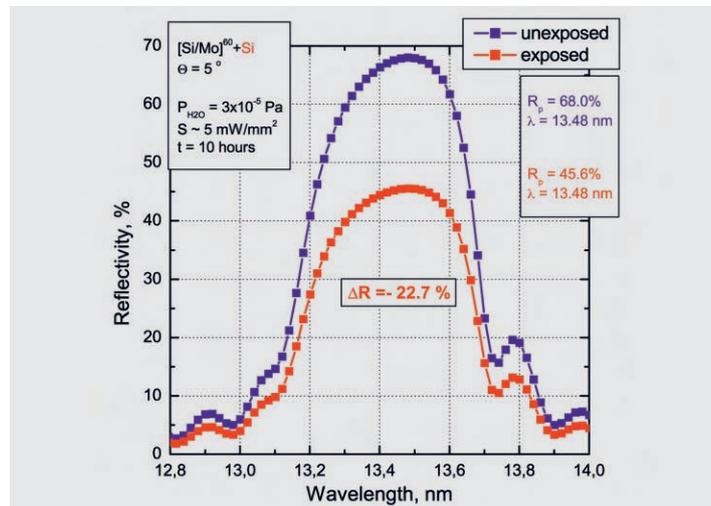


Abb. 1: Reflexion von Mo/Si Multilayerspiegeln mit Si-Deckschicht nach 10-stündiger Synchrotronbestrahlung (Messung: ALS, Lawrence Berkeley National Laboratory).

Fig. 1: Reflectivity evolution of Si capped Mo/Si multilayer mirrors after 10 hours synchrotron irradiation.

# Capping layers for EUV lithography optics

The lifetime of Mo/Si multilayer-coated projection optics is one of the outstanding issues on the road of the commercialization of extreme-ultra-violet lithography (EUVL). A serious problem of Mo/Si multilayers capped by silicon is the considerable reflectivity degradation due to carbonization and oxidation of the silicon surface layer under exposure by EUV radiation. The instability of Mo/Si multilayers becomes especially critical at elevated pressures of water vapor and hydrocarbons (Fig. 1), thus noticeably limiting the application of Si capped Mo/Si multilayers. A number of solutions have been recommended in the past, including the use of different protective capping layers (ruthenium and carbon). As a result, the lifetime of EUV multilayer

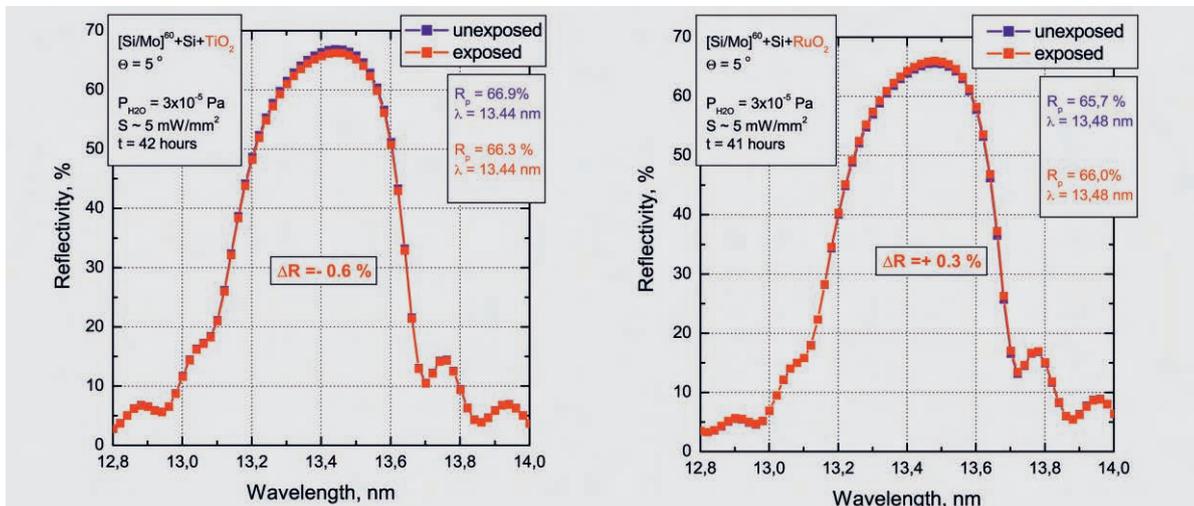
coatings was noticeably improved, although it still does not meet stringent commercial tool specifications. This study was focused on titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) and ruthenium dioxide (RuO<sub>2</sub>) as promising capping layer materials for EUVL multilayer coatings. The multilayer designs as well as the deposition parameters of the Mo/Si system with dioxide capping layers were optimized in terms of maximum peak reflectivity at a wavelength of 13.5 nm and long-term radiation stability. The synchrotron irradiation at the National Institute of Standards and Technology with an average power density of ~ 5 mW/mm<sup>2</sup> and different vacuum conditions was used for the capping layer optimization.

Optimized TiO<sub>2</sub> capped Mo/Si multilayer mirrors with an initial reflectivity of 66.9 % presented a reflectivity drop of 0.6 % after an irradiation dose of 760 J/mm<sup>2</sup> under 3 x 10<sup>-5</sup> Pa water pressure (Fig. 2, left). The reflectivity drop was explained by partial oxidation of the silicon sub-layer. No reflectivity loss after a similar irradiation dose was found for RuO<sub>2</sub> capped Mo/Si multilayer mirrors with an initial peak reflectivity of 65.7 % (Fig. 2, right). The combination of high radiation stability and good optical properties of Mo/Si multilayer mirrors capped by TiO<sub>2</sub> and RuO<sub>2</sub> underlines their potential use as reflective coatings in EUVL optics.

We would like to thank the Intel Corporation for their financial support.

Abb. 2: Reflexion von Mo/Si Multilayerspiegeln mit TiO<sub>2</sub>-Deckschicht (links) und RuO<sub>2</sub>-Deckschicht (rechts) nach 40-stündiger Synchrotronbestrahlung (Messung: ALS, Lawrence Berkeley National Laboratory).

Fig. 2: Reflectivity evolution of TiO<sub>2</sub> (left) and RuO<sub>2</sub> (right) capped Mo/Si multilayer mirrors after ~ 40 hours synchrotron irradiation.



# Stereobasierte Streifenprojektion – industrietaugliche 3D-Digitalisiersysteme



Christoph Munkelt



Peter Kühmstedt



Matthias Heinze



Christian  
Bräuer-Burchardt



Gunther Notni

---

## Stereobasierte Streifenprojektion

Bei der Entwicklung der 3D-Digitalisierungssysteme »kolibri« zur Vermessung komplexer Objektgeometrien stand die Erhöhung der Messgenauigkeit und Fehlertoleranz bei gleichzeitiger Reduktion der Anzahl der benötigten Kameras im Vordergrund. Diese Vorgaben werden mit der stereobasierten Streifenprojektion erreicht. Dabei werden die herausragenden Eigenschaften des bisherigen messtechnischen Ansatzes der Phasogrammetrie /1,2/, wie z. B. die Selbstkalibrierung und der Verzicht auf extra anzubringende Marker auf dem Messobjekt, beibehalten. Das Neuartige an dem Ansatz der stereobasierten Streifenprojektion ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

Für die Berechnung wird eine Phasenkorrelation zwischen Phasenwerten in den Bildern von zwei Messkameras verwendet. Dies steht im Gegensatz zur bisherigen Nutzung von ausschließlich Phasenmesswerten (Phasogrammetrie) oder der klassischen Triangulation (Phasenmesswerte und Kamerarasterdaten) zur Koordinatenberechnung. Die Methodik der Phasenkorrelation bewirkt, dass sich Phasenmessfehler nicht mehr direkt auf die Koordinatenberechnung auswirken und weitgehend kompensiert werden. Dies ergibt eine deutlich größere Robustheit gegenüber Gegenbeleuchtungsartefakten und Intensitätsinhomogenitäten, die bei der Vermessung technischer Objekte nicht vermeidbar sind.

Technisch von Vorteil ist, dass die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion von der stagnierenden Auflösungserhöhung bei digitalen Projektoren entkoppelt ist. Umgekehrt wird dadurch der Weg bereitet, von fortschreitenden Verbesserungen bei der Kameraentwicklung zu partizipieren. Somit kann die erreichbare Güte der 3D-Rekonstruktion gezielt durch die Verwendung hochwertiger, industriell verfügbarer Kameraobjektive gesteigert werden. Die Qualitätswerte der Projektionsoptik (insbesondere die Verzeichnung) hingegen besitzen nahezu keine Wirkung mehr auf die Koordinatenmessgenauigkeit. Damit entfällt die Kalibrierung der Optik der eingesetzten digitalen Projektoren.

---

## Aufbau des modularen Sensorkopfes

Eine entscheidende Rolle bei der Realisierung stereobasierter Streifenprojektion kommt dem sogenannten Sensorkopf zu. Bei der Entwicklung des Sensorkopfes, der Einheit aus digitalem Streifenprojektor und typischerweise zwei Messkameras  $K_p$  (Abb. 1), standen Modularität und Skalierbarkeit der Lösung im Vordergrund.

# Stereo based fringe projection – 3D digitization systems for industrial applications

## Stereo based fringe projection

During the development of the “kolibri” 3D digitization systems for the measurement of complex object geometries, the focus was directed on the improvement of the measurement accuracy and error tolerance together with the reduction of the number of cameras used. These requirements can be achieved by stereo based fringe projection. Here, the advanced properties of the previous phasogrammetric measurement method, e.g. the self-calibration and the avoidance of additional markers on the measuring object, are retained.

The novelty in the approach of the stereo based fringe projection is characterized by the following features: A phase correlation between the values of the images of two measuring cameras is used for the calculation. This

works contrary to the usage of only phase values (phasogrammetry) or classical triangulation (phase values and camera raster values) for the determination of the co-ordinates. The method of phase correlation causes a compensation of the phase value errors and thus prevents errors in the determination of the co-ordinates. Hence a considerably improved robustness is achieved with regard to reflection artefacts and inhomogeneous regions of intensity, which cannot be avoided in the measurement of technical objects. A technical advantage is the fact that the accuracy of the 3D reconstruction does not depend on the slow development of the projection resolution. This also means that one can participate in improvements in modern camera technologies. Thus the achievable quality of the 3D reconstruction can be selectively improved by the use of high quality industrial lenses. The quality

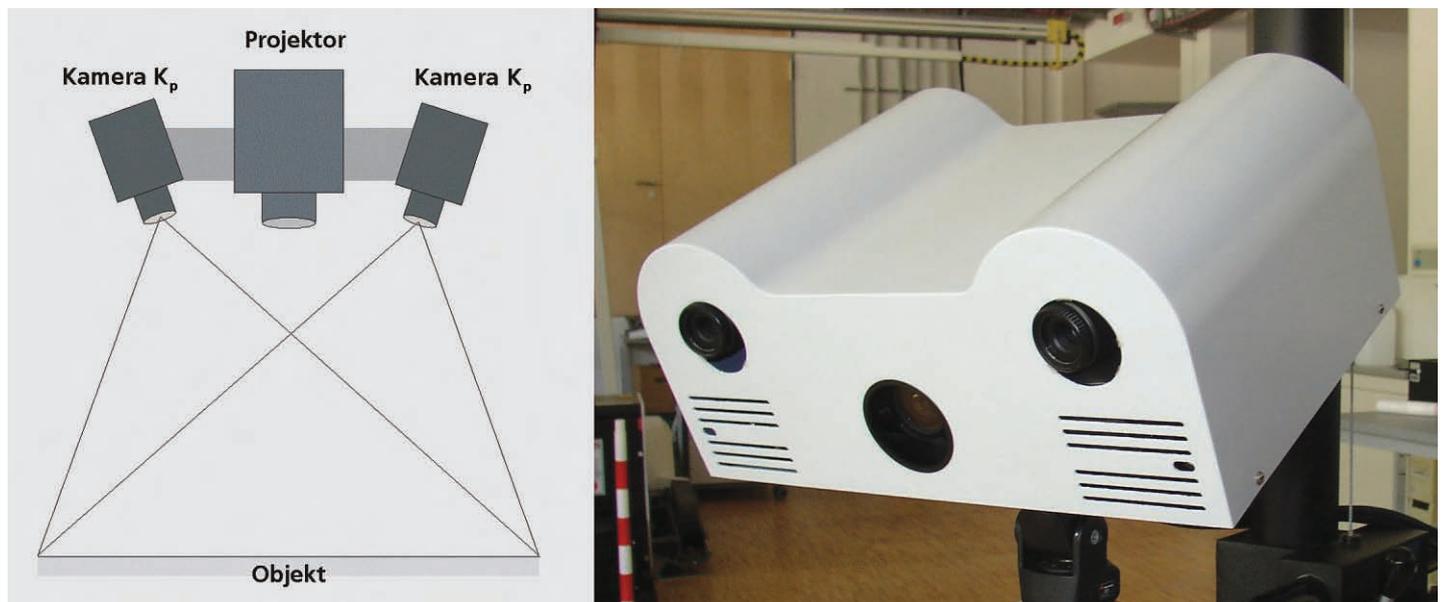
values of the projection optics (especially lens distortion) have almost no influence on the accuracy of the co-ordinate measurement. The calibration of the optics of the digital projectors used can therefore be omitted.

## Composition of the modular sensor head

As the sensor head we denote the connected unit of a digital fringe projector and typically two measuring cameras  $K_p$  (Fig. 1). It plays an important role in the realization of stereo based fringe projection. Modularity and the scalability of the solution were main aspects in the development of the sensor head.

Abb. 1:  
Grundanordnung und Foto des stereobasierten Streifenprojektions-Sensorkopfes.

Fig. 1:  
Basic configuration and photograph of the stereo based fringe projection sensor head.



## Systemlösung »kolibri MOVE« im Detail

Eine Umsetzungsform des Messprinzips stellt das Messsystem »kolibri MOVE« dar (Abb. 2 und 3). Die mobile Anordnung besteht aus einem frei beweglichen Sensorkopf und einer sogenannten Verknüpfungskamera  $K_V$  (beide sind jeweils auf einem Stativ gelagert). Um das Objekt rundum zu erfassen, wird im Messablauf der Sensorkopf mittels des beweglichen Stativs an verschiedene Positionen in Bezug zum Objekt positioniert. Weiterhin wird die Verknüpfungskamera  $K_V$  einmalig so in Bezug zum Messobjekt positioniert, dass sie eine Übersicht über die Messszene aufnehmen kann. Während des Messablaufs projiziert der Projektor die Streifensequenzen. Diese werden von den Messkameras simultan mit der Verknüpfungskamera  $K_V$  aufgenommen.

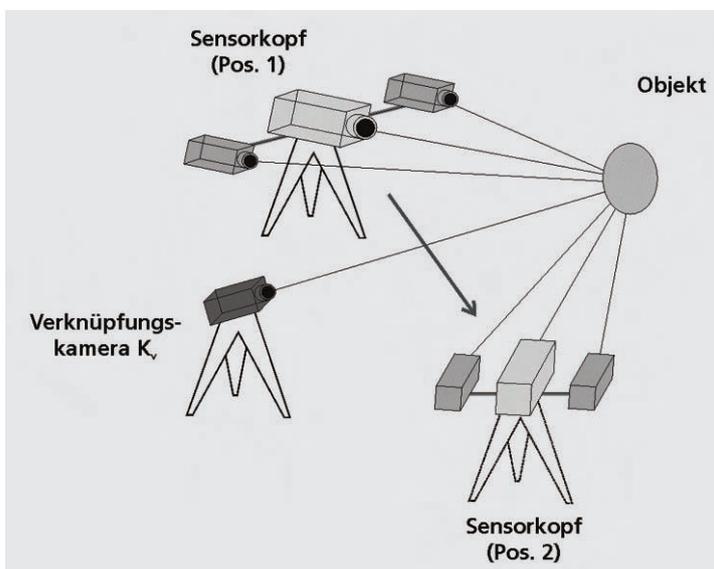
Hiernach erfolgt das Umpositionieren des Sensorkopfes mit dem beweglichen Stativ und die Messwertaufnahme wird aus dieser neuen Richtung wiederholt. Dies erfolgt so lange, bis das Objekt aus allen erforderlichen Richtungen erfasst worden ist.

