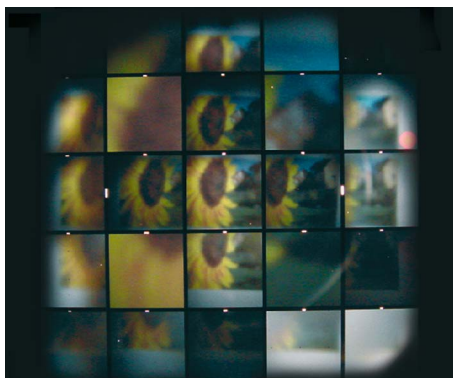
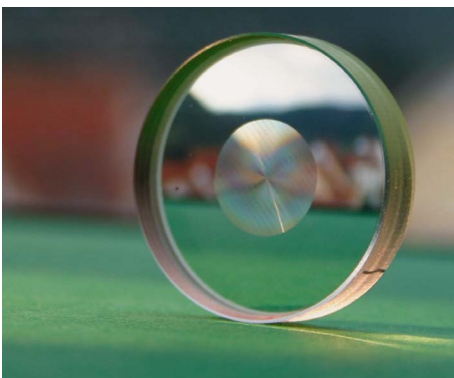
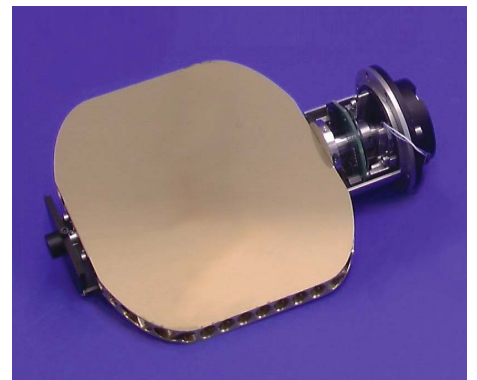
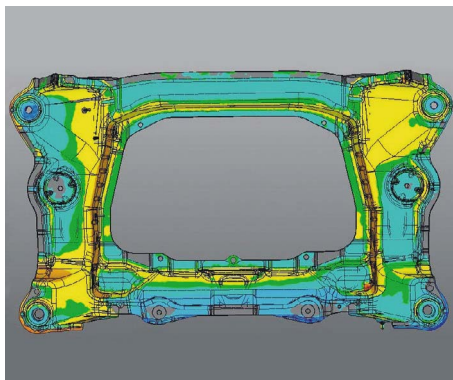
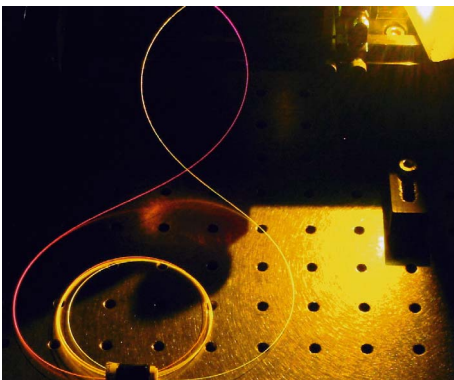




Fraunhofer Institut
Angewandte Optik
und Feinmechanik

Jahresbericht Annual Report 2004



Tailored Light – Licht nach Maß

Jahresbericht 2004
Fraunhofer-Institut
für Angewandte Optik
und Feinmechanik

Annual Report 2004
Fraunhofer Institute
for Applied Optics and
Precision Engineering



Inhalt

Vorwort	4
Wichtige Ereignisse 2004	6
Das Institut im Profil	10
Das Institut in Zahlen	16
Der Fraunhofer-Verbund Oberflächentechnik und Photonik	18
Die Fraunhofer-Gesellschaft	20
Ausgewählte Ergebnisse 2004	21
Ultradünnes Bilderfassungssystem basierend auf künstlichen Facettenaugen	22
Konzentratoren für Hochleistungs-LEDs	28
Kunststoffwafer-Technologie zur parallelen Erzeugung miniaturisierter optischer Systeme	30
Laser-Lithographie für Mikrooptik auf gekrümmten Oberflächen	32
Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen	34
Faserlaser – Innovative Strahlquellen für Forschung und Industrie	38
Leichtgewichtspiegel für einen schnellen Lidar-Scanner	42
Kleine Stäbchen große Wirkung – Miniaturisiertes Ablenkssystem für Lithographieanlagen	48
Mikromontage eines Gitterspaltes für ein astronomisches Spektrometer	50
Lotuseffekt, Kohlrabiblatt, Mottenaugen? Nanostruktur-Design für ultrahydrophobe Oberflächen	52
»NANO-mothee« Antireflexstrukturen für Acryl-Polymere	58
Präzise kontrollierte Schichten und Oberflächenstrukturen	64
Streuverluste fluoridischer Substrate und Schichten bei 193 nm	66
Entwicklung thermisch stabiler MoSi ₂ /Si- und Mo/C/Si/C-Schichtsysteme	68
Optische Simulation einer Strahlungsheizung	70
»Kolibri 1500« – Ein Gerätesystem zur 3-D-Vermessung komplexer Gussteile	72
Vom Mikrofluidik-Baukasten zur flexiblen Diagnostik-Plattform	74
Namen, Daten, Ereignisse	76
Patente	79
Bildungsaktivitäten	81
Messebeteiligungen	82
Wissenschaftliche Publikationen	83
Der Weg zu uns	91

Contents

Preface	5
Highlights 2004	6
The Institute in Profile	10
The Institute in Figures	17
The Fraunhofer Surface Technology and Photonics Alliance	18
The Fraunhofer-Gesellschaft	20
Selected Results	21
Ultra-thin vision system based on artificial compound eyes	23
Concentrators for high-power LEDs	29
Plastic wafer technology for parallel generation of miniaturized optical systems	31
Laser-lithography for micro-optics on curved surfaces	33
Micro-materials processing using ultrashort laser pulses	35
Fiber lasers – Novel light sources in research and industry	39
Light weight mirrors for fast Lidar-Scanners	43
Small bars, large effects – Miniaturized deflection system for lithography equipment	49
Microassembly of a grating slit for astronomical spectroscopy	51
Lotus effect, kohlrabi leaf, motheys? Nanostructure design for ultra-hydrophobic surfaces	53
“NANO-motheys” antireflection structures on acrylic polymers	59
Precise control of coatings and surface structures	65
Scattering losses on fluoride substrates and coatings at 193 nm	67
Development of high-temperature MoSi ₂ /Si and Mo/C/Si/C multilayer mirrors	69
Optical simulation of a radiation heating	71
“Kolibri 1500” – a device system for founding piece inspection	73
From Microfluidic Toolbox to a flexible Diagnostic Platform	75
Names, Dates, Activities	76
Patents	79
Educational Activities	81
Fair Participations	82
Scientific Publications	83
How to reach us	91

Tailored Light – Licht nach Maß



Liebe Leser,

das Geschäftsjahr 2004 des Fraunhofer IOF mit seinen Fakten und Zahlen spiegelt sehr deutlich die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland wider. Nach einem verhaltenen Auftrags-eingang noch im Frühjahr nahm im Laufe des Jahres der Auftragsbestand kontinuierlich zu. Insbesondere die Aufträge aus der Industrie führten zu einem gesteigerten Umsatzvolumen, wobei das Wachstum wesentlich auf Kunden in den Märkten Information und Kommunikation, Automotive und Verkehr sowie Mess- und Prüftechnik zurückzuführen war. Gerade in diesen Märkten bestimmen nach neuesten Markterhebungen auch zukünftig die Optischen Technologien als Wegbereiter und Katalysator die Entwicklung besonders deutlich. Der Einsatz optischer Systeme führt hier zu neuen Produkten, Verfahren und Prozessen, die sich durch höhere Qualität, Produktivität, Sicherheit und Umweltverträglichkeit auszeichnen. Das Fraunhofer IOF mit seiner opto-mechanischen Systemkompetenz ist bereits heute in diesen prosperierenden Märkten etabliert und bereit, sich zukünftigen Herausforderungen zu stellen.

Durch abteilungsübergreifende Schwerpunktbildung konnte im Jahr 2004 sowohl im Bereich des Designs als auch der Fertigung von opto-mechanischen Systemen die wissenschaftlich-technologische Kompetenz weiter ausgebaut werden. So wurde insbesondere die Möglichkeit der Herstellung von mikro- und nano-skaligen Optiken sowie Mess- und Prüfwerkzeugen durch die Erweiterung der Technologiebasis in der Lithographie und Ultrapräzisionsbearbeitung am Institut entscheidend verbessert.

Diese Schwerpunktbildung sowie die enge personelle und technologische Vernetzung mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (IAP), dessen Leiter ich in Personalunion bin, erlaubten den Aufbau einer international herausragenden Kompetenz auf dem Gebiet der mikro- und nano-strukturierten Optik. Die neu gebildeten institutsübergreifenden Projektgruppen sind bereits heute international gesuchte Partner. Aktuelle Projekte betreffen multifunktionale optische Oberflächen für Anwendungen in der Displaytechnik und Sensorik, deren optische Funktion vielfach auf Beispiele in der Natur zurückgeführt werden kann. So bildet beispielsweise das Auge der Fliege ein Vorbild für ein neu entwickeltes ultra-dünnes Kameraobjektiv mit einer Bauhöhe von weniger als 0,3 mm, während die Stacheln der Seemaus ein Vorbild lieferten für die Entwicklung neuartiger Faserlaser und -verstärker. Die Arbeiten wurden mit dem Thüringer Forschungspreis 2004 bzw. mit dem Berthold Leibinger Innovationspreis 2004 ausgezeichnet.

Das gemeinsame Forschungsfeld mikro- und nano-strukturierte Optik bildete einen inhaltlichen Schwerpunkt der Bewerbung der Friedrich-Schiller-Universität Jena und des IOF im Rahmen des Wettbewerbes des Bundesminis-

teriums für Bildung und Forschung zur Einrichtung von Kompetenzzentren zur Förderung von wissenschaftlichem Nachwuchs. Der Antrag wurde im Frühjahr 2004 von einer internationalen Gutachterkommission positiv bewertet. Als eines von bundesweit sechs Zentren wird das Jenaer Zentrum »ultra optics« in den nächsten fünf Jahren mit einem Gesamtvolumen von ca. 10 Mio. Euro gefördert. Die bereitgestellten Mittel werden wesentlich für Grundlagenforschung in der Nanooptik eingesetzt, sie schaffen damit die Voraussetzungen für neuartige optische Systeme mit komplexer Funktionalität.

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

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

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Institutsleiter

Dear reader,

The facts and figures of our 2004 fiscal year clearly reflect economic developments throughout Germany. The relatively low volume of incoming orders until spring was followed by a continual increase in business for the rest of the year. The orders from our industrial partners, especially in the areas of information and communication, car manufacturing, traffic and measuring- and testing-tools, led to an increased sales volume. Recent market surveys clearly show that optical technologies will be a prerequisite and a catalyst for future developments in these markets. The use of optical technologies will lead to new products, methods and processes of outstandingly higher quality and productivity together with better safety and environmental sustainability. The Fraunhofer IOF with its competence in opto-mechanical technologies is already established in these growing markets and ready for future challenges.

Inter-departmental collaboration was focused on the design and manufacture of opto-mechanical systems leading to increased technological expertise in this area. The institute's ability to manufacture micro- and nano-scale optics as well as measuring- and testing-tools was particularly enhanced through the expansion of the technological base in the fields of lithography and ultra-precision techniques.

This focus together with a significant overlap in personnel and technology between the Fraunhofer IOF and the Institute for Applied Physics (IAP) of the Friedrich Schiller University of Jena, of which I am also the director, created an internationally outstanding level of competence in the field of micro- and nano-structured optics. The newly created groups are already much sought-after international partners. Current projects are involved in the development of multi-functional optical surfaces for application in display and sensor technology. The technology providing the required optical functions very often has its origin in nature. The eye of the fly, for example, was the model for a newly developed ultra-thin camera objective with an overall height of less than 0.3 mm. The bristles of the sea mouse helped in the development of novel fiber lasers and amplifiers. These workings were honored with the Thuringia research prize 2004 and with the Berthold Leibinger Innovation Award 2004.

An area of research common to both the Friedrich Schiller University and the IOF is the field of micro and nano-structured optics. In a competition to create centers of excellence for the fostering of new scientific talent, organized by the German federal ministry of education and research, micro- and nano-structured optics was the main focus of our application. This application was positively evaluated by an international group of referees in the spring of 2004. The "ultra optics" center in Jena is one of six centers in Germany and will be supported with 10 million euros over the next 5 years. This support will be used for basic research in the field of nano-optics to allow for the creation of novel optical systems with highly complex functions.

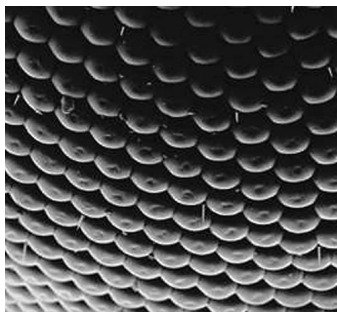
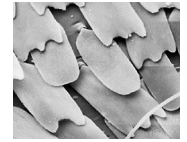
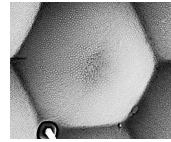
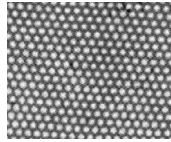
I would like to thank our partners in industry and science for their excellent collaborative work and also: the German federal ministry of education and research, Thuringia's ministry for education and culture and the Deutsche Forschungsgemeinschaft as well as other foundations and associations for their ongoing support.

I hold my colleagues at the Fraunhofer IOF in high esteem for their outstanding results and commitment.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Director

Highlights 2004



Wissenschaft Der Natur ins Auge geschaut

Ultradünne Kamera

Vorbild für die Entwicklung eines ultradünnen Bilderfassungssystems sind die Facettenaugen der Insekten. Die Baulänge ist kleiner als 0,3 mm. Es wurde eine Auflösung von 60 x 60 Bildpunkten realisiert, ausreichend z. B. für die Personenerkennung.

Entspiegelung

Antireflexeigenschaften, hervorgerufen durch periodische Nanostrukturen, zeigen die Augen nachtaktiver Motten. Am IOF wurde ein Plasmaverfahren entwickelt, mit dem PMMA-Oberflächen entspiegelt werden können.

Ultrahydrophobie

Ultrahydrophobie, aus der Natur als Lotuseffekt bekannt, wird durch Nanostrukturen erzeugt, die regelmäßig oder stochastisch sein können. Daraus ergibt sich eine attraktive Vielfalt für die technologische Umsetzung.

Faserlaser

Der Stachel der Seemaus mit seiner hexagonalen Anordnung von Nanoröhrchen ist Vorbild für photonische Kristallfasern. Durch neuartige Faserlaserkonzepte konnten Ausgangsleistungen von 1,3 kW bei einer Strahlqualität von $M^2 < 3$ erzielt werden.

Science Confronted with nature

Ultra-thin camera

The development of an ultra-thin vision system is modeled on the apposition compound eyes of insects. The thickness is less than 0.3 mm. A resolution of 60 x 60 pixels was realized, which is sufficient for person recognition.

Antireflection coating

The eyes of nocturnal moths have antireflection properties due to periodic nanostructures on the cornea. At the IOF a new procedure has been developed to produce antireflection structures by ion etching on PMMA surfaces.

Ultrahydrophobicity

Ultrahydrophobicity (known in nature as the Lotus effect) requires surface nano-structures which are regular or stochastic. This knowledge allows the realization of an attractive variety of potential technical developments.

Fiber lasers

The bristle of the sea mouse with its hexagonal arrangement of nano-tubes is a model for photonic crystal fibers. Output powers of 1.3 kW with a beam quality of $M^2 < 3$ were achieved using new concepts for fiber lasers.



Auszeichnungen

Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis

Für seine »bahnbrechenden Arbeiten zur Entwicklung von Hochleistungs-Faserlasern« wurde Prof. Andreas Tünnermann zur Auszeichnung mit dem höchstdotierten deutschen Förderpreis nominiert.

Thüringer Forschungspreis

Wissenschaftler des Fraunhofer IOF wurden für ihre Arbeiten über »Mikrostrukturierte dielektrische Filter für Farbsensoranwendungen« mit dem Transferpreis des TMWFK ausgezeichnet.

Berthold Leibinger Innovationspreis

Für ihre Arbeiten zur Entwicklung von Hochleistungs-Faserlasern, die Basis für die Erschließung neuartiger Anwendungen sind, wurden Prof. Andreas Tünnermann, Dr. Stefan Nolte und Dr. Holger Zellmer mit dem Berthold Leibinger Innovationspreis 2004 ausgezeichnet.