Nach abgeschlossener Messwertaufnahme erfolgen die Koordinatenberechnung mittels Phasenkorrelation zwischen den Messkameras und die Systemkalibrierung in einem gemeinsamen Prozessschritt. Die Kamerapixel der Verknüpfungskamera bilden hierbei »virtuelle Passmarken« zur Registrierung der Einzelansichten zum Gesamtbild. Dadurch können in der Koordinatenberechnung alle Einzelansichten in einem gemeinsamen Weltkoordinatensystem berechnet werden. Als Besonderheit des Systemkonzepts ergibt sich somit, dass keine Passmarken, externe eingemessene Referenzrahmen oder andere Einmessvorrichtungen (Tracker) verwendet werden müssen. Dies führt zu einer hohen Flexibilität und Nutzerfreundlichkeit. Damit wird ein flexibles passmarkenfreies Vermessen großflächiger Objekte (z. B. PKW-Teile, Clay-Modelle, Skulpturen etc.) möglich. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, durch Hinzufügen von weiteren Verknüpfungskameras  $K_V$  das Messvolumen um das von ihnen zusätzlich beobachtete Gebiet bis auf einige  $m^2$  zu erweitern.

Für den Einsatz in Industrieumgebungen sind eine Reihe von hard- und softwarespezifischen Detaillösungen integriert. Um fehlerhaften Messungen durch Störeinflüsse, wie z. B. Erschütterungen oder Helligkeitsschwankungen, zu vermeiden, identifiziert eine online-Überprüfung der Messdaten gestörte Aufnahmen und ermöglicht eine automatische Wiederholung.

Abb. 2:  
Grundanordnung eines Stativmesssystems »kolibri MOVE«.

Fig. 2:  
Basic configuration of a tripod measuring system "kolibri MOVE".



## System solution "kolibri MOVE" in detail

One realization of the measuring principle is the measuring system "kolibri MOVE" (see Figs. 2 and 3). The mobile configuration consists of a freely moveable sensor head and a so-called connecting camera  $K_V$  (both are mounted on tripods). In order to measure the whole body of the object in the measuring process, the sensor head is positioned in several positions relative to the object using a moveable tripod. Furthermore, the connecting camera  $K_V$  is uniquely positioned relative to the measuring object such that it can record an overview of the complete measuring scene. The projector generates fringe sequences during the measuring process, which are recorded simultaneously by the connecting camera  $K_V$  and the measuring cameras. After that the sensor head is repositioned by the moveable tripod and the measurement is repeated from this new direction. The whole process is repeated until the object is recorded from all required directions.

The calculation of the co-ordinates is carried out by means of phase correlation between the measuring cameras and system calibration in a common step after the complete recording of the image sequences. The pixel of the connecting camera form 'virtual landmarks' for the registration of the single views in order to obtain a complete common image. By this the calculation of the co-ordinates of all single views is realized in a common world co-ordinate system. Thus the avoidance of physical landmarks, extrinsic calibrated reference frames, and other calibration devices (tracker) becomes a special property of the system concept.

This leads to high flexibility and convenience. Thus a flexible measurement of large objects (e.g. car parts, clay models, sculptures, etc.) becomes possible without landmarks.

Additionally, the measuring volume can be increased up to several square meters by adding more connecting cameras.

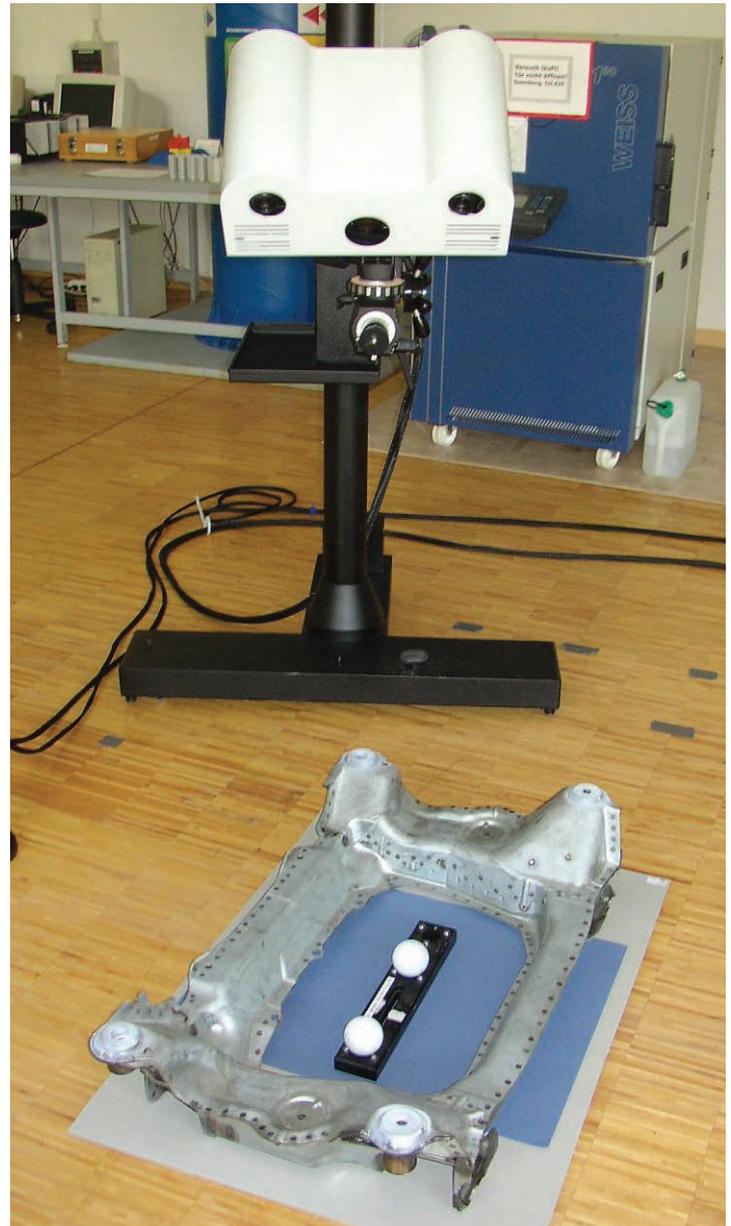


Abb. 3:  
Messanordnung »kolibri MOVE«.

Fig. 3:  
Measuring configuration "kolibri MOVE".

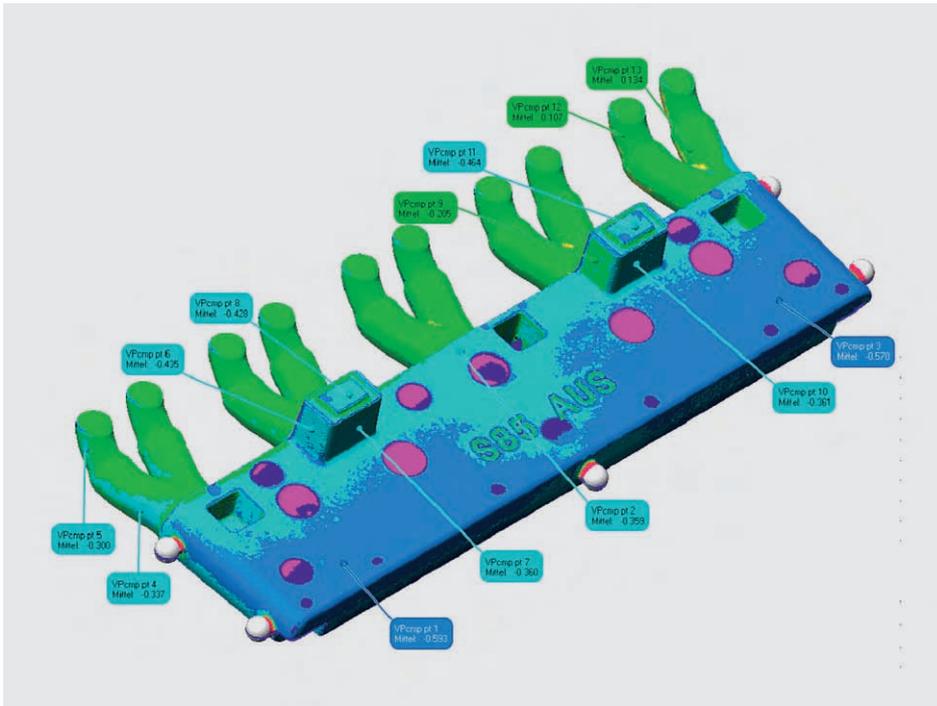


Abb. 4:  
3D-CAD-Vergleich eines Lufteinlasskanals (Sandkern), »kolibri 900«.

Fig. 4:  
3D CAD comparison of an air flushing channel (sand core), "kolibri 900".

Der Bediener des Gerätes wird während der Messung aktiv bei der Planung weiterer Aufnahmen unterstützt, indem jederzeit der aktuelle Messfortschritt in die Live-Anzeige der Kameras eingeblendet werden kann. Eine Schnellansicht des Rekonstruktionsergebnisses ist abrufbar, um selbst an schwierig zu vermessenden Objektregionen die Vollständigkeit der Daten durch entsprechende Aufnahmepositionen zu ermöglichen.

Zu der hohen Flexibilität durch den manuell und zielgenau steuerbaren Sensorkopf kommt jedoch die im Industriumfeld wichtige weitgehende Automatisierung hinzu. Nachdem die Messdatenaufnahme abgeschlossen wurde, erfolgt eine Ausgabe der Messresultate als CAD-Datei (STL). Um eine hohe Geschwindigkeit auch bei den hohen Punktdichten und den daraus resultierenden Datenmengen zu ge-

währleisten, wird die verfügbare Parallelität auf zeitgemäßen Workstations softwareseitig bestmöglich genutzt. Bis zu 100 Teilansichten können aufgenommen werden, um selbst anspruchsvolle Messobjekte vollständig mit einer Messunsicherheit ( $1\sigma$ ) von  $50\ \mu\text{m}$  bis  $100\ \mu\text{m}$  in Messfeldern bis zu mehreren Quadratmetern zu vermessen. Die Gesamtmesszeit (Messdatenaufnahme plus Datenberechnungszeit) liegt dabei je nach notwendiger Anzahl der Teilansichten zwischen 10 und 60 Minuten. Ein Beispiel der Vermessung eines Sandkernes zeigt Abb. 4 (BMW-Motorenwerk Landshut) /3/.

## Abgeleitete Systemlösungen

Insgesamt ist die aus dem Ansatz der stereobasierten Streifenprojektion entwickelte Software-Basis der Grundstein für die Skalierbarkeit des Lösungsansatzes für verschiedenste Messgeräterealisierungen. Durch die gezielte Anpassung der verwendeten Optiken, aber unter Beibehaltung der generellen Geometrie und Algorithmik, konnte das neue Messprinzip sowohl in Systemen zur Zahndigitalisierung (Messfeld-durchmesser  $90\ \text{mm}$ ) als auch zur Vermessung großer Industrieteile (bis zu einigen  $\text{m}^2$  Fläche) erfolgreich eingesetzt werden. Die Flexibilität dieser Lösung ermöglicht auch eine schnelle Anpassung der Messsysteme an neue Einsatzgebiete, wie z. B. dem Einsatz in robotergeführten 3D-Scannern wie dem »kolibri ROBOT« (Abb. 5).

## Zusammenfassung

Die vorgestellte neue Lösung der stereobasierten Streifenprojektion mit Phasenkorrelation ermöglicht eine fehlertolerante, flexible Ausführung von Messsystemen für verschiedene Messfelder. Hierauf basierend sind sehr robuste, industrietaugliche Anordnungen umgesetzt worden. Die Genauigkeit wird weitgehend durch die Kameraoptik bestimmt. Die Wirkung von Phasenmessfehlern wird weitgehend kompensiert.

### Literatur:

- /1/ Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Notni, G.: Phasogrammetric optical 3D-Sensor for the measurement of large objects, Proc. SPIE 5457 (2004) S. 56-64.
- /2/ Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Himmelreich, M.; Bräuer-Burchardt, Ch.; Brakhage, P.; Notni, G.: Optical 3D sensor for large objects in industrial applications, Proc. SPIE 5856 (2005) S. 118 – 127.
- /3/ Notni, G.: Einsatz von 3D-Messsystemen in der Produktionsumgebung, Fachmagazin Gießerei Erfahrungsaustausch 8 (2006) S. 10-13.

A number of hardware and software detail solutions are integrated for use in industrial environments. In order to avoid erroneous measurements due to disturbances like vibrations or illumination artifacts, an online check of the measuring data is performed, which detects impaired recordings and initializes an automatic repetition. The user of the device is supported actively in the planning of further recordings, as the measuring progress can be shown at any time on the live display of the cameras. A quick view of the reconstruction result may be accessed in order to facilitate the integrity of the data in object regions which are difficult to measure, by means of relevant recording positions.

In addition to the high flexibility of the manually controlled sensor head the system possesses extensive automation which is important in industrial environments. After completion of the measuring value recording, the output of the measuring results is realized as CAD files in the STL format. In order to achieve high speed of the measurement even with high point density and the resulting high volume of output data, the available parallelism of modern workstations is utilized in the best possible way by the software. Up to 100 partial views may be recorded in order to measure even sophisticated measuring objects with a measuring uncertainty ( $1\sigma$ ) of 50-100  $\mu\text{m}$  in measuring fields of up to several square meters. The complete measuring time including the recording of the measuring values and the calculation of the data is between 10 and 60 minutes depending on the number of necessary partial views. An example of the measurement of a sand core is shown in Fig. 4 (BMW engine works Landshut)/3/.

## Derived system solutions

The software basis developed from the stereo based fringe projection approach is the initial point for the possibility of the scalability of the solution approach for the most diverse realizations of the measuring devices. The new measuring principle was successfully applied in systems for tooth digitization (measuring field diameter 90 mm) as well as for the measurement of large industrial parts (up to several square meters in area) by the selective adaptation of the optics used and the retention of the general geometry and algorithms. The high flexibility of the solution also facilitates a rapid adaptation of the measuring systems to new application fields, e.g. the use in robot-driven 3D scanners ("kolibri ROBOT" – see Fig. 5).

Abb. 5:  
Messsystem »kolibri ROBOT«.

Fig. 5:  
Measurement system "kolibri ROBOT".



## Summary

The presented new solution of the stereo based fringe projection with phase correlation makes a flexible, error-tolerant realization of measuring systems with different measuring fields possible. Based on this, very robust configurations for industrial applications were realized. The accuracy is mainly determined by the camera optics. The influence of phase errors is mostly compensated.

### References:

- /1/ Kühmstedt P., Heinze M., Notni G.: Phasogrammetric optical 3D-Sensor for the measurement of large objects, Proc. SPIE 5457 (2004) p. 56-64.
- /2/ Kühmstedt P., Heinze M., Himmelreich M., Bräuer-Burchardt Ch., Brakhage P., Notni G.: Optical 3D sensor for large objects in industrial applications, Proc. SPIE 5856 (2005) p. 118 – 127.
- /3/ Notni G.: Einsatz von 3D-Messsystemen in der Produktionsumgebung, Fachmagazin Giesserei Erfahrungsaustausch 8 (2006) p. 10-13.