Jugend forscht

Den 4. Platz im Bundeswettbewerb »Jugend forscht« haben vom Fraunhofer IOF angeleitete Schüler mit der Entwicklung eines 3-D-Scan-Messsystems belegt.

Hugo-Geiger-Preis

Für ihre Diplomarbeit »SPR-Sensor zur parallelen Detektion von mehreren biochemischen Proben« erhielt Michaela Harz den Hugo-Geiger-Preis 2004.

Awards

Gottfried Wilhelm Leibniz-Prize

For his pioneering work on the development of high power fiber lasers Prof. Andreas Tünnermann was nominated for the highest honor awarded in German research.

Thuringia Research Prize

Scientists of Fraunhofer IOF were decorated with the transfer prize of Thuringian ministry of science, research and the arts for their work on "Microstructured dielectric filters for application of colour sensors".

Berthold Leibinger Innovation Prize

For their research work on development of high power fiber lasers, which can be used for a broad range of new applications, Prof. Andreas Tünnermann, Dr. Stefan Nolte and Dr. Holger Zellmer were awarded with the Berthold Leibinger Innovation Prize 2004.

Youth research

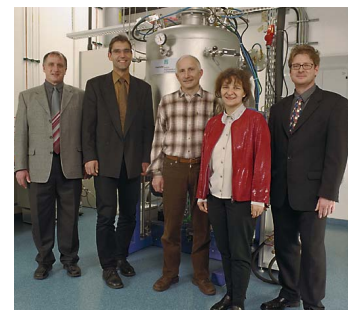
Trainees of Fraunhofer IOF finished fourth in the "Youth research" federal contest with the development of a 3D-Scan measurement system.

Hugo-Geiger-Prize

Michaela Harz was awarded the Hugo-Geiger-Prize 2004 for her diploma theses "SPR-Sensor for parallel detection of several biochemical samples".

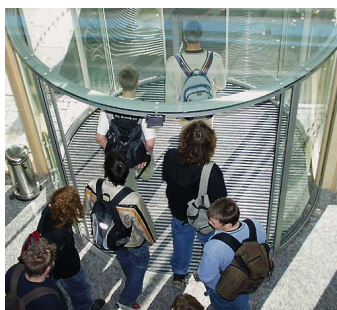
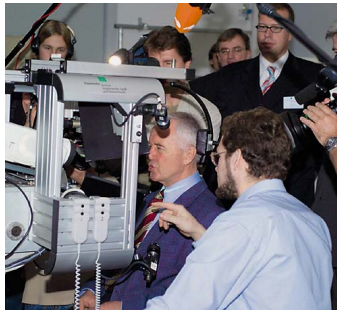


Jugend forscht
Youth research



Thüringer Forschungspreis 2004
Thuringia Research Prize

Dipl.-Ing. Wolfgang Buß (v.l.),
Dr. rer. nat. Marcus Frank,
Dipl.-Phys. Hein Uhlig,
Dr. rer. nat. Ramona Eberhardt,
Dipl.-Ing. Matthias Mohaupt



Das Fraunhofer IOF in der Region

Besuch Bundesminister Stolpe

Bei einem Rundgang durch das Fraunhofer IOF und in einer Gesprächsrunde mit Vertretern aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft der Region informierte sich Bundesminister Dr. Manfred Stolpe am 1. November über die gegenwärtige Situation und die Perspektiven der optischen Industrie in der Region Jena. Erfolgsfaktoren der optischen Industrie in der Region Jena sind u.a. die Existenz einer nahezu geschlossenen Wertschöpfungskette von der Forschung über die Fertigung bis zum Marketing, die enge Zusammenarbeit mit Universität und Fachhochschule sowie dichte Kooperationsbeziehungen in einem etablierten Netzwerk von mehr als 60 Firmen und Forschungseinrichtungen.

Tag der offenen Tür

Mehr als 500 Schüler aus ganz Thüringen gingen am 5. November auf die »Reise in den Nanokosmos«. Gemeinsam mit Wissenschaftlern aus vier Instituten des Beutenberg Campus, darunter das Fraunhofer IOF, erkundeten sie in einem Themenpark mit über 20 Stationen sowie im NanoTruck des BMBF die spannende Welt der Nanotechnologien. Eröffnet wurde die Veranstaltung vom Staatssekretär im Thüringer Kultusministerium, Herrn Prof. Dr. Walter Bauer-Wabnegg, der die Verbindung von Schule und Forschungsinstituten sehr begrüßte.

Fraunhofer IOF in the Region

Visit of Federal Minister Stolpe

Federal minister Dr. Manfred Stolpe learnt about the actual situation and prospects of the optical industry in the Jena region during a tour through the Fraunhofer IOF and a round table discussion with representatives of the optics industry of Jena. The successful development of the optics industry in the Jena region depends on a number of factors including: the existence of a nearly complete value creation chain from research via processing through to marketing, the cooperation with the university and the university of applied sciences and also close cooperation between more than 60 companies and research institutions within the network OptoNet.

Open Day

More than 500 scholars from Thuringia went on a "Journey round the Nanocosmos" on November, 5th. Together with scientists from four institutes at Beutenberg Campus they investigated the exciting world of the nanotechnologies within a theme park with more than 20 stations and in the NanoTruck of the BMBF. The event was opened by Prof. Dr. Walter Bauer-Wabnegg, State Secretary of the Thuringian ministry of education, who appreciated the connection between schools and research institutes.



Konferenzen – Workshops – Messen

10th MICROOPTICS Conference MOC

Das Fraunhofer IOF und das Institut für angewandte Physik der Universität Jena waren vom 1. bis 3. September Gastgeber der 10th MICROOPTICS Conference. Die sonst in Japan stattfindende Konferenz wurde in ihrem Jubiläumsjahr erstmals außerhalb Japans ausgerichtet – eine große Anerkennung für die deutsche Mikrooptik und speziell für den Optik-Standort Jena. 280 Wissenschaftler aus der ganzen Welt nahmen an der Konferenz teil. Den Abschluss bildete das traditionelle Micro-Concert, das in der Aula der FSU stattfand und großen Anklang auch bei der Jenaer Bevölkerung fand.

Workshops

Mit sehr gutem Erfolg und Beteiligungen von jeweils ca. 100 Wissenschaftlern aus Industrie und Forschung wurden 2004 fünf Workshops zu den Themen Mikrooptische Systeme, Ultrapräzisionsbearbeitung, Optische Schichten und 3-D-Messtechnik durchgeführt.

OPTATEC-Messe

Das Fraunhofer IOF hat auf der OPTATEC den Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft koordiniert und war mit aktuellen Forschungsergebnissen aus allen Abteilungen des Instituts erfolgreich präsent. Auf dem Vortragsforum war das IOF mit neun Vorträgen vertreten, die zu zahlreichen Kontakten führten.

Conferences – Workshops – Fairs

10th MICROOPTICS Conference MOC

The Fraunhofer IOF and the Institute for Applied Physics of Jena university were host to the 10th MICROOPTICS Conference from September 1 to 3, 2004. The conference, which normally takes place in Japan, was organized for the first time outside – a big compliment to German micro-optics and especially to the optics-site Jena. 280 scientists from all over the world participated in the conference. Closure was marked by the traditional Micro-Concert which took place in the main hall of the university. This concert also proved very popular with citizens of Jena.

Workshops

Five outstandingly successful workshops were organized in 2004 with the following themes: micro-optical systems, ultra-precision machining, optical coatings and 3D-measurement technique. In each case about 100 scientists from industry and academia attended.

OPTATEC-Fair

The Fraunhofer IOF both coordinated the FhG-booth at OPTATEC and successfully presented recent research from all departments of the institute. Scientists of IOF gave 9 lectures at the OPTATEC forum, which resulted in numerous contacts.



Kurzporträt

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

Schwerpunkte der anwendungsorientierten Forschungsarbeit sind:

- multifunktionale optische Schichtsysteme
- mikrostrukturierte Oberflächen
- 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. Eine Besonderheit des Fraunhofer IOF ist die Kombination von Kompetenzen auf den Gebieten Optik und Präzisionsmechanik.

Anbindung an die FSU Jena

Die Anbindung des Fraunhofer IOF an das Institut für Angewandte Physik (IAP) der FSU regelt seit 2003 ein Kooperationsvertrag. Eine Zusammenarbeit im Rahmen gemeinsamer Forschungsprojekte besteht schon länger.

Forschungsschwerpunkte am IAP sind:

- Mikrooptik, Integrierte Optik
- Ultraschnelle Optik
- Faser- und Wellenleiterlaser
- Optische Kommunikationssysteme.

Vorteile der engen Kooperation sind:

- praxisnahe Studentenausbildung
- bessere Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis
- gemeinsame Nutzung der hochwertigen Geräteausstattung und Infrastruktur.

Short portrait

The main focus of research and development at the Fraunhofer IOF is optical system technologies with a view to continually improving the control of light.

The focus of the application-oriented research is in the following fields:

- multi-functional optical multilayers
- micro-structured surfaces
- characterizing of surfaces and coatings
- micro-optical systems, waveguide optics
- fiber lasers and their application
- optical measurement systems and sensors
- systems for optics-characterization
- fine mechanical precision systems
- procedures of optics assembly.

The central components of IOF expertise are optics and mechanics design. A unique feature of the Fraunhofer IOF is the combination of expertise in optics and precision-mechanics.

Connection to the FSU Jena

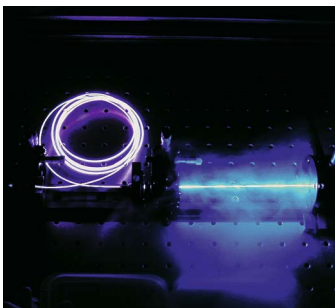
Since 2003 the connection of the IOF to the Institute of Applied Physics (IAP) of the FSU has been regulated by a formal contract of cooperation. However project collaborations have existed for longer.

The main research topics at IAP are:

- micro-optics, integrated optics
- ultra fast optics
- fiber- and waveguide lasers
- optical communication systems

Advantages of the close cooperation are:

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



Kuratorium

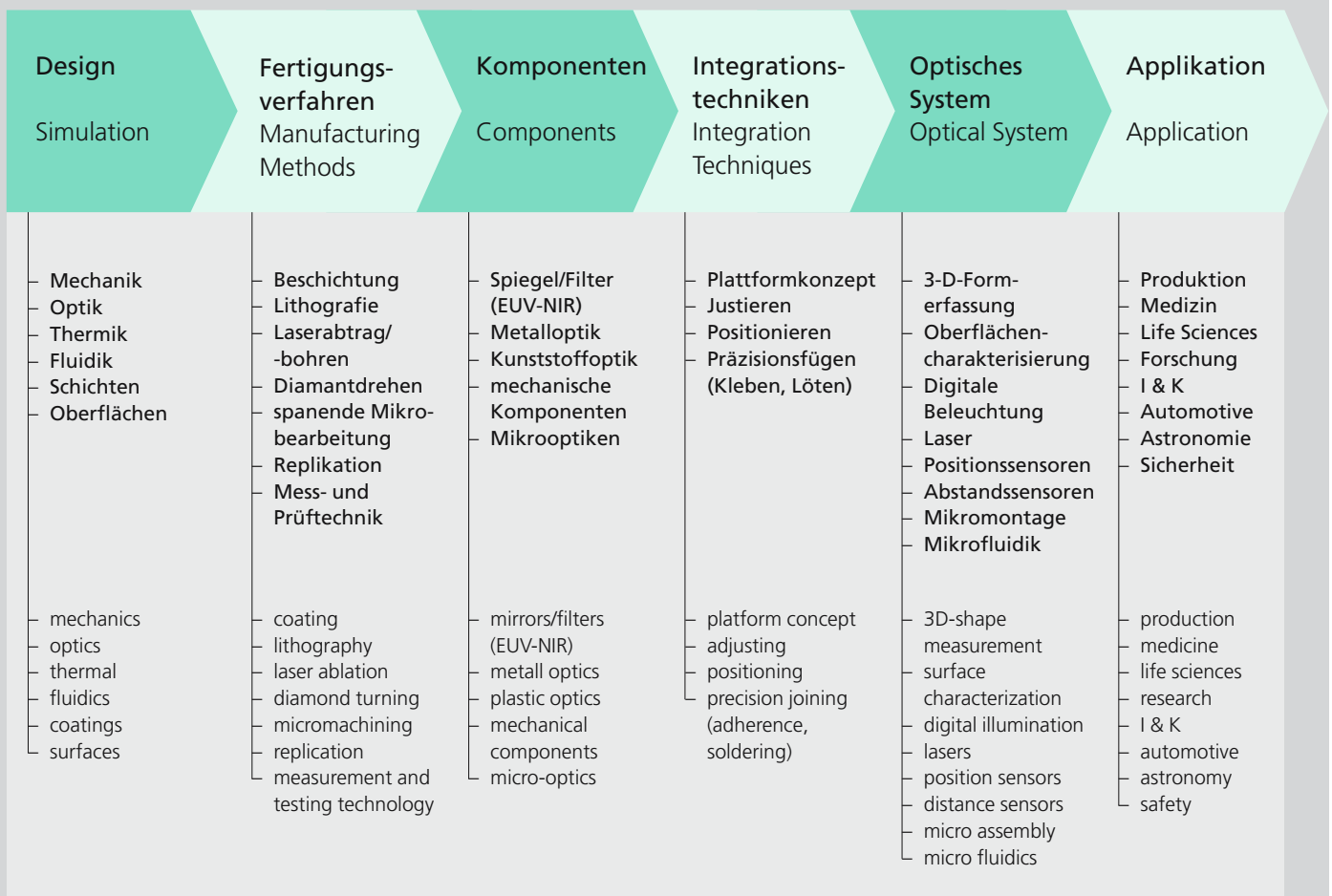
Fraunhofer-Institute und Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft werden durch ein Kuratorium beraten. Dem Kuratorium des IOF gehörten im Berichtszeitraum an:

Advisory committee

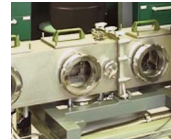
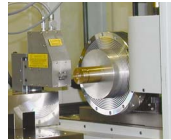
The advisory committee supports the Fraunhofer Institutes as well as the Board of the Fraunhofer-Gesellschaft. Members of the advisory committee of the IOF have been in the report period:

- **Dr. Franz-Ferdinand von Falkenhausen**, Vorsitzender/Chair
Carl Zeiss Jena GmbH, Jena
- **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, Schwieberdingen
- **Dipl.-Ing. Peter Leibinger**
TRUMPF Laser GmbH + Co. KG, Sramberg
- **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
- **Dr. Norbert Stath**
Osram – Opto Semiconductors GmbH, Regensburg
- **Dipl.-Phys. Norbert Thiel**
Jenoptik AG, Jena
- **Dr. Bärbel Voigtsberger**
Hermisdorfer Institut für Technische Keramik e. V., Hermisdorf
- **Prof. Dr. Bernd Wilhelmi**
Jenoptik AG, Jena
- **Dr. Werner Wilke**
VDI/VDE Technologiezentrum, Teltow
- **MinR Jürgen von Schaewen a. G.**
Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn

OPTISCHE SYSTEMTECHNIK OPTICAL SYSTEM TECHNOLOGY



Aus- und Weiterbildung
Education and further training

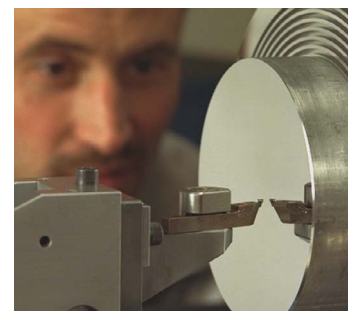
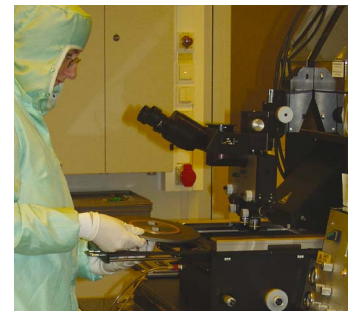