# Visuelles Stimulationssystem für den Einsatz in der Magnetoenzephalographie



Uwe Lippmann



Karsten Friedrich



Stefan Riehemann



Ralf Huonker <sup>1</sup>



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

Bei der Magnetoenzephalographie (MEG) wird die magnetische Aktivität des Gehirns mit Hilfe sehr empfindlicher Sensoren gemessen. Die dabei auftretenden magnetischen Flussdichten liegen im Bereich von wenigen Femtotesla. Diese Messungen sind nur in speziellen Messkammern möglich, die äußere Magnetfelder abschirmen (zum Vergleich: Das Erdmagnetfeld hat an der Oberfläche eine Flussdichte von 20 bis 30 Mikrototesla, ist also um etwa 10 Größenordnungen stärker).

Um gezielt Hirnfunktionen anregen zu können, wurde in einem gemeinsamen Projekt mit dem Biomagnetischen Zentrum der FSU Jena ein visuelles Stimulationssystem entwickelt. Der Zweck dieses Systems ist es, der Versuchsperson verschiedene Bilder oder Testmuster zu präsentieren, um die Reaktion des Gehirns darauf zu messen. Die Schwierigkeit bei der Realisierung eines solchen Systems besteht darin, dass sich das System wenigstens zum Teil innerhalb der Messkammer befindet und es dort keinerlei magnetische Störfelder verursachen darf. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wurde das System in zwei Teile unterteilt: Einen Teil zur Bilderzeugung und einen zur Darstellung des Bildes in der Kammer.

Der für die Erzeugung des Bildes zuständige Teil enthält sämtliche für das System notwendige Elektro- und Elektronikkomponenten und befindet sich außerhalb der Messkammer. Das Bild wird von einem Projektionssystem mit LCOS-Mikrodisplays erzeugt. Die Darstellung der drei Farben Rot, Grün und Blau erfolgt simultan mit drei exakt zueinander justierten Displays. Eine farbsequentielle Projektion kommt wegen unerwünschter sehphysiologischer Nebeneffekte nicht in Frage, da diese die Messungen verfälschen könnten. Das von den drei Displays erzeugte Farbbild wird von einer speziell entworfenen Optik in ein Bildleiterkabel aus geordneten Glasfasern eingekoppelt, das die optische Verbindung ins Innere der Messkammer herstellt.

Im Inneren der Messkammer wird das aus dem Bildleiter kommende Bild von einer zweiten Optik auf einen Schirm projiziert, der sich in etwa 30 cm Entfernung vor der Testperson befindet. An diesen Teil sind hinsichtlich der Materialauswahl extreme Forderungen gestellt: Sämtliche zum Aufbau des Systems erforderlichen Teile, die sich innerhalb der Messkammer befinden, müssen aus unmagnetischen Werkstoffen bestehen und dürfen keine magnetischen Verunreinigungen aufweisen. Neben der richtigen Werkstoffauswahl musste daher auch auf den Einsatz der richtigen Fertigungsverfahren, Werkzeuge und Schleifmittel geachtet werden.

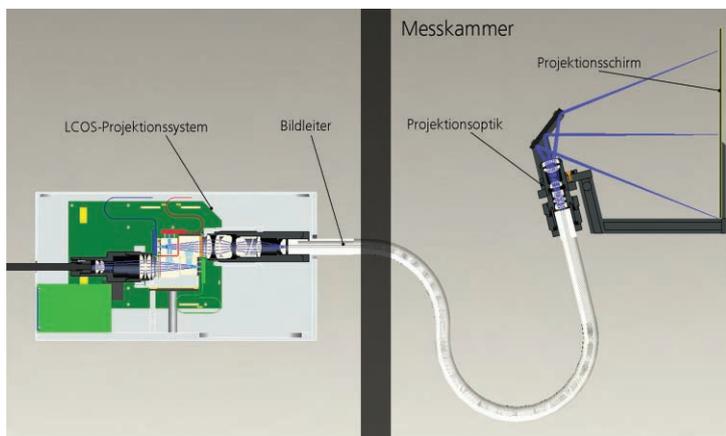


Abb. 1: Gesamtsystem mit LCOS-Projektionssystem zur Bildleitereinkopplung (links) und Projektionssystem zur Bilddarstellung in der Messkammer (rechts). Der Bildleiter ist ca. 4 m lang.

Fig. 1: Complete system with LCOS projection engine (left) and projection system for displaying the image in the measurement chamber (right). The image guide is about 4 m in length.

# Visual stimulation system for deployment in magneto-encephalography

Magneto-encephalography (MEG) is used to measure the magnetic activity of the human brain via extremely sensitive detectors. The magnetic flux density generated by brain activity is in the range of a few femtoteslas. Such measurements can only be performed in special measurement chambers that are shielded from outer magnetic fields (for comparison, the magnetic flux density of the Earth's magnetic field at the surface is 20 – 30 microteslas, about 10 orders of magnitude more powerful).

For the purpose of stimulating specific brain functions a visual stimulation system was developed in co-operation with the Biomagnetic Center of the FSU Jena. The purpose of this system is to present images or test patterns to a test person in order to measure the reaction of the brain to these patterns.

The difficulty in implementing this system is that it is at least partly situated inside the measurement chamber and must not generate any interfering magnetic fields. To meet this challenge the system was split into two sub-systems: One for generating images and test patterns and another for presenting the images inside the chamber.

The sub-system generating the images contains all of the necessary electronic components and is placed outside the measurement chamber. The image is generated by a projection engine using LCOS microdisplays. The three colors red, green, and blue are displayed simultaneously on three separate displays, exactly aligned with each other. A color-sequential projection with a single display was ruled out, because it would induce unwanted physiological side effects which could disturb the measurements.

The color image generated by the three displays is projected by a specially designed optical system into a fiber image guide which connects the two sub-systems outside and inside the measurement chamber.

Inside the measurement chamber, the image delivered by the image guide is projected by a second optical system onto a screen approximately 30 cm in front of the test person. The sensitive environment makes heavy demands on the choice of the construction materials of the system. All of the system parts that are inside the measurement chamber must be made of non-magnetic materials and must not contain traces of magnetic impurities. In addition to choosing the right material, the right manufacturing processes, tools, and grinding materials must be applied.

Abb. 2:  
Das projizierte Bild wird von der Versuchsperson betrachtet, gleichzeitig wird die Hirnaktivität gemessen.

Fig. 2:  
The projected image is viewed by the test person while neural activity is measured simultaneously.

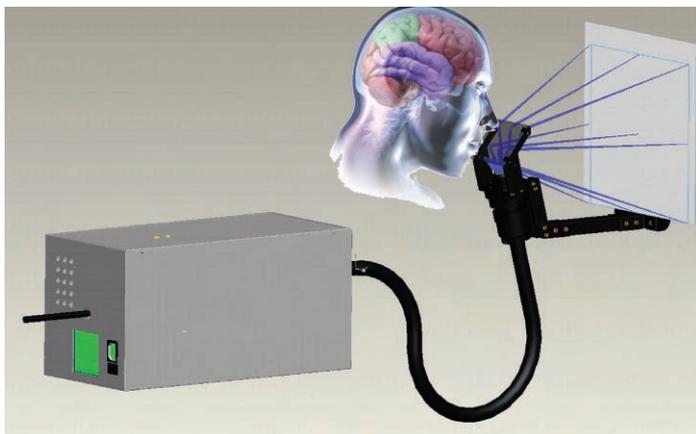


Abb. 3:  
Das realisierte System im Laboraufbau.

Fig. 3:  
Laboratory set-up of the assembled system.



# Hochsensitive Bestimmung der Verluste von synthetischem Quarzglas für die 193 nm Immersionslithografie



Sven Schröder



Bodo Kühn <sup>1</sup>



Angela Duparré

<sup>1</sup> Heraeus Quarzglas

In den letzten Jahren hat die Bedeutung von hochreinem synthetischen Quarzglas als optisches Material für den tiefen ultravioletten Spektralbereich (DUV) stetig zugenommen. Insbesondere in Projektionsoptiken für moderne 193 nm Immersionslithografie-Systeme (Abb. 1) kommt fast ausnahmslos dieses Material zum Einsatz. Allerdings treten Effekte wie Streulicht und Absorption auf, die die nutzbare Strahlungsleistung verringern und zur Verschlechterung der Abbildungseigenschaften führen. Beide Mechanismen haben daher einen kritischen Einfluss und müssen untersucht und separiert werden, um die Materialien zielgerichtet weiterzuentwickeln und Abbildungsfehler geeignet zu kompensieren. Darüber hinaus ermöglicht die Messung des Volumenstreuoeffizienten bei der Einsatzwellenlänge eine hochgenaue Bestimmung des Absorptionskoeffizienten aus Transmissionsverlustmessungen.

Quarzgläser weisen aufgrund ihrer amorphen Struktur intrinsische Streuverluste auf, die von den chemischen und strukturellen Eigenschaften des Materials abhängen. In einem Gemeinschaftsprojekt zwischen dem Fraunhofer IOF und Heraeus Quarzglas wurden die Volumenstreuoeffizienten  $\alpha$  verschiedener synthetischer Quarzglasproben mit unterschiedlichen Hydroxyl-Gehalten und fiktiven Temperaturen bei 193 nm gemessen [2].

Für die Untersuchungen wurde ein Streulichtmesssystem eingesetzt, das zusammen mit modernen Mess- und Auswertetechniken am Fraunhofer IOF entwickelt wurde [3,4]. Damit konnte die Volumenstreuung von Quarzgläsern bei 193 nm erstmalig mit der erforderlichen Sensitivität und Genauigkeit bestimmt werden.

Um die Ursachen der DUV-Streuung in Quarzgläsern zu untersuchen, wurden winkelaufgelöste Streulichtmessungen (ARS) unter s- und p-Polarisation an einer Probe mit 200 mm Durchmesser durchgeführt (Abb. 2a). Die Ergebnisse (Abb. 2b) deuten auf Rayleighstreuung hin, deren Ursache Dichteschwankungen auf molekularer Ebene sind.

Um die Volumenstreuoeffizienten einer Reihe von Materialien zu bestimmen, wurde eine auf totalen Streulichtmessungen (TS) basierende Technik angewandt (Abb. 3a). Für jedes Material wurden Proben mit 25 mm Durchmesser und zunehmender Dicke  $d$  untersucht. Aus dem Anstieg der TS-Werte mit  $d$  wurde  $\alpha$  bestimmt. Die Ergebnisse (Abb. 3b) zeigen eine signifikante Abhängigkeit der Streueigenschaften von den chemischen und physikalischen Materialeigenschaften.

Die große Bandbreite an Volumenstreuoeffizienten belegt die Notwendigkeit von genauen und sensitiven Streulichtmessungen bei der Einsatzwellenlänge. Das Messsystem sowie die Mess- und Auswertetechniken, die am IOF entwickelt wurden, bestimmen dabei den Stand der Technik für Streulichtbasierte Materialforschung bei 193 nm.

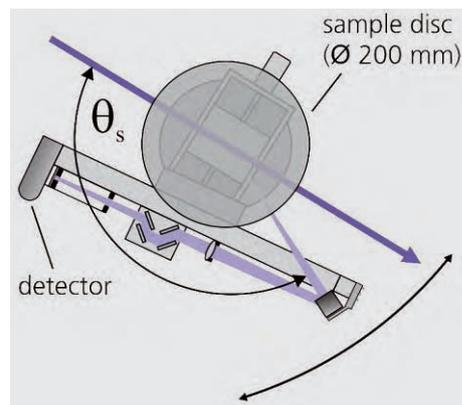
Abb 1: Projektionssystem für die 193 nm Lithographie [1].

Fig. 1: Projection system for 193 nm lithography [1].



Abb. 2a: ARS-Messung schematisch.

Fig. 2a: ARS measurement (schematic).



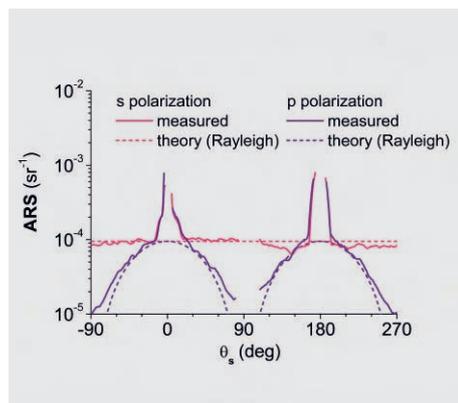
# High-sensitive determination of optical losses in synthetic fused silica for 193 nm immersion lithography

In recent years high-purity synthetic fused silica has become more and more important as optical material for the deep ultraviolet spectral range (DUV). Particularly for projection optics in modern 193 nm immersion lithography systems (Fig. 1), nearly without exception fused silica is used as lens material. However, scattering and absorption result in reduced throughput and image distortion. Thus, both loss mechanisms are critical for this application and must be investigated and separated in order to optimize the materials and compensate distortion effects. In addition, at-wavelength measurements of the total bulk scattering coefficient enable the accurate determination of the absorption coefficient from transmission-drop measurements.

For fused silica, because of its amorphous structure, scatter losses can only be reduced down to intrinsic minimum values which depend on the chemical and structural properties. In a joint project between the IOF and Heraeus Quarzglas, the bulk scattering coefficients  $\alpha$  of various synthetic fused silica samples with different hydroxyl contents and fictive temperatures were measured at 193 nm [2].

Abb. 2b: Ergebnisse der ARS-Messungen.

Fig. 2b: ARS measurement results.



The investigations were based on a system for scatter measurements at 193 nm developed at the Fraunhofer IOF together with sophisticated measurement and analysis techniques [3,4]. This instrumentation for the first time enabled a thorough and sufficiently sensitive measurement of bulk scattering from fused silica at 193 nm.

In order to investigate the nature of the DUV scattering in fused silica, angle resolved scatter measurements (ARS) with s-polarized and p-polarized incident radiation were performed on a sample disc with a diameter of 200 mm (Fig. 2a). The measured curves shown in Fig. 2b indicate a Rayleigh scatter distribution arising from inhomogeneities with molecular dimensions.

To determine the bulk scattering coefficients for a variety of materials a technique based on total scatter measurements (TS) was used (Fig. 3a). For each material, samples with a diameter of 25 mm and increasing thickness were measured. From the increase in the TS values with sample thickness the desired scattering coefficient was determined. The results shown in Fig. 3b demonstrate that the scattering properties of the materials are significantly influenced by the chemical and physical properties.

The wide range of values for a depending on the material demonstrates the necessity for measurements at the wavelength of interest with high accuracy and sensitivity. The instrument and evaluation procedures developed at the IOF constitute the state-of-the-art for scatter-based material research at 193 nm.

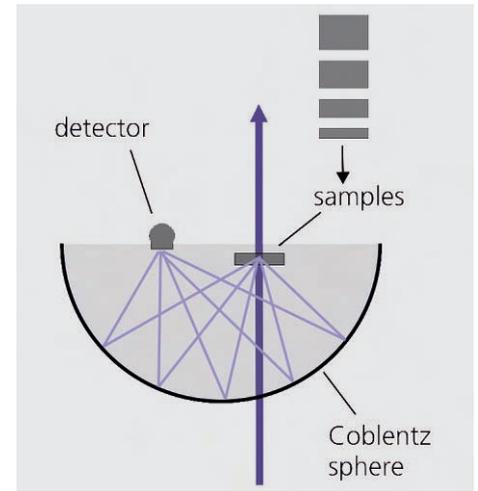


Abb. 3a: TS-Messung schematisch.

Fig. 3a: TS measurement (schematic).

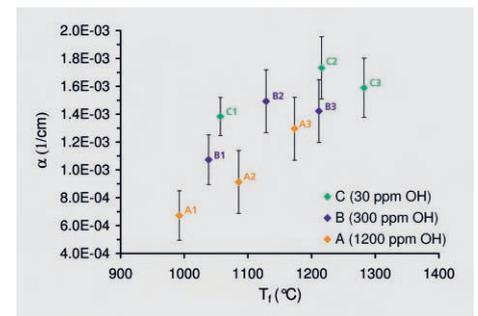


Abb. 3b: Volumenstreckkoeffizienten bei 193 nm für Materialien mit verschiedenen Hydroxyl-Gehalten und fiktiven Temperaturen.

Fig. 3b: Bulk scattering coefficients determined at 193 nm for materials with different hydroxyl contents and fictive temperatures.

## References:

- /1/ Heraeus Annual Report 2005.
- /2/ Schröder, S.; Kamprath, M.; Duparré, A.; Tünnermann, A.; Kühn, B.; Klett, U.: Bulk Scattering Properties of Synthetic Fused Silica at 193 nm, Opt. Express 14, 10537-10549 (2006).
- /3/ Schröder, S.; Gliech, S.; Duparré, A.: Measurement system to determine the total and angle resolved light scattering of optical components in the deep-ultraviolet and vacuum-ultraviolet spectral regions, Appl. Opt. 44, 6093-6107 (2005).
- /4/ Schröder, S.; Gliech, S.; Duparré, A.: Scattering analysis of optical components in the DUV, Proc. SPIE 6101, 61011H (2006).

# Besondere technische Ausstattung

Das Institut verfügt über exzellent ausgestattete Labore auf einer Fläche von 2550 m<sup>2</sup>. Darin eingeschlossen sind 860 m<sup>2</sup> Reinraum der Klasse 10000 bis 10 sowie eine höchsten Ansprüchen genügende Mechanik-Werkstatt.

## Beschichtungstechnik

für EUV- bis NIR-Spektralbereich

- Sputteranlagen
- Hochvakuumbedampfungsanlagen
- Mikrogalvanik

## Mikro- und Nanostrukturtechnik

- Photolithographieanlage
- Laserstrahl-Lithographieanlage
- Elektronenstrahl-Lithographieanlage

## Mikrooptik-Technologie

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

## Ultrapräzisionsbearbeitung

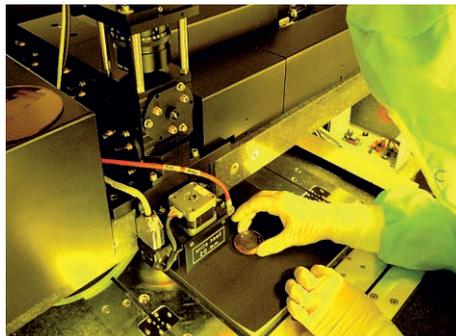
- Ultrapräzisions-Drehmaschinen
- Ultrapräzisions-Fräsmaschine
- Fast/slow tool servo
- CNC-Mehrfachfräsmaschine
- 5-Achs-Mikrobearbeitungszentren

## Integration, Mikromontage und Handling von Mikrobauteilen

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

## Messtechnik

- Streulichtmesssystem (157 nm – 10,6 µm)
- Spektralphotometer (120 nm – 50 µm)
- Röntgendiffraktometer
- Röntgenreflektometer
- Rasterkraftmikroskop
- Elektronenmikroskop
- Laserscanningmikroskop
- Freiformmesssystem UA3P
- Messsystem zur 3D-Formerfassung
- Messverfahren zur Charakterisierung optischer Komponenten und Systeme
- Messtechnik zum Test von Lebensdauer und Haftfestigkeit optischer Schichten
- Klimaprüfung



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.

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

- Sputtering technologies
- High vacuum evaporation
- Micro-electroplating

## Micro- and nano-structuring technologies

- Photolithography
- Laser beam lithography
- Elektron beam lithography

## Micro-optics technologies

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

## Ultra-precision machining

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

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

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

## Measurement technologies

- Scattered light measurement system (157 nm – 10.6 μm)
- Spectral photometer (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
- Measurement techniques for the characterization of optical components and systems
- Measurement techniques for testing of long-term stability and adhesion of optical coatings
- Climate testing



---

### Gäste Guests

**Prof. Dr. Govind P. Agrawal**  
University of Rochester, Rochester, USA

**Dr. Bruno Berge**  
Varioptic, Lyon, France

**Dr. Gencho Danev**  
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

**James A. Davis, PH.D.**  
General Atomics, San Diego, USA

**Dr. Akiro Endo**  
Extreme UltraViolet Lithography System  
Development Association (EUVA), Tokyo, Japan

**Prof. Dr. David Hanna**  
University of Southampton, Southampton,  
Great Britain

**Sinitirou Hata**  
Panasonic Factory Solutions Co., Ltd., Kadoma  
City, Osaka, Japan

**Prof. Dr. Toshikuni Kaino**  
Tohoku University, Sendai, Japan

**Eisaku Kakiuchi, Hirohiko Morikawa**  
Toyota, Zaventem, Belgium

**Prof. Henryk Kasprzak**  
Wroclaw University of Technology, Wroclaw,  
Poland

**Prof. Dr. Yuri S. Kivshar**  
The Australian National University, Canberra,  
Australia

**Yohei Kurashima, Ryuichi Kurosawa, Takeshi  
Miyashita, Akira Makabe**  
Seiko Epson Corporation, Fujimi, Japan

**Prof. Dr. Ferenc Krausz**  
Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching,  
Germany

**Dr. Juan I. Larruquert**  
Instituto de Física Aplicada. CSIC, Madrid, Spain

**Prof. Dr. Francesco Michelotti**  
Universita' degli Studi di Roma  
»La Sapienza«, Roma, Italy

**Riichi Okuda, Tomoaki Nishiyama**  
Mitsui Global Strategic Studies  
Institute, Tokyo, Japan

**Kasper M. Paasch, PH.D.**  
Danfoss, Sønderborg, Denmark

**Prof. Dr. Olivier Parriaux**  
University St. Etienne, St. Etienne, France

**Robert Routh**  
RPM OPTOELECTRONICS, Santa Rosa, USA

**Jeff Roblee**  
Precitech, Inc., Keen, New Hampshire, USA

**Yuki Sadamitsu**  
Miyagi Prefectural Government, Sendai, Japan

**Guruvenket Srinivasan**  
Indian Institute of Science, Bangalore, India

**Raul Tudela**  
University Barcelona, Barcelona, Spain

**Dr. Reinhard Völkel**  
SUSS Microoptics, Neuchâtel, Switzerland

**Prof. Zhanshan Wang**  
Tongji University, Institute of Precision Optical  
Engineering, China

**Ron Willey**  
Willey Optical Consultants, Charlevoix, USA

**Carl A. Zanoni**  
Zygo Corporation and Subsidiaries, Middlefield,  
Connecticut, USA

**Yasufumi Yamada**  
RICOH, Yokohama, Japan

---

### Internationale Kooperationen International Co-operations

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

**France**  
University St. Etienne, Prof. Olivier Parriaux

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

**Italy**  
University »La Sapienza«, Rom,  
Prof. Francesco Michelotti

**Poland**  
Institute of Optoelectronics, MUT, Warsaw,  
Dr. Henryk Fiedorowicz

**Portugal**  
University Aveiro, Prof. Nikolai Sobolew

**Russia**  
Moscow State University,  
Prof. Alexander Tikhonravov  
Institute of Crystallography, Moscow,  
Dr. Igor Kozhevnikov

**Switzerland**  
IMT University Neuchâtel, Prof. Hans-Peter Herzig

**Spain**  
Instituto de Física Aplicada CSIC, Madrid,  
Dr. Juan I. Larruquert

**Ukraina**  
National Technical University "Kharkov Polytech-  
nic Institute", Prof. V. V. Kondratenko

**USA**  
Naval Air Warfare Center, China Lake,  
Dr. Jean M. Bennett  
University of Wisconsin-Madison,  
Prof. Roxann L. Engelstad

---

### Messebeteiligungen 2006 Fairs Participations 2006

**Photonics West**  
24. – 26.1., San Jose, USA

**Control**  
9. – 12.5., Sinsheim, Germany

**SID**  
4. – 9.6., San Francisco, USA

**OPTATEC**  
20. – 23.6., Frankfurt/M., Germany

**Vision**  
7. – 9.11., Stuttgart, Germany

**Euromold**  
29.11. – 2.12., Frankfurt/Main, Germany

---

### Messeexponate 2006 Fair Exhibits 2006

Optical coatings on plastics

RGB-illumination module

Laser beam soldered microoptical  
components

Modulated red channel on LTCC

Multi-view 3D measurement system

LED high-brightness illumination

Insect inspired imaging for  
ultra-compact vision system

Multilayer mirrors for EUV and soft X-rays

OPTIMON 3.0: In-situ broad band monitoring

Scratch resistant antireflective coating AR-hard

Rugate filters for omnidirectional antireflection coatings

Plasmon boosted interference coatings for spectrally selective absorbers

Laser scanning projector

High efficient optical grids

Equipment for microassembly tasks (magazines, grippers)

Optics and electronics on ceramic platforms

Ultra-precise opto-mechanical systems (NIR-Camera optics; mirror for IR an VIS; optics for beamshaping)

Nanostructure design for ultra-hydrophobic surfaces

Design and characterization of optical components

3D measurement system for optical freeforms

OLED based near-to-eye stimulation system

Micro optics for LED light sources

Multiview 3D-Scanning

---

## Preise 2006 Awards 2006

Fakultätspreis der Physikalisch-Astronomischen Fakultät der FSU Jena für die beste Dissertation  
an Dr. Jacques Duparré  
16. Juni 2006, Jena

Joseph-von-Fraunhofer-Preis  
an Dr. Thomas Peschel, Christoph Damm und Dr.-Ing. Volker Guyenot  
18. Oktober 2006, Bremen

Wissenschaftspreis des Stifterverbandes  
an Dr. Andreas Bräuer, Dr. Peter Dannberg, Dr. Sergey Kudaev und Dr. Peter Schreiber  
18. Oktober 2006, Bremen

---

## 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

PROMOT – Produktion mikrooptischer Komponenten und Systeme  
21. März und 26. September 2006

OptoNet-Workshop  
Ultra precision manufacturing of aspheres, freeforms and microstructures  
16. – 17. Mai 2006

DFG Statuskolloquium im Rahmen des Schwerpunktprogramms  
»Neue Strategien der Mess- und Prüftechnik für die Produktion von Mikrosystemen und Nanostrukturen (SPP 1159)«  
29. – 30. Mai 2006

OptoNet Workshop  
Intelligente LED-Beleuchtungssysteme  
29. Juni 2006

Alumni-Workshop  
7. Juli 2006

Eröffnung CMN-Optics  
Center for Advanced Micro- and Nano-Optics  
14. Juli 2006

EFDS – OptoNet – Fraunhofer IOF – Workshop  
Practical design and production of optical thin films  
18. – 22. September 2006

Praktikum und Seminar 3D-Messtechnik  
10. November 2006

Tagung des BMBF-Projektverbandes BRIOLAS  
»Brillante Hochleistungs-Diodenlaser«  
8. – 9. November 2006

Herbstsitzung AK plasma  
Plasmaoberflächentechnologie  
Europäische Forschungsgesellschaft  
Dünne Schichten e.V.  
22. – 23. November 2006

---

## Vorlesungen Lectures

Dr. Ramona Eberhardt  
Optikmontage / Fertigung spezieller Bauteile  
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 und Dr. Jens-Peter Ruske  
Mikrostrukturtechnik für die Mikro- und Nanooptik  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

---

## Diplomarbeiten Diploma Theses

René Bauer  
Grundlagenuntersuchungen zu Einflussgrößen auf die Gasabgabe aerostatischer Gasführungen unter Hochvakuumbedingungen  
Fachhochschule Jena, 12/06

Martin Breitbarth  
Analyse von Oberflächenstrukturen an optischen Freiformflächen mit Waveletmethoden  
Friedrich-Schiller-Universität, 08/06

Andreas Brückner  
Hochgenaue Positionsbestimmung mit künstlichen Facettenaugenobjektiven  
Friedrich-Schiller-Universität, 06/06

Christian Dille  
Untersuchung und Anwendung nichtlinearer optischer Grenzflächeneffekte zur Charakterisierung von Fokussierungsoptiken  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 12/06

Hans-Christoph Eckstein  
Untersuchung von instabilen diffraktiven Laserresonatoren  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/06

Karsten Friedrich  
Visuelles Stimulationssystem für den Einsatz in der Magnetoenzephalographie  
Fachhochschule Jena, 12/06

Constanze Großmann  
Aufbau und Charakterisierung eines 3-Chip LCoS Kuppelprojektionssystems  
Fachhochschule Merseburg, 02/06

Andrea Kreitschmann  
Die Bedeutung der Gründungsidee für den Innovationserfolg – Eine empirische Analyse von Spin-offs aus Forschungsinstituten  
Friedrich-Schiller-Universität, 11/06

Jens Lieder  
Verfahren zur Messung von mechanischen Spannungen dünner Schichten auf Kunststoffsubstraten  
Fachhochschule Jena, 12/06

Marko Perske  
Entwicklung einer Glättungsschicht für EUV-Spiegel  
Fachhochschule Jena, 10/06

Andreas Reimann  
Rotierende Facettenaugenkamerazeile zur Rundumsicht  
Fachhochschule Jena

Juliane Roßbach  
Der Einfluss des Inkubators auf die Umsetzung von Innovationen durch Spin-offs – Eine empirische Analyse von Spin-offs aus Forschungsinstituten  
Friedrich-Schiller-Universität, 11/2006

Philipp Schmäzle  
Bioinspired imaging of close-up objects – Microoptical realisation comprising integrated OLED illumination  
Universität Karlsruhe, 12/06

Marko Stumpf  
Entwicklung einer Technologie zur Überprüfung lasergeschriebener diffraktiver Elemente (DOE) mittels UV-Abformung und anschließendem Trockenätzen in das Substrat  
Fachhochschule Jena, 03/2006

---

## Bachelor

Jose Miguel Chacon Ibarra  
Entwicklung einer Schnittstelle zur Roboterpositionierung für optische 3D-Sensoren  
Fachhochschule Jena, 10/06

Hagen Pauer  
Realisierung lateraler Schichtdickegradienten für EUV-Spiegel  
Fachhochschule Jena, 10/06

---

## Dissertationen Dissertations

Dr. rer. nat. Antje Kaless  
Oberflächenmodifizierung von Polymethylmethacrylat durch Plasmabehandlung  
Martin-Luther-Universität Halle/Merseburg, 10/06

Dr. rer. nat. Kerstin Lau  
Plasmagestützte Aufdampfprozesse für die Herstellung haftfester optischer Beschichtungen auf Biphenol-A Polycarbonat  
Martin-Luther-Universität Halle/Merseburg, 09/06

Dr. rer. nat. Steffen Wilbrandt  
Online-Monitoring inhomogener optischer Schichtsysteme im visuellen Spektralbereich  
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 06/06

## Patents

### Patentanmeldungen 2006

(A1)

Beckert, E.; Böhme, S.; Lütz, H.-J. (Carl Zeiss Jena GmbH); Preißer, U. (Carl Zeiss Jena GmbH); Bartzke, K. (Carl Zeiss Jena GmbH); Günther, G. (Carl Zeiss Jena GmbH)

**Verfahren zum justierten Verbinden von Platten und nach diesem Verfahren hergestellte optische Baugruppe**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 043 185

(A2)

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

**Verfahren zur Bearbeitung eines optischen Elements, zur Herstellung eines Prägwerkzeugs, Verwendung einer Bearbeitungsmaschine sowie optisches Element zur Verwendung im Terahertz-Wellengebiet**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 011 964

(A3)

Duparré, J.; Bräuer, A.; Schreiber, P.

**Bilderfassungssystem zur Rundumsicht**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 019 124

(A4)

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

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

Anmelde-Az.: DE 10 2006 004 802

(A5)

Fuchs, U.; Zeitner, U. D.; Tünnermann, A.; Thomas, J. U. (FSU Jena); Wikszak, E. (FSU Jena); Nolte, S. (FSU Jena)

**Verfahren zum Strukturieren von lichtleitenden Fasern entlang deren Längsachse (longitudinale Strukturierung) basierend auf der nicht-linearen Absorption von Laserstrahlung**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 046 313

(A6)

Füchsel, K.; Schulz, U.; Kaiser, N.; Stolz, C. (Rodenstock GmbH); Scherg, G.-P. (Rodenstock GmbH); Götz, B. (Rodenstock GmbH)

**Kratzfeste entspiegelte Oberfläche mit Antifog-Eigenschaften**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 008 784

(A7)

Lippmann, U.; Riehemann, S.; Palme, M.