Besondere technische Ausstattung

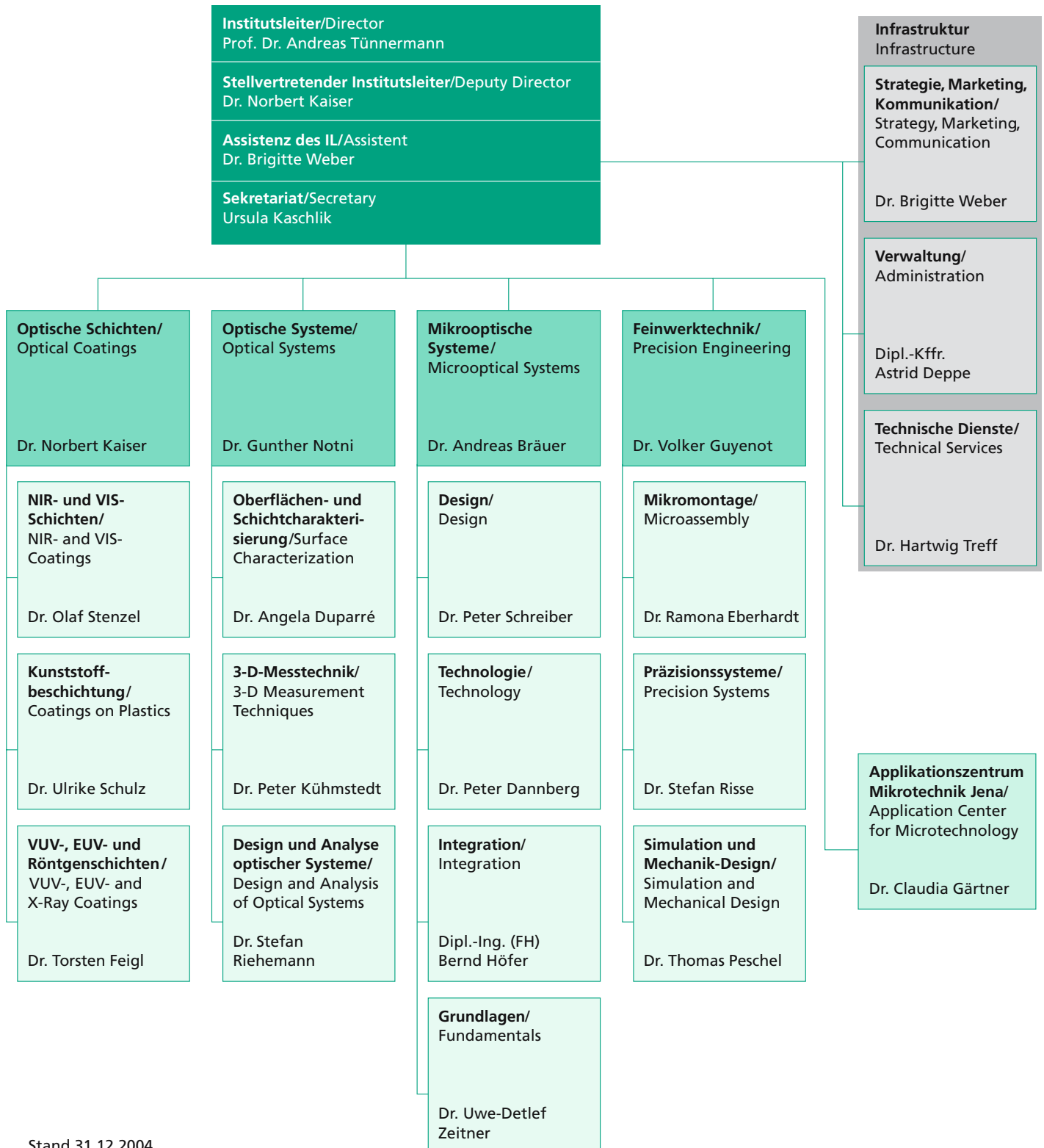
- Design-Werkzeuge
- Beschichtungsanlagen
 - Schichten für EUV – NIR,
 - Kunststoffbeschichtung
- Photo- und Laserlithographie
 - Strukturierung auch auf gekrümmten Flächen
- Aufbau – und Verbindungstechnik
 - Mikromontage
 - Laserlöten
- Ultrapräzisionsbearbeitung
 - Oberflächen in optischer Qualität
 - Freiformflächen
- Prägetechnik
 - Kunststoff und Glas
 - Werkzeugherstellung
- Laserbearbeitung
 - Mikrostrukturierung
 - Herstellung von mikrooptischen Elementen
- Oberflächen- und Schicht- charakterisierung
 - u. a. Streulichtmessung für EUV
- Optische und mechanische Mess- und Prüftechnik
- Feinmechanik-Werkstatt

Special technical equipment

- Design tools
- Coating equipment
 - coatings for EUV – NIR
 - coatings on plastics
- Photo- and laser lithography
 - structuring also on curved surfaces
- Packaging
 - micro assembly
 - laser beam soldering
- Ultra-precision machining
 - surfaces in optics quality
 - free-form surfaces
- Hot embossing
 - plastics and glass
 - fabrication of tools
- Laser shaping
 - micro structuring
 - manufacturing of micro-optical elements
- Surface and coating characterization
 - e. g. scattered light measurement for EUV
- Optical and mechanical measurement and testing techniques
- Precision mechanics workshop



Organisationsstruktur Organisational Structure



Stand 31.12.2004



Institutslenkungsausschuss
Steering committee of the institute

Dr. Claudia Gärtner, Dr. Hartwig Treff, Dr. Gunther Notni, Dr. Brigitte Weber, Prof. Dr. Andreas Tünnermann,
Dr. Volker Guyenot, Dr. Norbert Kaiser, Dipl.-Kffr. Astrid Deppe, Dr. Andreas Bräuer (v. l.)

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

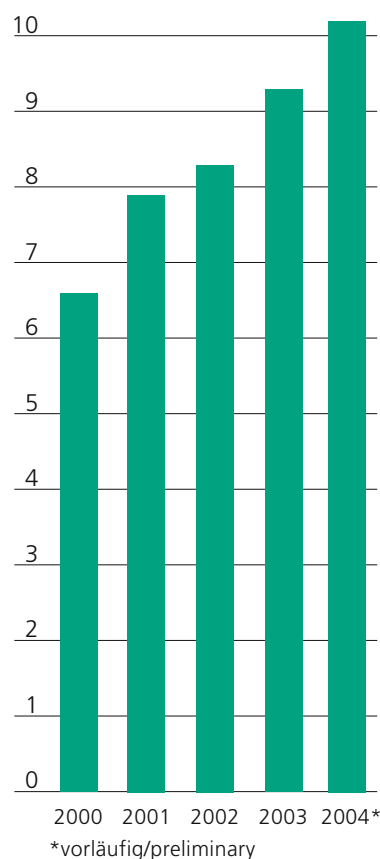
Aus Mitteln der EU, des Freistaats Thüringen und der FhG wurden für die Jahre 2004, 2005 und 2006 insgesamt 12 Mio. Euro zur Beschaffung einer Elektronenstrahlolithographieanlage bewilligt.

Mitarbeiter 2004	IOF	IAP
Wissenschaftler	44	18
Doktoranden	11	18
Techniker	41	16
wiss. Hilfskräfte	34,5	28
Auszubildende	7	-

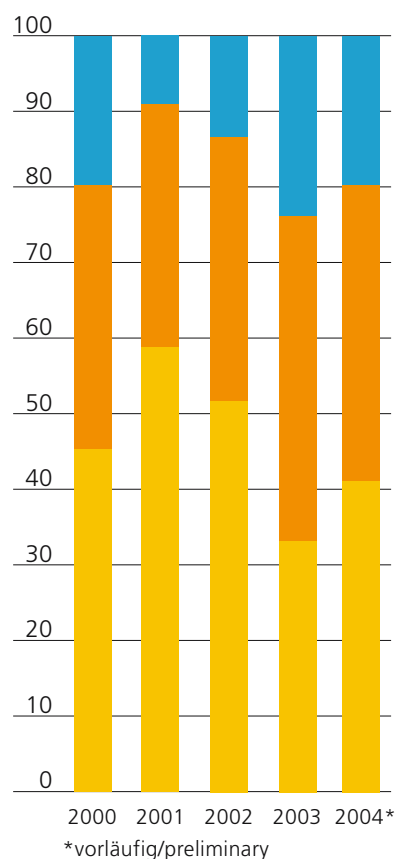
Aufwendungen 2004 in Mio. €	IOF	IAP
Personalaufwand	5,9	2,1
Sachaufwand	4,3	0,5
Investitionen	4,1	2,7

Labor- und Büroflächen		
Fraunhofer IOF		5.000 m ²
IAP		1.200 m ²

Budget (Mio. Euro)