**Okularsystem**

Anmelde-Az.: DE 10 2005 062 847

(A8)

Munzert, P.; Scheler, M.; Schulz, U.; Kaiser, N.

**Erzeugung einer Nanostruktur zur Entspiegelung von Kunststoffoberflächen durch Vorbeschichtung und Plasmaätzen**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 056 578

(A9)

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

**Vorrichtung und Verfahren zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 049 695

(A10)

Stöckl, W.; Scheler, M.; Uhlig, H.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Risse, S.

**Korrosionsbeständiger Silberspiegel**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 011 973

(A11)

Tünnermann, A.; Kley, B. (FSU Jena); Kämpfe, T. (FSU Jena); Clausnitzer, T. (FSU Jena)

**Verschlossene, binäre Transmissionsgitter**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 036 831

(A12)

Tünnermann, A.; Limpert, J. (FSU Jena); Ortac, B. (FSU Jena)

**Mode-locked large mode-area fiber laser pulse source**

Anmelde-Az.: PCT/EP2006/012641

(A13)

Wippermann, F.; Schreiber, P.; Bräuer, A.

**Vorrichtung zur Homogenisierung von Strahlung mit nicht regelmäßigen Mikrolinsenarrays**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 047 941

(A14)

Yulin, S.; Feigl, T.; Benoit, A.; Kaiser, N.

**Thermisch stabiler Multilayer-Spiegel für den EUV-Spektralbereich**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 006 283

(A15)

Zeitner, U. D.; Schets, S. I. (eZono GmbH); Sobrino, E. V. (eZono GmbH)

**Ultraschallsonde und Verfahren zur optischen Detektion von Ultraschallwellen**

Anmelde-Az.: DE 10 2006 033 229

---

## Deutsche Patenterteilungen 2006

(P1)

Beckert, E.; Damm, C.; Eberhardt, R.;  
Schreiber, P.

**Keramiksubstrate mit integrierten  
mechanischen Strukturen zum direkten  
Fassen von optischen Bauelementen**

Veröffentlichungsnummer: DE 103 47 450

(P2)

Büttner, A.; Zeitner, U. D.

**Laserresonator mit oberflächenstrukturier-  
ten Endspiegeln und Verfahren zu ihrer  
Herstellung**

Veröffentlichungsnummer: DE 10 2004 047 493

(P3)

Danz, N.; Schäfer, B.; Harz, M.; Büttner, A.;  
Schreiber, P.

**Anordnung und Verfahren zur optischen  
Detektion von in Proben enthaltenen  
chemischen, biochemischen Molekülen  
und/oder Partikeln**

Veröffentlichungsnummer: DE 103 24 973

(P4)

Damm, C.; Peschel, T.; Zeitner, U. D.; Banse, T.;  
Feigl, T.

**Halterung für optische Elemente**

Veröffentlichungsnummer: DE 10 2004 024 755

(P6)

Feigl, T.; Kaiser, N.; Yulin, S.; Kuhlmann, T.

**Spiegel für den EUV- Spektralbereich**

Veröffentlichungsnummer: DE 101 55 711

(P7)

Kalkowski, G.; Damm, C.; Beckert, E.; Leitel, A.  
(Carl Zeiss Jena GmbH)

**Element und Verfahren zu seiner Herstel-  
lung, bei dem zwei in Bezug zu mindestens  
einer Justierachse positionierte Körper  
stoffschlüssig miteinander verbunden sind**

Veröffentlichungsnummer: DE 102 28 053

(P8)

Notni, G.; Fichtner, D. (TU Dresden); Reitemeier,  
B. (TU Dresden)

**Verfahren zur Herstellung von Atemmasken,  
Epithesen oder Strahlenapplikatoren**

Veröffentlichungsnummer: DE 101 38 416

(P9)

Palme, M.; Riehemann, S.; Notni, G.

**Beleuchtungsbaugruppe zur Vermessung  
der optischen Eigenschaften von Linsen und  
Objektiven**

Veröffentlichungsnummer: DE 103 44 788

(P10)

Schallenberg, U. (mso Jena); Frank, M.

**Verfahren zur Herstellung eines optischen  
Elementes**

Veröffentlichungsnummer: DE 196 41 303

---

## Ausländische Patenterteilungen 2006

(P11)

Bräuer, A.; Peschel, U. (FAU Erlangen); Pertsch, T.  
(FSU Jena); Lederer, F. (FSU Jena)

**Optisches System**

Veröffentlichungsnummer: EP 1 340 122

(P12)

Mohaupt, M.; Buß, W.

**Verfahren zum Herstellen einer mikro-  
funktionalen Verbundvorrichtung**

Veröffentlichungsnummer: EP 1 224 698

(P13)

Notni, G.; Heinze, M.; Kühmstedt, P.

**Verfahren und Vorrichtung zur  
Bestimmung der räumlichen Koordinaten  
eines Gegenstandes**

Veröffentlichungsnummer: US 7,136,170

(P14)

Feigl, T.; Kaiser, N.; Yulin, S.; Kuhlmann, T.

**Monochromator mirror for the EUV  
spectral range**

Veröffentlichungsnummer: RU 2282222

---

## Deutsche Gebrauchsmustererteilungen 2006

(GM1)

Lippmann, U.; Kühmstedt, P.; Riehemann, S.;  
Notni, G.

**Projektionsvorrichtung zur Projektion  
eines Bildes**

Eintragungsnummer: DE 20 2006 004 117.6

(GM2)

Schulz, U.; Lau, K.; Kaiser, N.; Damm, C.;  
Schmidt, U.

**Gerät zur Haftfestigkeitsprüfung von  
Beschichtungen mittels Klebebandabriss**

Eintragungsnummer: DE 20 2006 009 617.5

## Scientific Publications

### Bücher Books

Duparré, A.  
**Light Scattering Techniques for the Inspection of Microcomponents and Microstructures**  
Optical Methods for the Inspection of Microsystems (2006) p. 103-119, ISBN 0-8493-3682-1

Eberhardt, R.; Beckert, E.; Buß, W.; Karthe, W.; Mauroner, O.; Notni, G.; Tünnermann, A.; Wächter, C.  
**Produktion von mikrooptischen Bauteilen und Systemen. Status und Perspektiven.**  
Jena, September 2006

Karthe, W.; Wächter, C.  
**Optik und Informationstechnik**  
Technologieführer Grundlagen, Anwendungen, Trends (2006) S. 98-103, ISBN 3-540-33788-1

Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Mehrbild-Messsysteme in 3D: Multiview-Systeme in Rapid Prototyping- und Qualitätssicherungs-Prozessketten**  
Berührungslose Messtechnik (2006) S. 24-27, ISBN 3-9259-1941-2

Schreiber, P.; Kudaev, S.  
**Homogenisierte LED-Lichtquellen**  
Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 2005 (2005) S. 149-158, ISBN 3-7949-0726-4

### Zeitschriften Journals

Andersen, T.V.; Schmidt, O.; Bruchmann, C.; Limpert, J.; Agueraray, C.; Cormier, E.; Tünnermann, A.  
**High repetition rate tuneable femtosecond pulses and broadband amplification from fiber laser pumped parametric amplifier**  
Optics Express 14 (2006) 11 p. 4765-4773, ISSN 1094-4087

Augustin, M.; Iliew, R.; Etrich, C.; Setzpfandt, F.; Fuchs, H.-J.; Kley, E.-B.; Nolte, S.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Tünnermann, A.  
**Dispersion properties of photonic crystal waveguides with a low in-plane index contrast**  
New Journal of Physics 8 (2006) 9 p. 1-13, ISSN 1367-2630

Bauer, N.; Notni, G.; Scherer, S.; Schick, A.  
**Ganz sicher kein ‚Knick in der Optik!‘ – Oberflächen konfokal messen**  
Inspect (2006) 1 S. 78-79

Beckert, E.  
**Integration auf Keramik: Optoelektronik für die Analysetechnik**  
Photonik 38 (2006) 3 S. 18, ISSN 1432-9778

Blömer, D.; Szameit, A.; Dreisow, F.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Nonlinear refractive index of fs-laser-written waveguides in fused silica**  
Optics Express 14 (2006) 6 p. 2151-2157, ISSN 1094-4087

Blum, M.; Kunert, K.; Nolte, S.; Riehemann, S.; Palme, M.; Peschel, T.; Dick, M.; Dick, H.-B.  
**Presbyopietherapie mit Femtosekundenlaser**  
Der Ophthalmologe 103 (2006) 12 S. 1014-1019, ISSN 0941-293X

Bunkowski, A.; Burmeister, O.; Clausnitzer, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Danzmann, K.; Schnabel, R.  
**Diffraction optics for gravitational wave detectors**  
Journal of Physics: Conference Series 32 (2006) 1 p. 333-338, ISSN 1742-6588

Bunkowski, A.; Burmeister, O.; Clausnitzer, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Danzmann, K.; Schnabel, R.  
**Optical characterization of ultrahigh diffraction efficiency gratings**  
Applied Optics 45 (2006) 23 p. 5795-5799, ISSN 0003-6935

Bunkowski, A.; Burmeister, O.; Danzmann, K.; Schnabel, R.; Clausnitzer, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.  
**Demonstration of three-port grating phase relations**  
Optics Letters 31 (2006) 16 p. 2384-2386, ISSN 0146-9592

Burghoff, J.; Grebing, C.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Efficient frequency doubling in femtosecond laser-written waveguides in lithium niobate**  
Applied Physics Letters 89 (2006) 8 p. 081108, ISSN 0003-6951

Chen, C.-C.; Pertsch, T.; Iliew, R.; Lederer, F.; Tünnermann, A.  
**Directional emission from photonic crystal waveguides**  
Optics Express 14 (2006) 6 p. 2423-2428, ISSN 1094-4087

Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Reimann, A.  
**Chirped arrays of ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence**  
Optics Express 13 (2005) 26 p. 10539-10551, ISSN 1094-4087

Duparré, J.; Wippermann, F.  
**Microoptical artificial compound eyes**  
Bioinspiration & Biomimetics 1 (2006) 1 R1-R16, ISSN 1748-3182

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.  
**EUV multilayer optics**  
Microelectronic Engineering 83 (2006) 4-9 Spec. Iss. p. 703-706, ISSN 0167-9317  
Flemming, M.; Duparré, A.  
**Design and characterization of nanostructured ultra-hydrophobic coatings**  
Applied Optics 45 (2006) 7 p. 1397-1401, ISSN 0003-6935

Fuchs, U.; Zeitner, U.D.; Tünnermann, A.  
**Hybrid optics for focusing ultrashort laser pulses**  
Optics Letters 31 (2006) 10 p. 1516-1518, ISSN 0146-9592

Garwe, F.; Rockstuhl, C.; Etrich, C.; Hübner, U.; Bauerschäfer, U.; Setzpfandt, F.; Augustin, M.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.; Lederer, F.  
**Evaluation of gold nanowire pairs as a potential negative index material**  
Applied Physics B: Lasers and Optics 84 (2006) 1-2 p. 139-148, ISSN 0946-2171

Gatto, A.; Yang, M.; Kaiser, N.; Schmidt, J.U.; Sandner, T.; Schenk, H.; Lakner, H.  
**High-performance coatings for micromechanical mirrors**  
Applied Optics 45 (2006) 7 p.1602-1607, ISSN 0003-6935

Giesen, A.; Tünnermann, A.  
**Laserforschung in Deutschland**  
Laser Technik Journal (2006) 2 S. 9-12, ISSN 0143-6570

Hädrich, S.; Schreiber, T.; Pertsch, T.; Limpert, J.; Peschel, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Thermo-optical behavior of rare-earth-doped low-NA fibers in high power operation**  
Optics Express 14 (2006) 13 p. 269-275, ISSN 1094-4087

Heger, P.; Stenzel, O.; Kaiser, N.  
**Design and fabrication of selective thin film absorbers on the basis of silver island films**  
VIP Vacuum's best (2006) p. 53-56

Janicki, V.; Gäbler, D.; Wilbrandt, S.; Leitl, R.; Stenzel, O.; Kaiser, N.; Lappschies, M.; Görtz, B.; Ristau, D.; Rickers, C.; Vergöhl, M.  
**Deposition and spectral performance of an inhomogeneous broadband wide angular antireflective coating**  
Applied Optics 45 (2006) 30 p. 7851-7857, ISSN 0003-6935

Kachan, S.; Stenzel, O.; Ponyavina, A.  
**High-absorbing gradient multilayer coatings with silver nanoparticles**  
Laser and Optics B 84 (2006) 1-2 p. 281-287, ISSN 1098-0121

Kaiser, N.  
**Neue Entwicklungen auf dem Gebiet optischer Schichten**  
Photonik 38 (2006) 6 S. 50-52

- Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.; Harnisch, G.  
**Electrostatic chuck for EUV masks**  
Microelectronic Engineering 83 (2006) 4-5 p. 714-717, ISSN 0167-9317
- Leitel, R.; Heger, P.; Stenzel, O.; Kaiser, N.  
**Theoretical treatment of thermal shifts in resonant grating waveguide**  
Journal of Optics A: Pure and Applied Optics 8 (2006) 3 p. 333-337, ISSN 1464-4258
- Leitel, R.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Gäbler, D.; Janicki, V.; Kaiser, N.  
**Optical and non-optical characterization of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> compositional gradient index layers and rugate structures**  
Thin Solid Films 497 (2006) 1-2 p. 135-141, ISSN 0040-6090
- Limpert, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Manek-Hönninger, I.; Salin, F.; Tünnermann, A.  
**Ultrafast high power fiber laser systems**  
Comptes Rendus Physique 7 (2006) 2 p. 187-197, ISSN 1631-0705
- Limpert, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.  
**High-power ultrafast fiber laser systems**  
IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics 12 (2006) 2 p. 233-244, ISSN 1077-260X
- 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 (2006) 7 p. 2175-2720, ISSN 1094-4087
- Matthäus, G.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Thermal effects vs. gain in femtosecond laser written waveguides in neodymium doped fused silica**  
Applied Physics A: Materials Science and Processing 83 (2006) 3 p. 347-350, ISSN 0947-8396
- Matthäus, G.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Nolte, S.; Torosyan, G.; Beigang, R.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Surface-emitted THz generation using a compact ultrashort pulse fiber amplifier at 1064 nm**  
Optics Communications 261 (2006) 1 p. 114-117, ISSN 0030-4018
- Michaelis, D.; Wächter, C.; Burger, S.; Zschiedrich, L.; Bräuer, A.  
**Micro-optically assisted high index waveguide coupling**  
Applied Optics 45 (2006) 8 p. 1831-1838, ISSN 0003-6935
- Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Damm, C.; Peschel, T.; Tünnermann, A.; Haugeneder, E.; Döring, H.-J.; Brandstätter, C.  
**Assembly of an aperture plate system for projection mask-less lithography**  
Microelectronic Engineering 83 (2006) 4-9 Spec. Iss. p. 980-983, ISSN 0167-9317
- Notni, G.  
**Hohes Potenzial – Einsatz von 3D-Messsystemen in der Produktionsumgebung**  
Gießerei-Erfahrungsaustausch (2006) 7-8 p. 10-13, ISSN 0016 – 9733
- Notni, G.  
**Streifenprojektion – Unterschiedliche Systemkonzepte realisieren**  
PRAXIS PROFILINE – Berührungslose Messtechnik (2006) Nov. S. 2-4
- Notni, G.; Kühmstedt, P.  
**Produktinfos zu: Kolibri flex auto, Kolibri 1500, hiScanµ**  
Fortschritt-Berichte VDI: Virtual and Rapid Prototyping, Reihe 2, Nr. 656 (2006) S. 33-34
- Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Brückner, C.; Limpert, J.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Electrooptical sampling of ultra-short THz pulses by fs-laser pulses at 1060 nm**  
Applied Physics B: Lasers and Optics 85 (2006) 1 p. 59-62, ISSN 0946-2171
- Riehemann, S.  
**Bilder in den Kopf bringen**  
GIT Labor-Fachzeitschrift (2006) 3 S. 168, ISSN 0016-3538
- Riehemann, S.  
**Fraunhofer readies medical visualization system**  
PROJECTION monthly 4 (2006) 1 S. 34, ISSN 1544-7324
- Riehemann, S.  
**Optisches Stimulationssystem für die Medizin**  
Photonik 38 (2006) 2, ISSN 1432-9778
- Roma, G.; Belardini, A.; Michelotti, F.; Danz, N.; Pace, A.; Sarto, F.; Montereali, R.M.  
**Micro-Cavity Organic Light Emitting Diodes for Biochip Applications**  
Journal of Non-crystalline Solids 352 (2006) 23-25 p. 2476-2479, ISSN 0022-3093
- Schreiber, P.; Kudaev, S.  
**Micro-optics for LED light sources**  
Photonik International (2006) p. 111-113, ISSN 1432-9778
- Schreiber, T.; Nielsen, C.K.; Ortac, B.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Microjoule-level all-polarization-maintaining femtosecond fiber source**  
Optics Letters 31 (2006) 5 p. 574-576, ISSN 0146-9592
- Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.  
**Bewertung von Nanorauheiten durch Streulichtmessung**  
tm – Technisches Messen 73 (2006) 1 S. 35-42, ISSN 0171-8096
- Schröder, S.; Kamprath, M.; Duparré, A.; Tünnermann, A.; Kühn, B.; Klett, U.  
**Bulk scattering properties of synthetic fused silica at 193 nm**  
Optics Express 14 (2006) 22 p. 10537-10549, ISSN 1094-4087
- Schulz, U.  
**Review of modern techniques to generate antireflective properties on thermoplastic polymers**  
Applied Optics 45 (2006) 7 p. 1608-1618, ISSN 0003-6935
- Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Antireflection of polymer optics by coating and nanostructuring procedures**  
Glass Coatings (2006) 2 p. 48-51
- Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Vacuum coating of plastic optics**  
Progress in Surface Science 81 (2006) 8-9 p. 387-401, ISSN 0079-6816
- 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 Science Instruments 77 (2006) 12 p. 123101-23106, ISSN 0034-6748
- Szameit, A.; Blömer, D.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Hexagonal waveguide arrays written with fs-laser pulses**  
Applied Physics B: Lasers and Optics 82 (2006) 4 p. 507-512, ISSN 0946-2171
- Szameit, A.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Lederer, F.  
**Two-dimensional soliton in cubic fs laser written waveguide arrays in fused silica**  
Optics Express 14 (2006) 13 p. 231-238, ISSN 1094-4087
- Tikhonravov, A.V.; Trubetskov, M.K.; Amotchkina, T.V.; Kokarev, M.A.; Kaiser, N.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Gäbler, D.  
**New Optimization Algorithm for the synthesis of rugate optical coatings**  
Applied Optics 45 (2005) 7 p. 1515-1524, ISSN 0003-6935
- Trompeter, H.; Michaelis, D.; Streppel, U.; Pertsch, T.; Peschel, U.; Lederer, F.; Bräuer, A.  
**Visual Observation of Zener Tunneling**  
Physical Review Letters 96 (2006) p. 023901-4, ISSN 0031-9007

Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortac, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Fuchs, U.; Tünnermann, A.  
**Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating**  
Optics Letters 31 (2006) 16 p. 2390-2392, ISSN 0146-9592

Wilbrandt, S.; Kaiser, N.; Stenzel, O.  
**In-situ broadband monitoring of heterogeneous optical coatings**  
Thin Solid Films 502 (2005) 1-2 p. 153-157, ISSN 0040-6090

Wippermann, F.  
**Gechirpte Mikrolinsenarrays für ultra-dünne Kameras**  
Photonik 38 (2006) 5 S. 2, ISSN 1432-9778

Wippermann, F.; Radtke, D.; Amberg, M.; Sinzinger, S.  
**Integrated Free-Space Optical Interconnect Fabricated in Planar Optics Using Chirped Microlens Arrays**  
Optics Express 14 (2006) 22 p. 10765-10778, ISSN 1094-4087

Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.  
**Designs and depositions of vacuum UV narrow bandpass filters for analytical chemistry applications**  
Applied Optics 45 (2006) 7 p. 1359-1363, ISSN 0003-6935

Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.  
**Highly reflecting aluminium-protected optical coatings for the VUV spectral range**  
Applied Optics 45 (2006) 1 p. 178-183, ISSN 0003-6935

Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.  
**Optical thin films with high reflectance, low thickness and low stress for the spectral range from vacuum UV to near IR**  
Journal of Optics A: Pure and Applied Optics 8 (2006) 3 p. 327-332, ISSN 1464-4258

Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**Interface-engineered EUV multilayer mirrors**  
Microelectronic Engineering 83 (2006) 4-9 Spec. Iss. p. 692-694, ISSN 0167-9317

## Eingeladene Vorträge Invited Papers

Bräuer, A.  
**LED-illumination units with beam shape and colour control**  
4th Annual Flagship Event 2006 Intelligent Interior Lighting, 30.1. – 1.2.2006, Munich, Germany

Bräuer, A.; Duparré, J.  
**Compact CMOS-Based Microoptical Imaging Systems**  
3rd Fraunhofer IMS Workshop CMOS Imaging, 16. – 17.5.2006, Duisburg, Germany

Bräuer, A.  
**Mikrooptik für kompakte abbildende Systeme und Projektoren**  
OTTI-Fachforum Design und Herstellung optischer Komponenten und Systeme, 27. – 28.9.2006, Würzburg, Deutschland

Brückner, A.; Duparré, J.; Völkel, R.  
**Use and advantage of microlens arrays in imaging applications**  
NEMO-Workshop on Micro-Optics Benefits for Industry, 31.10.2006, Eindhoven, Netherlands

Duparré, A.; Schröder, S.; Tünnermann, A.  
**Nano-Rauheitsanalyse an funktionalen Oberflächen**  
VDI Fachtagung Messtechnik für Mikro- und Nano-Engineering, 29. – 30.11.2006, Erlangen, Deutschland

Duparré, J.; Völkel, R.  
**Novel Optics /Micro-Optics for Miniature Imaging Systems**  
SPIE Proceedings Vol. 6196 (2006) Paper 619607-1, ISBN 0-8194-6309-4

Duparré, J.; Völkel, R.  
**Novel Optics /Micro-Optics for Miniature Imaging Systems**  
Photonics Europe 2006, 3. – 7.4.2006, Strasbourg, France

Duparré, J.; Völkel, R.  
**Use and advantage of micro lenses in imaging applications**  
NEMO-Workshop on Micro-Optics-Benefits for Industry at Photonics Europe 2006, 3. – 7.4.2006, Strasbourg, France

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.; Böwering, N.R.; Ershov, A.I.; Khodykin, O.V.; Brandt, D.C.  
**EUV collector mirrors for high-power LPP sources**  
SEMATECH EUV Source Workshop, 25.05.2006, Vancouver, Canada

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.  
**Optiken für extreme ultraviolette Strahlung**  
Jenaer Technologietag 2006, 4.10.2006, Jena, Deutschland

Duparré, A.; Schröder, S.; Glied, S.  
**Sensitive und flexible Streulichtmesstechnik für den tiefen UV- bis infraroten Spektralbereich**  
107. DGaO Tagung, 6. – 10.6.2006, Weingarten, Deutschland

Houbertz, R.; Wolter, W.; Dannberg, P.; Serbin, J.; Uhlig, S.  
**Advanced packaging materials for optical applications: Bridging the gap between nm-size structures and large-area panel processing**  
SPIE Proceedings Vol. 6126 (2006) Paper 612605, ISBN: 0-8194-6168-7

Houbertz, R.; Wolter, W.; Dannberg, P.; Serbin, J.; Uhlig, S.  
**Advanced packaging materials for optical applications: Bridging the gap between nm-size structures and large-area panel processing**  
Photonics West, 21.-26.1.2006, San Jose, California, USA

Kaiser, N.  
**Coatings for short and very short wavelengths**  
Spring-Meeting of the German Physical Society, 27. – 31.3.2006, Dresden, Germany

Lauth, H.; Kaiser, N.  
**Actual trends in optical coatings**  
Internal Symposium "Functional thin films – future applications and challenges", 27.3.2006, Dresden, Germany

Limpert, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.  
**Energy High Repetition Rate Ultrashort Pulse Fiber Lasers**  
LEOS Annual Meeting 2006, 29.10. – 2.11.2006, Montreal, Canada

Limpert, J.; Schreiber, A.; Tünnermann, A.  
**Photonic Crystal Fibers for Fiber Lasers and Amplifiers**  
OFC/NFOEC 2005 Workshop on Photonic Crystal Fibers, 6. – 11.3.2005, Anaheim, California, USA

Limpert, J.; Schreiber, T.; Röser, F.; Tünnermann, A.  
**Intense ultra-short fiber laser systems and their applications**  
Photonics West, 21. – 26.1.2006, San Jose, California, USA

- Notni, G.  
**Multi-view 3D-scanning with fringe projection**  
Internationales Dagstuhl Seminar "Sensor Data and Information Fusion in Computer Vision and Medicine", 1.8.2006, Dagstuhl, Germany
- Notni, G.  
**Non-destructive optical 3D-Scanner for surgical uses**  
MedTec R&D Conference, 7.3.2006, Stuttgart, Germany
- Notni, G.  
**Production and characterization of UP forms**  
31st Technology Transfer Forum "Metrology@Schott", 7.9.2006, Mainz, Germany
- Schreiber, T.; Röser, F.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**High peak power operation of microstructured fibers and their applications**  
Symposium on high power Fiber Lasers, XII Conference on Laser Optics, 26. – 30.6.2006, St. Petersburg, Russia
- Schreiber, T.; Röser, F.; Schmidt, O.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Iliw, R.; Petersson, A.; Jacobsen, C.; Hansen, K.P.; Broeng, J.  
**Design and high power operation of a stress-induced single-polarization single-transverse mode LMA Yb-doped photonic crystal fiber**  
Photonics West, 21.-26.1.2006, San Jose, California, USA
- Schreiber, T.; Schmidt, O.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**High power rod-type photonic crystal fiber lasers**  
Symposium on high power Fiber Lasers, XII Conference on Laser Optics, 26. – 30.6.2006, St. Petersburg, Russia
- Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Trends and challenges in vacuum coating of plastic optics**  
Proceedings of ICCG6, 6th International Conference on Coatings on Glass and Plastics ICCG, 18. – 22.6.2006, Dresden, Germany (2006) p. 181-184
- Schulz, U.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.  
**Entspiegelung von Kunststoffoberflächen**  
2. Thüringer Grenz- und Oberflächentagung, 13. – 14.9.2006, Oberhof, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Faserlaser und -verstärker**  
Physikalisches Kolloquium Universität Paderborn, 8.2.2006, Paderborn, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Femtosecond fiber lasers and amplifiers – status and perspectives**  
Sensor+Test 2006, 30.5. – 1.6.2006, Nürnberg, Germany
- Tünnermann, A.  
**High power fiber lasers and amplifiers (Plenary)**  
LPHYS'06, 24. – 28.7.2006, Lausanne, France
- Tünnermann, A.  
**High power pulsed fiber lasers**  
XII Conference on Laser Optics, 26. – 30.6.2006, St. Petersburg, Russia
- Tünnermann, A.  
**Hochleistungsfaserlaser und -verstärker: Stand und Perspektiven der Entwicklung (Plenarvortrag)**  
Lasertagung 2006, 23. – 24.11.2006, Fachhochschule Jena, Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Micro- and Nano-Optical Systems: Markets and Prospects**  
Aachener Optikkolloquium, Fraunhofer IPT, 22. – 23.11.2006, Aachen, Germany
- Tünnermann, A.  
**Mikro- und Nanooptik – Komponenten moderner optischer Systeme in Automotive, Produktion, Sensorik und Life Science (Key-note-Vortrag)**  
OPTATEC, Spectaris-Analystenkonferenz, 20. – 23.6.2006, Frankfurt (M), Deutschland
- Tünnermann, A.  
**Status and perspectives of fiber lasers**  
XVI. International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers Conference – GCL/HPL, 5.9.2006, Gmunden, Austria
- Tünnermann, A.  
**Status and perspectives of fiber lasers and amplifiers**  
CIPI-COPL-Workshop on Fibre Lasers, 19.5.2006, Quebec, Canada
- Tünnermann, A.  
**Status and perspectives of high power fiber lasers**  
Ninth Annual Directed Energy Symposium, 30.10. – 3.11.2006, Albuquerque, New Mexico, USA
- Tünnermann, A.  
**Ultrakurzpuls-Faserlaser und -verstärker (Plenarvortrag)**  
Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 27. – 30.3.2006, Augsburg, Deutschland
- Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Dollar, F.; Gullikson, E.; Hill, S.; Lucatorto, T.; Fang, M.; Chandhok, M.; Shell, M.  
**Mo/Si with enhanced capping layers**  
SEMATECH EUV – Optics Contamination & Lifetime Workshop, 19.10.2006, Barcelona, Spain
- Zeitner, U.D.  
**Lithographic micro-patterning on free-forms**  
International Conference on Optics and Optoelectronics 2005, 12. – 15.12.2005, Dheradun, India
- Zeitner, U.D.; Kley, E.-B.  
**Advanced lithography for micro-optics**  
SPIE Proceedings Vol. 6290 (2006) Paper 629009, ISBN 0-8194-6369-8

---

## Vorträge, Poster, Konferenzen Lectures, Posters, Conferences

- Andersen, T.V.; Schreiber, T.; Schimpf, D.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Qian, Y.; Thomsen, C.L.  
**Supercontinuum generation with femtosecond dual pumping**  
SPIE Proceedings Vol. 6103 (2006) Paper 61030X, ISBN 0-8194-6145-8
- Aguergaray, C.; Andersen, T.V.; Schmidt, O.; Röser, F.; Bruchmann, C.; Limpert, J.; Cormier, E.; Tünnermann, A.  
**Ultrafast parametric amplifier pumped by a fiber laser system**  
SPIE Proceedings Vol. 6103 (2006) Paper 61030H, ISBN 0-8194-6145-8
- Bayer, A.; Barkusky, F.; Peth, C.; Töttger, H.; Mann, K.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**Imaging properties of different optics for EUV radiation**  
SPIE Proceedings Vol. 5962 (2005) p. 223-234, ISBN 0-8194-5980-1
- Beckert, E.  
**Optoelectronic System Integration by Laserbeam Soldering on Ceramic PCB**  
Forumsbeitrag Optatec, 23.6.2006, Frankfurt, Germany
- Beckert, E.; Banse, H.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Microoptics soldering on multifunctional system platforms**  
Photonics Europe 2006, 3. – 7.4.2006, Strasbourg, France  
SPIE Proceedings Vol. 6185 (2006) Paper 618509, ISBN 0-8194-6241-1
- Benoit, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**Multilayer mirrors with enhanced thermal stability**  
The 8th International Conference on the Physics of X-ray Multilayer Structures, 12. – 16.3.2006, Sapporo, Japan
- Benoit, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**EUV multilayer mirrors with enhanced stability**  
Optics & Photonics, 13. – 17.8.2006, San Diego, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6317 (2006) Paper 63170K, ISBN 0-8194-6396-5

- Bischoff, M.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.  
**Properties of chirped mirrors manufactured by plasma assisted electron beam evaporation**  
SPIE Proceedings Vol. 5963 (2005) p. 474-482, ISBN 0-8194-5981-X
- Bräuer, A.  
**Compact CMOS-Based Microoptical Imaging Systems**  
Fraunhofer Seminar on Advanced Micro Optics, 29.5.2006, Tokyo, Japan
- Bräuer, A.  
**Farb- und Abstrahlmanagement**  
Osram Technologietag, 15.3.2006, München, Deutschland
- Bräuer, A.  
**Mikrooptik für kompakte abbildende Systeme und Projektoren**  
Kolloquium Carl Zeiss Oberkochen, 5.7.2006, Oberkochen, Deutschland
- Bräuer, A.  
**Mikrooptik zur LED-Strahlformung**  
VDI-Tagung Optische Technologien, 21. – 22.11.2006, Düsseldorf, Deutschland
- Bräuer, A.  
**Miniaturized Scanning Laser Projector**  
Sendai Hetero System Integration Workshop, 6. – 7.11.2006, Sendai, Japan
- Bräuer, A.; Höfer, B.; Schreiber, P.  
**Miniaturized Scanning Laser Projector**  
Optatec 2006, 20. – 23.6.2006, Frankfurt (M.), Germany
- Bräuer-Buchardt, C.; Heinze, M.; Munkelt, C.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Distance Dependent Lens Distortion Variation in 3D Measuring Systems Using Fringe Projection**  
17th British Machine Vision Conference 2006, 4. – 7.9.2006, Edinburgh, Great Britain  
Proceedings of the 17th British Machine Vision Conference 2006, 4. – 7.9.2006, Edinburgh, Great Britain Vol. 1 (2006) p. 327-336, ISBN 1-904410-14-6
- Brückner, A.; Duparré, J.; Schreiber, P.; Tünnermann, A.  
**Hochgenaue Positionsbestimmung und Farbsehen mit ultra-flachen, künstlichen Facettenaugen**  
107. DGaO Tagung, 6. – 10.6.2006, Weingarten, Deutschland  
DGaO-Proceedings 2006, 6. – 10.6.2006, Weingarten, Deutschland  
www.dgao-proceedings.de, ISSN 1614-8436
- Brückner, C.; Palme, M.; Lippmann, U.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Aspekte zum Design von THz-Optik**  
DGaO-Proceedings 2006, 6.-10.6.2006, Weingarten, Deutschland www.dgao-proceedings.de, ISSN 1614-8436
- Brückner, C.; Pradarutti, B.; Riehemann, S.; Stenzel, O.; Steinkopf, R.; Gebhardt, A.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Moth-eye structures for reduction of Fresnel losses at THz components**  
Photonics Europe 2006: Millimeter-Wave and Terahertz Photonics, 3. – 7.4.2006, Strasbourg, France  
SPIE Proceedings Vol. 6194 (2006) Paper 61940N, ISBN 0-8194-6250-0
- Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Optimized THz Systems for Imaging and Spectroscopic Applications**  
Joint 31st Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW & THz), 18. – 22.9.2006, Shanghai, China  
IEEE Proceedings 06EX138
- Brückner, C.; Riehemann, S.; Palme, M.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Two-point resolution of optical systems in THz Spectral Range**  
VDI: 2. Workshop Terahertz Technology, 1. – 2.3.2006, Kaiserslautern, Germany
- 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**  
International Workshop on Nitride Semiconductors, 22. – 27.10.2006, Kyoto, Japan
- Cimalla, V.; Wang, C.; Lebedev, V.; Ecke, G.; Ambacher, O.; Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Surface properties and terahertz emission from InN**  
3rd International Indium Nitride Workshop 12. – 16.11.2006, Ilhabela, Brazil
- Danz, N.; Götz, S.; Hofmann, A.; Kießling, H.; Höfer, B.  
**Neue optische Auswertung für die markierungsfreie Sensorik mittels Oberflächen-Plasmonen-Resonanz**  
7. Dresdner Sensor-Symposium (7. DSS) 12. – 14.12.2005, Dresden, Deutschland
- Danz, N.; Götz, S.; Hofmann, A.; Kießling, H.; Höfer, B.  
**Neue optische Auswertung für die markierungsfreie Sensorik mittels Oberflächen-Plasmonen-Resonanz**  
Neue Herausforderungen und Anwendungen in der Sensortechnik: neue Trends in der Mess- und Sensortechnik (2006) S. 173-176, ISBN 3-938863-29-3
- Danz, N.; Michaelis, D.; Schreiber, P.; Wächter, C.; Zeitner, U.D.  
**Mixed-mode Optical Design for Optoelectronic Applications**  
Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 26. – 29.3.2006, Cambridge, USA
- Duparré, A.  
**Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen für funktionale Oberflächen und Schichten**  
FhG Allianz Vision Seminar, 29. – 30.6.2006, Karlsruhe, Deutschland  
Vortragsband FhG Allianz Vision Seminar, 29. – 30.6.2006, Karlsruhe, Deutschland
- Duparré, A.; Flemming, M.; Notni, G.  
**Methoden zur Charakterisierung von Rauheiten und Defekten an funktionalen Oberflächen**  
Thüringer Grenz- und Oberflächentage, 13. – 14.9.2006, Oberhof, Deutschland
- Duparré, J.  
**Neuartige abbildende optische Systeme – inspiriert durch Sehprinzipien der Insekten**  
353. JENAer Carl-Zeiss-Optikkolloquium, 16.5.2006, Jena, Deutschland
- Duparré, J.; Bräuer, A.; Wippermann, F.  
**Mikrooptische Systeme für Bildaufnahmen – Funktionalität und Prototyping**  
Proceedings of Mikrosystemtechnik Kongress 2005, 10. – 15.10.2005, Freiburg, Deutschland  
ISBN: 3-8007-2926-1
- Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Völkel, R.; Scharf, T.  
**Microoptical artificial compound eyes: from design to experimental verification of two different concepts**  
SPIE Proceedings Vol. 5962 (2006) Paper 59622A, ISBN 0-8194-5980-1
- Egloff, Th.; Buß, W.; Schreiber, P.  
**Multi-channel confocal chromatic distance sensor for simultaneous micro-topography and surface color measurement**  
OPTO Kongress, 31.5.2006, Nürnberg, Germany
- Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.  
**Multilayer collector optics for high-power LPP sources**  
8th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures, 12. – 16.3.2006 Sapporo, Japan
- Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.; Böwering, N.R.; Khodykin, O.V.; Brandt, D.  
**High-temperature LPP collector mirror**  
Microlithography 2006, 19. – 24.2.2006, San Jose California, USA  
Proceedings of SPIE Vol. 6151 (2006) p. 1084-1092, ISBN 0-8194-6194-6
- Flemming, M.; Duparré, A.  
**Rasterkraftmikroskopische Metrologie an optischen Oberflächen**  
107. DGaO Tagung, 6. – 10.6.2006, Weingarten, Deutschland
- Fuchs, U.; Zeitner, U.D.; Tünnermann, A.  
**Optics for focusing of ultra-short laser pulses**  
SPIE Proceedings Vol. 5962 (2005) Paper 59622L, ISBN 0-8194-5980-1

- Gebhardt, A.; Steinkopf, R.  
**SPDT of aspherical mirrors**  
OptoNet Workshop: Ultra precision manufacturing of aspheres, freeforms and microstructures, 16. – 17.5.2006, Jena, Germany
- Janicki, V.; Leitel, R.; Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.  
**Design of hybrid coatings composed of homogeneous layers and refractive index gradients**  
SPIE Proceedings Vol. 5963 (2005) Paper 59631D1, ISBN 0-8194-5981-X
- Jeong, Y.; Liem, A.; Mörl, K.; Höfer, S.; Kim, Y.; Tünnermann, A.; Oh, K.  
**Q-switching of Yb-doped double-clad fiber laser using micro-optical waveguide on micro-actuating platform modulator for marking applications**  
SPIE Proceedings Vol. 6102 (2006) Paper 61021K, ISBN 0-8194-6144-X
- Kachan, S.; Stenzel, O.; Ponyavina, A.  
**High-absorbing gradient multilayer plasmonic coatings**  
QEP-17: Quantum, Electronics and Photonics, 4. – 7.9.2006, Manchester, Great Britain
- Kaiser, N.  
**Design optischer Schichtsysteme für kurze und extrem kurze Wellenlängen**  
Otti Profiforum Schichten, 21. – 22.2.2006, Regensburg, Deutschland
- Kaiser, N.  
**High performance coatings for UV and EUV (Next Generation Lithography)**  
DPG Tagung, Vacuum Science and Technology Sectional Programme, 27.3.2006, Dresden, Germany
- Kaiser, N.  
**Recent advances in optical coatings technology**  
Photonics Europe 2006, Industry Applications: Specialist Optical Coatings Forum, 4. – 5.4.2006, Strasbourg, France
- Kaiser, N.  
**Optical Coatings Road-map**  
NRC Workshop on Optical Coatings, 9. – 13.5.2006, Ottawa, Canada
- Kaiser, N.  
**Market and Business in the Field for Coatings on Glass & Plastics for Precision Optics and Ophthalmics**  
6th International Conference on Coatings on Glass and Plastics, 18. – 22.6.2006, Dresden, Germany
- Kaiser, N.  
**Optische Komponenten und Systeme in der Mikrolithografie**  
Otti Profiforum Design und Herstellung optischer Komponenten und Systeme  
28.9.2006, Würzburg, Deutschland
- Kaiser, N.  
**Market and Business in the Field for Coatings for Optical Instrumentation**  
7th Symposium of European Vacuum, 29.9. – 5.10.2006, Anzio, Italy
- Kalkowski, G.; Risse, S.; Müller, S.  
**Flatness Characterization Techniques for EUV Mask Chucks**  
Micro- and Nano-Engineering 2006  
32nd International Conference, 17. – 20.9.2006, Barcelona, Spain
- Kalkowski, G.; Risse, S.; Peschel, T.; Harnisch, G.  
**High Precision Tools for Lithography**  
EUV mask flatness workshop, 19.10.2006, Barcelona, Spain
- Kley, E.-B.; Zeitner, U.D.; Bräuer, A.  
**Center for Advanced Micro- and Nano-Optics (CMN-Optics)**  
Fraunhofer Seminar on Advanced Micro Optics, 29.5.2006, Tokyo, Japan
- Kley, E.-B.; Erdmann, T.; Triebel, P.; Fuchs, H.-J.; Horstmann, B.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Nonlinear resonance effects on thin micro structured aluminium metal gratings by high power fs-laser pulses**  
SPIE Proceedings Vol. 6149 (2006) Paper 614902, ISBN 0-8194-6188-1
- Kudaev, S.  
**Refractive microoptics for LED beam shaping**  
EOS Topical Meeting on Micro-Optics, Diffractive Optics and Optical MEMS (TOM 4)  
16. – 19.10.2006, Paris, France  
Proceedings EOS Topical Meeting on Micro-Optics, p. 35-36
- Kudaev, S.; Schreiber, P.  
**Optimizing LED illumination systems**  
SPIES Newsroom
- Kudaev, S.; Schreiber, P.  
**Parametric Design of Non-Imaging Collimators**  
International Optical Design Conference IODC, 4. – 8.6.2006, Vancouver, Canada  
SPIE Proceedings Vol. 6432 (2006) Paper 634212, ISBN 0-8194-6427-9
- Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Mehrbild-3D-Messsysteme in Rapid Prototyping- und Qualitätssicherungs-Prozessketten**  
Fraunhoferseminar mit Praktikum »Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion«, 16. – 17.11.2006, Magdeburg, Deutschland  
Konferenzband Fraunhoferseminar mit Praktikum »Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion«, Magdeburg, 16. – 17.11.2006, Magdeburg, Deutschland
- Kühn, B.; Uebbing, B.; Schröder, S.; Duparré, A.; Nishimura, H.; Ikeda, Y.  
**Intrinsic optical properties of synthetic fused silica for 193 nm immersion lithography**  
3rd International Symposium on Immersion Lithography, 2. – 5.10.2006, Kyoto, Japan
- Lau, K.; Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Haftfeste optische Beschichtungen auf Biphenol-A Polycarbonat**  
14. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, 19. – 20.10.2006, Dresden, Deutschland  
Konferenzband 14. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, 19. – 20.10.2006, Dresden, Deutschland, S. 127-131
- Leitel, R.; Kaless, A.; Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Broadband antireflective structures on PMMA by plasma treatment**  
10th International Conference on Plasma Surface Engineering, 11. – 16.9.2006, Garmisch-Partenkirchen, Germany
- Limpert, J.; Schreiber, T.; Röser, F.; Tünnermann, A.  
**Intense ultra-short fiber laser systems and their applications**  
SPIE Proceedings Vol. 6102 (2006) Paper 610213, ISBN 0-8194-6144-X
- Lippmann, U.; Palme, M.; Riehemann, S.; Vangdal, V.; Thomsen, T.  
**Visuelles Stimulationssystem mit OLED-Mikrodisplays zur Verwendung in einem Magnetresonanztomographen**  
107. DGaO Tagung, 6. – 10.6.2006, Weingarten, Deutschland
- Matthäus, G.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Nolte, S.; Torosyan, G.; Beigang, R.; Riehemann, S.; Notni, G.; Tünnermann, A.  
**Surface-emitted THz generation using a compact ultrashort pulse fiber amplifier at 1064 nm**  
SPIE Proceedings Vol. 6108 (2006) Paper 610813, ISBN 0-8194-6150-4
- Matthäus, G.; Pradarutti, B.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Cimalla, V.; Lebedev, V.; Ambacher, O.; Tünnermann, A.  
**Detailed Study of Differently Grown InN Wafers as Strong THz Surface Emitters Excited at 800 nm and 1060 nm**  
Joint 31st Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW & THz), 18. – 22.9.2006, Shanghai, China  
IEEE Proceedings 06EX138 (2006) p. 369, ISBN 1-4244-0400-2
- Michaelis, D.; Kudaev, S.; Schreiber, P.; Bräuer, A.  
**Freeform Beam Shaping**  
EOS Annual Meeting 2006, 16.-19.10.2006, Paris, France

- Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Damm, C.; Peschel, T.; Tünnermann, A.  
**3-D overlay assembly of mechanical components with sub-micron accuracy**  
 Euspen 6th International Conference, 28.5. – 1.6.2006, Baden bei Wien, Vienna, Austria  
 Proceedings of the 6th euspen International Conference (2006) S. 60-63, ISBN 0-9553082-0-8
- Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Damm, C.; Peschel, T.; Tünnermann, A.  
**Assembly of an Aperture Plate System for Projection Mask-Less Lithography (PML2)**  
 Proceedings International Conference on Micro- and Nano-Engineering, 19. – 22.9.2005, Vienna, Austria, p. 60-63, ISBN 0-9553082-0-8
- Munkelt, C.  
**Local correlation for improving 3D-point-cloud fusion**  
 Internationales Dagstuhl Seminar "Sensor Data and Information Fusion in Computer Vision and Medicine", 1.8.2006, Dagstuhl, Germany
- Munkelt, C.; Kühmstedt, P.; Denzler, J.  
**Incorporation of a-priori information in planning the best view**  
 11th International Fall Workshop "Vision, Modeling and Visualization", 22. – 24.11.2006, Aachen, Germany  
 Vision, Modeling and Visualization 2006 Proceedings November 22-24, 2006 Aachen, Germany, p.261-268, ISBN 3-89838-081-5
- Munkelt, C.; Kühmstedt, P.; Denzler, J.  
**Incorporation of a-priori information in planning the best view**  
 ISPRS Commission V Symposium: Image Engineering and vision metrology, 25. – 27.9.2006, Dresden, Germany  
 Proceedings of ISPRS Commission V Symposium: Image engineering and vision metrology, 25. – 27.9.2006, Dresden, Germany, ISSN 1682-1750
- Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.  
**Method for the vacuum deposition of optical coatings on polymethyl-methacrylate**  
 9th International Symposium on Process Systems Engineering, 9. – 13.7.2006, Garmisch-Partenkirchen, Germany
- Notni, G.  
**Konfokale Verfahren – Triangulationsverfahren – Lichtschnitt- und Streifenprojektions-techniken**  
 Fraunhoferseminar mit Praktikum »Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion«, 16. – 17.11.2006, Magdeburg, Deutschland  
 Konferenzband Fraunhoferseminar mit Praktikum »Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion«, 16. – 17.11.2006, Magdeburg, Deutschland
- Notni, G.; Duparré, A.  
**Shape and nanostructure analysis of ultra precision machined surfaces**  
 OptoNet Workshop: Ultrapräzisionsbearbeitung von Asphären, Freiformflächen und Mikrostrukturen, 16. – 17.5.2006, Jena, Germany
- Notni, G.; Kühmstedt, P.  
**Shape and surface structure analysis of complex rapid manufacturing parts**  
 Euro-  $\mu$  Rapid 2006, 27. – 28.11.2006, Frankfurt/M., Germany
- Notni, G.; Kühmstedt, P.; Brakhage, P.; Geller, R.; Reitemeier, B.  
**Optical 3D-Scanning and Rapid Prototyping for oral and maxillofacial surgery**  
 Internationales Bernd-Spiess-Symposium, 16. – 18.6.2006, Basel, Switzerland
- Peschel, T.; Limpert, J.; Streppel, U.; Wirth, C.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Opto- and Thermo-Mechanical Design of High Power Fiber Lasers**  
 2. Internationaler Faserlaser-Workshop, 5. – 6.7.2006, Dresden, Germany
- Petschulat, J.; Rockstuhl, C.; Leitel, R.; Stenzel, O.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.  
**Plasmon resonances in disordered metal-PMMA structures**  
 EOS Topical meeting "Molecular Plasmonic Devices" 27. – 29.4.2006, Engelberg, Switzerland
- Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Cimalla, V.; Lebedev, V.; Ambacher, O.; Tünnermann, A.  
**THz emission from InN surfaces**  
 IMN (Institut für Mikro- und Nanotechnologien) 2005 Jahrbuch TU Ilmenau
- Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Brückner, C.; Limpert, J.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**THz Generation, Detection, and Application with ultrashortpuls fiber laser amplifiers at 1060 nm**  
 VDI: 2. Workshop Terahertz Technology, 1. – 2.3.2006, Kaiserslautern, Germany
- Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Cimalla, V.; Lebedev, V.; Ambacher, O.; Tünnermann, A.  
**InN as THz Emitter excited at 1060 nm and 800 nm**  
 Photonics Europe 2006, 3. – 7.4.2006, Strasbourg, France  
 SPIE Proceedings Vol. 6194 (2006) Paper 61940I, ISBN 0-8194-6250-0
- Pradarutti, B.; Matthäus, G.; Brückner, C.; Riehemann, S.; Notni, G.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Electro optical sampling of ultra short THz pulses by fs-laser pulses at 530 nm and 1060 nm**  
 Joint 31st Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW & THz), 18. – 22.9.2006, Shanghai, China
- Riehemann, S.; Grossmann, C.; Notni, G.  
**Microdisplay based optical system for medical applications**  
 Campus Workshop, 15.12.2006, Jena, Germany
- Riehemann, S.; Lippman, U.; Palme, M.; Vangdal, V.; Thomson, T.; Notni, G.  
**Ocular OLED-HMD with simultaneous eye-tracking**  
 SID International Symposium, Seminar and Exhibition, 4. – 9.6.2006, San Francisco, USA  
 Proceedings of the SID International Symposium, Seminar and Exhibition, 4. – 9.6.2006, San Francisco, USA p. 163-165, ISSN 0006-966X
- Riehemann, S.; Lippmann, U.; Palme, M.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Miniaturized projection systems with OLED microdisplays**  
 SPIES Newsroom
- Riehemann, S.; Palme, M.  
**Modelling the aging accommodating eye – Ideas on solving the lens paradoxon based on clinical hints**  
 3rd European Meeting in Physiological Optics, 7. – 9.9.2006, London, Great Britain
- Risse, S.  
**Doppelsphärische Luftlager aus Glas und Glaskeramik**  
 Reihe: Luftlagerungen – Grundlagen und Anwendungen  
 Veranstaltung Nr. 31771/68.699 Technische Akademie Esslingen, 13. – 14.2.2006, Esslingen, Deutschland
- Risse, S.; Giggel, V.  
**NiP plated optics for space application**  
 OptoNet Workshop: Ultra precision manufacturing of Aspheres, Freeforms and Microstructures 16. – 17.5.2006, Jena, Germany
- Röser, F.; Klingebiel, S.; Liem, A.; Schreiber, T.; Höfer, S.; Limpert, J.; Peschel, T.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.  
**Spectral beam combining of fiber lasers**  
 SPIE Proceedings Vol. 6102 (2006) Paper 61020T, ISBN 0-8194-6144-X
- Röser, F.; Rothhardt, J.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**50W, 50fs pulses from a fiber laser system using nonlinear fiber compression**  
 SPIE Proceedings Vol. 6102 (2006) Paper 610210, ISBN 0-8194-6144-X

- Schreiber, P.; Kudaev, S.  
**Miniaturized LED Light Sources**  
Optatec 2006, 20.-23.6.2006, Frankfurt (M.), Germany
- Schreiber, P.; Kudaev, S.; Dannberg, P.; Gebhardt, A.  
**Microoptics for homogeneous LED illumination**  
Photonics Europe 2006, 3. – 7.4.2006, Strasbourg, France  
SPIE Proceedings Vol. 6196 (2006) p. 61690P, ISBN 0-8194-6309-4
- Schreiber, T.; Ortac, B.; Nielsen, C.K.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Compact  $\mu$ J-level all-polarization maintaining femtosecond fiber source**  
SPIE Proceedings Vol. 6102 (2006), ISBN 0-8194-6144-X
- Schreiber, T.; Schultz, H.; Röser, F.; Schmidt, O.; Limpert, J.; Iliw, R.; Jacobsen, C.; Hansen, K.P.; Broeng, J.; Tünnermann, A.  
**Design and high power operation of a stress-induced single-polarization single-transverse mode LMA Yb-doped photonic crystal fiber**  
SPIE Proceedings Vol. 6102 (2006) Paper 61020C, ISBN 0-8194-6144-X
- Schröder, S.; Flemming, M.; Duparré, A.  
**Nanostructure assessment of functional surfaces and coatings**  
6th International Conference on Coatings on Glass and Plastics, 18. – 22.6.2006, Dresden, Germany  
Proceedings of the 6th International Conference on Coatings on Glass and Plastics, 18. – 22.6.2006, Dresden, Germany, p. 261-265
- Schröder, S.; Glied, S.; Duparré, A.  
**Scattering analysis of optical components in the DUV**  
8th International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization, 21. – 26.1.2006, San Jose, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6101 (2006) Paper 61011H-10, ISBN 0-8194-6143-1
- Schröder, S.; Kamprath, M.; Duparré, A.  
**Characterization on thin films and bulk materials for DUV optical components**  
Boulder Damage Symposium XXXVIII Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, 25. – 27.9.2006, Boulder, USA
- Schulz, U.; Lau, K.; Kaiser, N.  
**Test procedures for coated plastics**  
Proceedings of 7th Symposium of European Vacuum Coaters, 2. – 4.10.2006, Anzio, Italy p. 181-184
- Sidorin, Y.; Wächter, C. Chairs/Editors  
**Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies X**  
SPIE Proceedings Vol. 6123, (2006), ISBN 0-8194-6165-2
- Szameit, A.; Blömer, D.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Controlled nonlinearity in femtosecond laser written waveguides**  
SPIE Proceedings Vol. 6108 (2006) Paper 61080V, ISBN 0-8194-6150-4
- Szameit, A.; Burghoff, J.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.  
**Discrete spatial soliton formation in a two-dimensional fs laser written waveguide array in fused silica**  
SPIE Proceedings Vol. 6108 (2006) Paper 61080V, ISBN 0-8194-6150-4
- Tikhonravov, A.V.; Trubetskov, M.K.; Amotchkina, T.V.; Kokarev, M.A.; Kaiser, N.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Gäbler, D.  
**New Optimization Algorithm for the synthesis of rugate optical coatings**  
SPIE Proceedings Vol. 5963 (2005) p. 18-26, ISBN 0-8194-5981-X
- Tünnermann, A.  
**Femtosecond fiber lasers and amplifiers – status and perspectives**  
Proceedings of Sensor +Test 2006, 30.5. – 1.6.2006, Nürnberg, Germany, p. 9-14
- Wächter, C.  
**Integrated Optics Design: Software tools and diversified applications**  
Frontiers in Planar Lightwave Circuit Technology: Design, Simulation, and Fabrication, Series: NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Vol. 216 (2006) p. 245-280, ISBN 1-402-04164-0
- Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.  
**Re-engineering of inhomogeneous coatings based on in-situ optical broadband monitoring data**  
SPIE Proceedings Vol. 5963 (2005) p. 124-135, ISBN 0-8194-5981-X
- Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.  
**Improved integration and performance of multi-channel micro optical systems by chirped microlens arrays**  
EOS Annual Meeting 2006, 16. – 19.10.2006, Paris, France
- Wippermann, F.  
**Insect Inspired Imaging**  
Optatec, 20. – 23.6.2006, Frankfurt (M), Germany
- Wippermann, F.; Duparré, J.; Schreiber, P.  
**Applications of chirped micro-lens arrays for aberration compensation and improved system integration**  
Optics & Photonics, 13. – 17.8.2006, San Diego, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6289 (2006) Paper 628915, ISBN 0-8194-6368-X
- Wippermann, F.; Radtke, D.; Zeitner, U.D.; Duparré, J.; Tünnermann, A.; Amberg, M.; Sinzinger, S.; Reinhardt, C.; Ovsianikov, A.; Chichkov, B.N.  
**Fabrication technologies for chirped refractive microlens arrays**  
Optics & Photonics 2006, 13. – 17.8.2006, San Diego, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6288 (2006) Paper 628800, ISBN 0-8194-6367-1
- Wippermann, F.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Berge, B.  
**Mechanically assisted liquid lens zoom system for mobile phone cameras**  
Optics & Photonics 2006, 13. – 17.8.2006, San Diego, California, USA  
SPIE Proceedings Vol. 6289 (2006) Paper 62890T, ISBN 0-8194-6368-X
- Yulin, S.; Feigl, T.; Benoit, N.; Kaiser, N.  
**Enhanced multilayer mirrors for EUV spectral region**  
XII Conference on Laser Optics, 26. – 30.6.2006, St. Petersburg, Russia
- Yulin, S.; Feigl, T.; Benoit, N.; Kaiser, N.  
**EUV/soft x-ray multilayer optics**  
SPIE Proceedings Vol. 5645 (2005) p. 289-298, ISBN 0-8194-5600-4
- Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.  
**Interface-engineered multilayer mirrors**  
Microlithography 2006, 21. – 23.2.2006, San Jose, CA., USA
- Yulin, S.; Feigl, T.; Benoit, N.; Kaiser, N.  
**Interface-engineered EUV multilayer mirrors**  
The 8th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures, 12. – 16.3.2006, Sapporo, Japan
- Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.; Dollar, F.; Gullikson, E.; Hill, S.; Lucatorto, T.; Fang M.; Chandhok, M.  
**Mo/Si multilayers capped by TiO<sub>2</sub>**  
International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, 15. – 18.10.2006, Barcelona, Spain
- Zeitner, U.D.; Feigl, T.; Benkenstein, T.; Damm, C.; Peschel, T.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.  
**Schwarzschild-Objective-based EUV Micro-Exposure-Tool**  
SPIE Proceedings Vol. 6151 (2006) p. 30-38, ISBN 0-8194-6194-6

# 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 Win-  
zerla. 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 »Fachhoch-  
schule – Beutenberg Campus« folgen. Auf der  
linken Seite liegt dann sichtbar das Fraunhofer  
IOF. Benutzen Sie die Einfahrt Beutenberg Cam-  
pus, von dort aus folgen Sie der Ausschilderung.

#### Flugzeug

Ab Flughafen Leipzig/Halle auf der Autobahn A9  
nach Süden bis zum Hermsdorfer Kreuz und  
dann auf die A4 Richtung Frankfurt wechseln;  
diese dann bei Jena-Göschwitz verlassen,  
weiter siehe Auto.  
Oder ab Flughafen Erfurt auf der Autobahn A4  
Richtung Dresden bis Abfahrt Jena-Göschwitz.

### How to reach us

#### By train

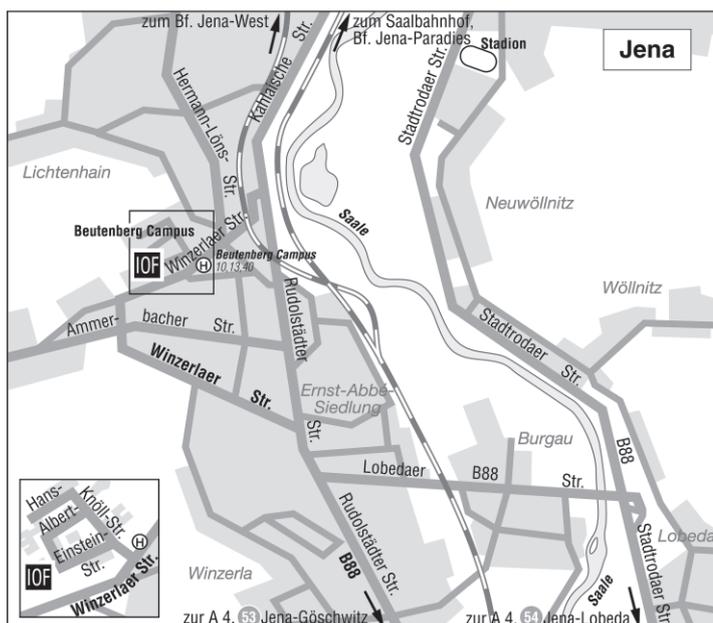
(app. 20 minutes with footpath)  
Jena have four stations. If you take the route  
from north to south you will arrive at the station  
Jena-Paradiesbahnhof. Please go to the bus stop  
on Teichgraben (5 minutes into the city) and take  
the Number 10, 13 or 40 direction Burgau or  
Winzerla. Step off the bus at "Beutenberg Cam-  
pus" 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 A9  
motorway to the south (direction Munich) up to  
the Hermsdorfer Kreuz. Here you have to change  
the motorway, follow the A4 motorway west-  
ward (direction Frankfurt) and leave it at the exit  
Jena-Göschwitz, further see car.  
Or starting from airport Erfurt on the A4 motor-  
way direction Dresden to exit Jena-Göschwitz.



# Impressum

---

## Herausgeber / Editor

Fraunhofer-Institut für  
Angewandte Optik und Feinmechanik  
Beutenberg Campus  
Albert-Einstein-Straße 7  
07745 Jena

Tel.: +49 (0) 36 41 / 8 07-0  
Fax: +49 (0) 36 41 / 8 07-6 00

E-Mail: [info@iof.fraunhofer.de](mailto:info@iof.fraunhofer.de)  
Internet: [www.iof.fraunhofer.de](http://www.iof.fraunhofer.de)

## Institutsleiter / Director

Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
Tel.: +49 (0) 36 41 / 8 07-2 01  
E-Mail: [andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de](mailto:andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de)

## Strategie / Marketing / Koordination Strategy / Marketing / Coordination

Dr. Brigitte Weber  
Tel.: +49 (0) 36 41 / 8 07-4 40  
E-Mail: [brigitte.weber@iof.fraunhofer.de](mailto:brigitte.weber@iof.fraunhofer.de)

## Redaktion / Editorial staff

Dr. Brigitte Weber  
Sylvia Bathke

## Gestaltung / Graphic design

Gudman Design  
Ludwig-Feuerbach-Straße 9  
99425 Weimar

## Druck / Print

Liebeskind Druck  
Gewerbepark an der B 87  
99510 Apolda