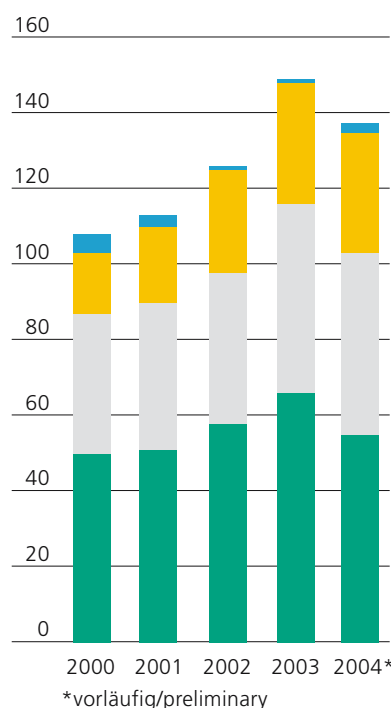


Budget (%)



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

Mitarbeiter/Staff



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

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

Investments

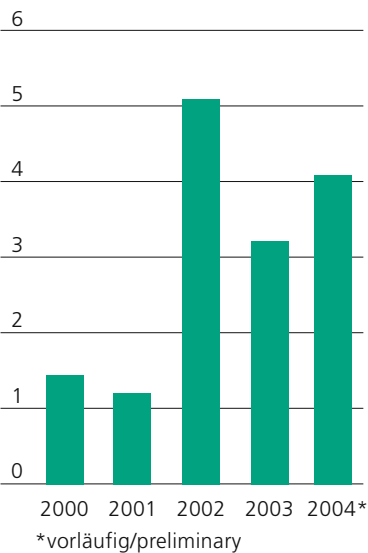
An overall 12 million euros were granted by the EU, the State of Thuringia and the Fraunhofer-Gesellschaft for the years 2004, 2005 and 2006 to fund a new Electron Beam Lithography System.

Employees 2004	IOF	IAP
Scientists	44	18
PhD students	11	18
Technicians	41	16
graduate assistants	34.5	28
trainees	7	-

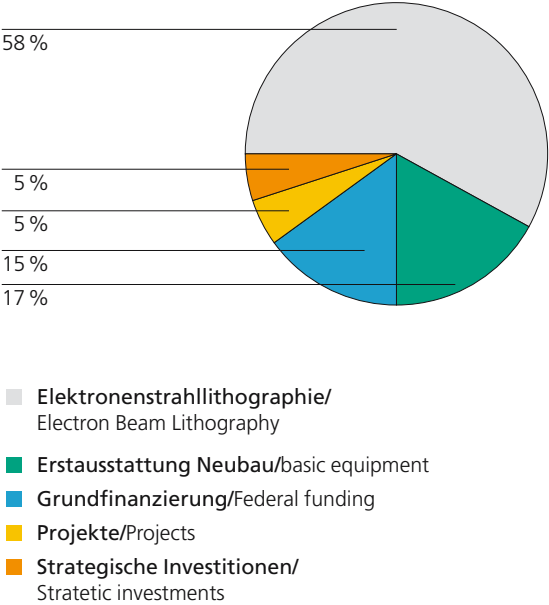
Expenses 2004	IOF	IAP
mio €		
personnel	5.9	2.1
material	4.3	0.5
Investments	4.1	2.7

Laboratories and offices	
Fraunhofer IOF	5,000 m²
IAP	1,200 m²

Investitionen/Investments (Mio. Euro)



Investitionen/Investments 2004



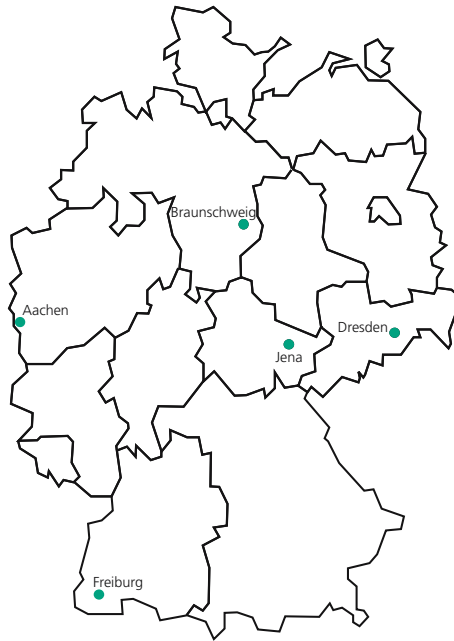


Fraunhofer Verbund
Oberflächentechnik
und Photonik

Kontakt/Koordination
Contact/Coordination

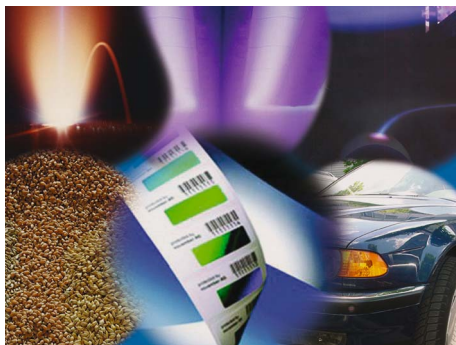
Verbundvorsitzender/Presider
Prof. Dr. Eckard Beyer

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



Kompetenz durch Vernetzung

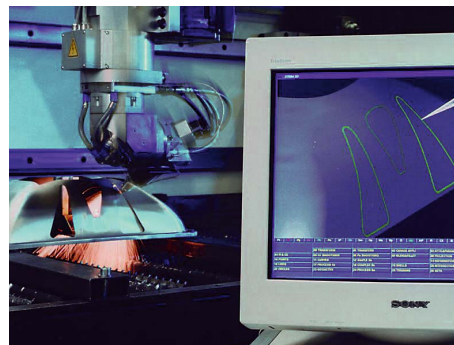
Sechs Fraunhofer-Institute kooperieren im Verbund Oberflächentechnik und Photonik. Aufeinander abgestimmte Kompetenzen gewährleisten eine permanente, schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an den raschen technologischen Fortschritt in allen industriellen Anwendungsbe-
reichen. Koordinierte,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



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

Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP
The ambition of FEP is the research and development of innovative processes for the 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.

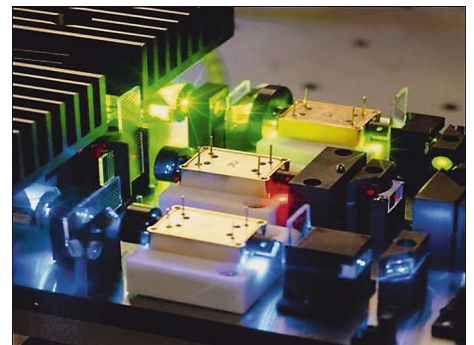
Fraunhofer FEP, Dresden
www.fep.fraunhofer.de



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



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 multi-funktionale optische Schichtsysteme, mikro-optische Systeme, optische Messsysteme und Systeme zur Optik-Charakterisierung, feinmechanische Präzisionssysteme sowie die Mikromontage.

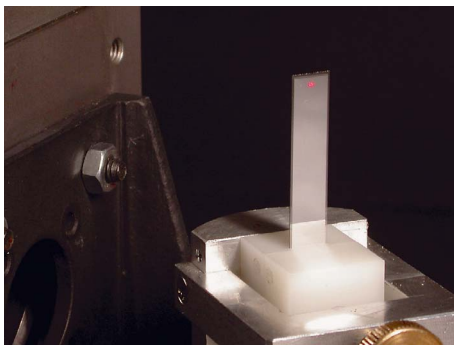
Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF
The core of the research activity of Fraunhofer IOF is optical systems engineering aimed at a steady improvement of light control. The institute's focus is on multifunctional optical coatings, optical measurement systems, micro-optical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

Fraunhofer IOF, Jena
www.iof.fraunhofer.de

Competence by Networking

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

Kernkompetenzen Core Competences	FEP Dresden	ILT Aachen	IOF Jena	IPM Freiburg	IST Braunschweig	IWS Dresden
Schicht- u. Oberflächen- technologie/Coating and Surface Engineering	●	●	●	●	●	●
Strahlquellen/ Beam Sources	●	●	●	●		
Mikro- und Nano- technologie/Micro- and Nanotechnology	●	●	●	●	●	●
Materialbearbeitung/ Materials Treatment	●	●			●	●
Optische Mess- technik/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.

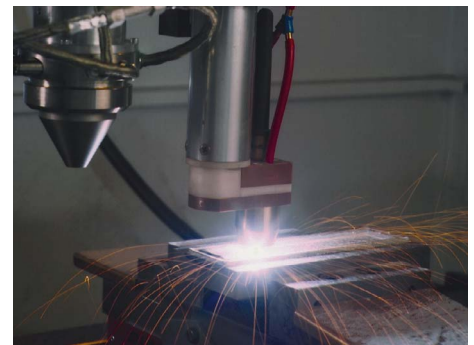
Fraunhofer IPM, Freiburg
www.ipm.fraunhofer.de



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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt anwendungsorientierte Forschung zum direkten Nutzen für Unternehmen und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand. Im Auftrag und mit Förderung durch Ministerien und Behörden des Bundes und der Länder werden zukunftsrelevante Forschungsprojekte durchgeführt, die zu Innovationen im öffentlichen Nachfragebereich und in der Wirtschaft beitragen.

Mit technologie- und systemorientierten Innovationen für ihre Kunden tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Dabei zielen sie auf eine wirtschaftlich erfolgreiche, sozial gerechte und umweltverträgliche Entwicklung der Gesellschaft.

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.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt derzeit rund 80 Forschungseinrichtungen, davon 58 Institute, an über 40 Standorten in ganz Deutschland. Rund 12 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von über 1 Milliarde Euro. Davon fallen mehr als 900 Millionen Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Ein Drittel wird von Bund und Ländern beigesteuert, auch um

damit den Instituten die Möglichkeit zu geben, Problemlösungen vorzubereiten, die 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.

Mitglieder der 1949 gegründeten und als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft sind namhafte Unternehmen und private Förderer. Von ihnen wird die bedarfsorientierte Entwicklung der Fraunhofer-Gesellschaft mitgestaltet. Namensgeber der Gesellschaft ist der als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreiche Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826).

The Fraunhofer-Gesellschaft undertakes applied research of direct utility to private and public enterprise and of wide benefit to society. Its services are solicited by customers and contractual partners in industry, the service sector and public administration. The organization also accepts commissions and funding 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.

By developing technological innovations and novel systems solutions for their customers, the Fraunhofer Institutes help to reinforce the competitive strength of the economy in their local region, and throughout Germany and Europe. Through their work, they aim to promote the successful economic development of our industrial society, with particular regard for social welfare and environmental compatibility.

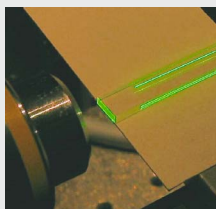
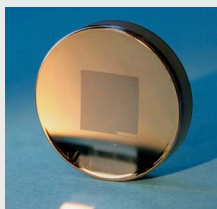
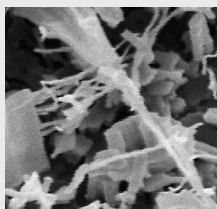
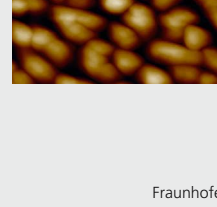
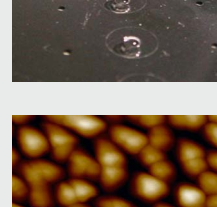
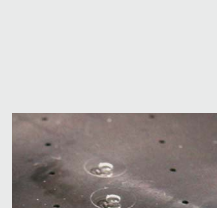
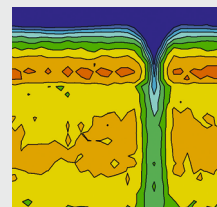
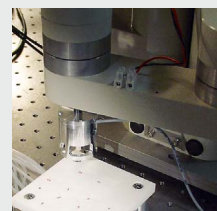
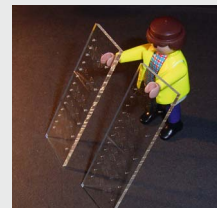
As an employer, the Fraunhofer-Gesellschaft offers its staff the opportunity to develop the professional and personal skills that will allow them to take up positions of responsibility within their institute, in other scientific domains, in industry and in society.

At present, the Fraunhofer-Gesellschaft maintains some 80 research units, including 58 Fraunhofer Institutes, at over 40 different locations in Germany. The majority of the roughly 12,500 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of over 1 billion euros. Of this sum, more than € 900 million is generated through contract research. Roughly two thirds of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. The remaining one third is contributed by the German federal and Länder governments, partly as a means of enabling the institutes to pursue more fundamental research in areas that are likely to become relevant to industry and society in five or ten years' time.

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.

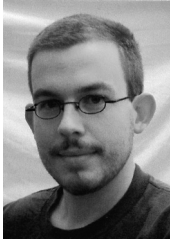
The Fraunhofer-Gesellschaft was founded in 1949 and is a recognized non-profit organization. Its members include well-known companies and private patrons who help to shape the Fraunhofer-Gesellschaft's research policy and strategic development. The organization takes its name from Joseph von Fraunhofer (1787–1826), the illustrious Munich researcher, inventor and entrepreneur.

2004



Ultradünnes Bilderfassungssystem basierend auf künstlichen Facettenaugen

Jacques Duparré, Peter Dannberg, Peter Schreiber, Andreas Bräuer



Jacques Duparré



Peter Dannberg



Peter Schreiber



Andreas Bräuer

Einleitung

Natürliche Facettenaugen vom Appositionstyp vereinigen ein sehr kleines Augenvolumen mit einem großen Gesichtsfeld, allerdings bei vergleichbar geringem Auflösungsvermögen. Ein Insektenauge besteht aus einer Anordnung von Hunderten bis Zehntausenden sehr kleiner Linsen, jede mit einer kleinen Gruppe zugehöriger Fotorezeptoren, angeordnet auf einer gekrümmten Oberfläche. Jede Mikrolinse fokussiert nur Licht auf seine zugehörigen Rezeptoren, welches aus einer bestimmten Richtung des Objektes kommt. Damit erzeugt jeder optische Kanal nur einen Bildpunkt. Die Gesamtheit der Signale aller Kanäle liefert dann das komplette Bild. Für kleine wirbellose Tiere ist dies die bestmöglich angepasste Lösung, um genügend bildliche Information über ihre Umgebung zu sammeln, ohne dabei das Insektengehirn mit aufwendiger Bildverarbeitung zu überlasten. Trotzdem wurde dieses Prinzip bis heute nicht effizient in die technische Optik überführt. Die Motivation für das hier präsentierte künstliche Facettenauge ist es, Bilderfassungssysteme mit minimaler Baulänge zu entwickeln. Künstliche Facettenaugenkameras sollen z. B. in intelligente Chipkarten, Folien oder Bildschirme integrierbar sein und gleichzeitig nicht als Kamera identifiziert werden können.

Das Konzept künstlicher Facettenaugen

Künstliche Rezeptorarrays wie z. B. CCD- oder CMOS-Sensoren werden heutzutage in planarer Halbleitertechnologie gefertigt. Deswegen muss ein dünnes, monolithisches, auf künstlichen Facettenaugen basierendes Objektiv ebenfalls eine ebene Struktur haben.

Das Objektiv, wie in Abb. 1 a, b gezeigt, besteht aus einem Array von Mikrolinsen mit Durchmesser D , Brennweite f und Abstand p_L auf der Vorderseite einer dünnen Abstand haltenden Struktur und einem Array von Lochblenden mit Durchmesser d und Abstand p_p in der Brennebene der Mikrolinsen auf der Rückseite /1/, /2/. Die optischen Achsen und damit die Blickrichtungen der optischen Kanäle wandern durch die Abstandsdivergenz $p_L - p_p$ von Mikrolinsen und Lochblenden von Kanal zu Kanal, woraus der Abtastwinkel $\Delta\Phi$ resultiert. Der Akzeptanzwinkel $\Delta\phi$ eines Kanals ist bestimmt durch die Größe des Lochblendendurchmessers und Beugungseffekte an den Öffnungen der Mikrolinsen. Der Akzeptanzwinkel $\Delta\phi$ ist damit ein Maß, welcher Raumwinkel des Objektes vom optischen System als ein Bildpunkt wiedergegeben wird. Wie auch in ihrem natürlichen Äquivalent ist es notwendig, die Kanäle künstlicher Facettenaugen untereinander durch absorbierende Trennwände optisch zu isolieren, um ein Übersprechen und daraus resultierende Geisterbilder zu verhindern.

Realisierung durch Mikrooptik-Technologie

Das künstliche Facettenaugenobjektiv wird mittels lithographischer Prozesse im Wafermaßstab hergestellt. Für einen ersten technologischen Ansatz wurde ein dünner 4 Zoll-Glas-Wafer mit runden Mikrolinsen in quadratischer Anordnung auf der Vorderseite und Lochblenden auf der Rückseite strukturiert (Abb. 2 a). Die Dicke des Wafers ist dabei genau an die Brennweite der Mikrolinsen in Glas angepasst. Die Lochblenden werden mittels Photolithografie und Nass-Ätzen einer 200 nm dicken Metallschicht auf dem Glas-Wafer aufgebracht.

Ultra-thin vision system based on artificial compound eyes

Jacques Duparré, Peter Dannberg, Peter Schreiber, Andreas Bräuer

Introduction

Apposition compound eyes combine small eye volumes with a large field of view at the cost of low spatial resolution. A natural compound eye is composed of hundreds to tens of thousands of microlens-receptor units arranged on a curved surface. Every lenslet focuses light only from a small solid angle of object space onto its associated photoreceptors. Each channel is generating one image point. The combination of all channels' signals results in the overall image. For small invertebrates the compound eyes are the perfectly adapted solution to get sufficient visual information about their environment without overloading their brain with the necessary image processing. However, to date little effort has been made to technically adopt this principle in the field of optics. The development of the technical compound eye presented here was motivated by the requirement to develop an imaging system with a minimum thickness. Compound eye cameras would fit into credit cards, sheets or displays and would not be recognized as cameras.

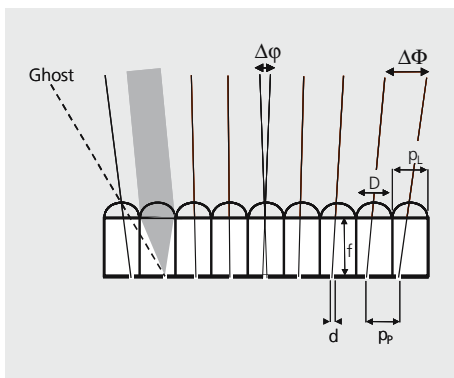


Abb. 1a:
Prinzip eines künstlichen Facettenauges vom Appositionstyp in planarer Bauweise.

Fig. 1a:
Principle of a planar artificial apposition compound eye.

Concept of artificial compound eye optical sensors

Artificial receptor arrays such as CCD- or CMOS-sensors are fabricated on planar surfaces. Thus, a thin monolithic objective based on the artificial apposition compound eye concept has to be a planar structure. The objective, as shown in Fig. 1 a and b, is simply composed of an array of micro lenses with diameter D , focal length f and pitch p_L on the front side of a spacing structure and a pinhole array with pinhole diameters d and pitch p_P in the lenslets focal plane on the reverse side [1, 2]. The optical axes and thus the optical channels' directions of view are directed outwards due to a pitch difference $p_L - p_P$ of microlens- and pinhole arrays which results in the sampling angle $\Delta\Phi$. The acceptance angle $\Delta\phi$ of a channel is determined by the pinhole-diameter d and diffraction effects of the lenslet apertures. $\Delta\phi$ is a measure of which solid angle

in object space is represented by the optical system as one image point. As with the natural equivalent, opaque walls are necessary between ommatidia in order to prevent cross-talk of adjacent channels and the resulting ghost images.

Fabrication by micro-optics technology

The generation of the artificial apposition compound eye objective is carried out using lithographical processes on a wafer scale. The first technical approach used patterning of a thin 4-inch glass wafer with arrays of circular lenslets in a rectangular arrangement on one side and pinhole arrays in the focal plane on the opposite side (Fig. 2 a). The pinhole arrays were generated by photolithography and wet etching of a 200 nm thick metal film. The generation of the microlens arrays consisted of several steps involving master and mold generation followed by UV-replication.

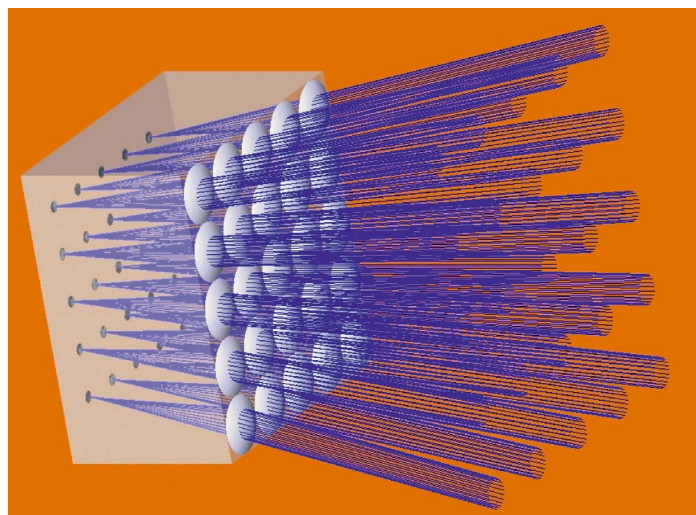


Abb. 1b:
3-D-Modell des künstlichen Facettenauges.

Fig. 1b:
3D-model of the artificial compound eye objective.

Die Mikrolinsen werden in mehreren Schritten gefertigt:

Master-Herstellung durch Aufschmelzen von Photolackpodesten auf einem separaten Silizium-Wafer, Erzeugen des inversen Werkzeuges und nachfolgende UV-Abformung mit einem modifizierten Mask-Aligner. Hierbei wird die Lücke zwischen Glas-Wafer und Abformwerkzeug mit UV-härtbarem, anorganisch-organischem Polymer gefüllt, mit UV-Licht ausgehärtet und dann das Werkzeug entfernt. Auf eine ähnliche Art und unter zusätzlicher Nutzung von mit hohem Aspektverhältnis strukturierbarem Photopolymer als Abstandstruktur zwischen Mikrolinsen und Lochblenden wurde in einem zweiten Technologieschritt ein künstliches Facettenauge mit integrierten Trennwänden zwischen den Kanälen realisiert (Abb. 2 b), um den Effekt auf die Unterdrückung des Übersprechens zu untersuchen.

Ein künstliches Facettenaugenobjektiv des ersten technologischen Ansatzes (dünnes Glas-Substrat) wurde direkt auf ein opto-elektronisches Empfängerarray mit 128×128 Pixeln und $69 \mu\text{m}$ Pixelabstand, welches eine analoge, pixelnahe Berechnung von Kontrast und Kantenorientierung direkt auf dem Bildsensor beinhaltet, aufgebracht /3/. Das resultierende, nur $206 \mu\text{m}$ dünne Objektiv hat eine Blendenzahl von 2.2, ein Gesichtsfeld von $20^\circ \times 20^\circ$ und eine Vergrößerung, die bei einem klassischen Objektiv 24 mm Brennweite entspricht /4/. Es wurden verschiedene Objektive mit Lochblendendurchmessern von 2 bis $8 \mu\text{m}$ im Wafermaßstab hergestellt, um den Einfluss auf Auflösungsvermögen und Lichtstärke zu untersuchen (Abb. 3 a). Diese Objektive wurden vereinzelt und auf das Empfängerarray so aufgebracht, dass sich die Lochblenden stets zentriert vor den korrespondierenden Empfängerpixeln befinden (Abb. 3 b, c).

Charakterisierung hinsichtlich Auflösung, Lichtstärke und Falschlicht

Mit dem beschriebenen Bilderfassungssystem wurden verschiedene Testmuster aufgenommen und hinsichtlich Auflösungsvermögen und Lichtstärke der Anordnung untersucht.

Da in dem ersten technologischen Ansatz auf Trennwände zwischen den Kanälen verzichtet wurde, muss die Größe der Testobjekte dem Gesichtsfeld der Optik angepasst sein, um ein Übersprechen benachbarter Kanäle zu vermeiden. Abbildungen 4 a und b zeigen den selben Siemensstern, einmal abgebildet durch das beschriebene künstliche Facettenaugenobjektiv und zum anderen abgebildet durch ein klassisches Objektiv mit $1/3''$ Bildformat, Blendenzahl 2.0 und Brennweite 12 mm. Abbildung 4 b verdeutlicht die Limitation der Auflösung durch die Nyquistfrequenz des verwendeten Empfängerarrays. Die Auflösung in Abb. 4 a ist ungefähr halb so groß. Die Begrenzung der Auflösung des künstlichen Facettenaugenobjektives resultiert aus der leichten Überlappung der Akzeptanzwinkel benachbarter optischer Kanäle.

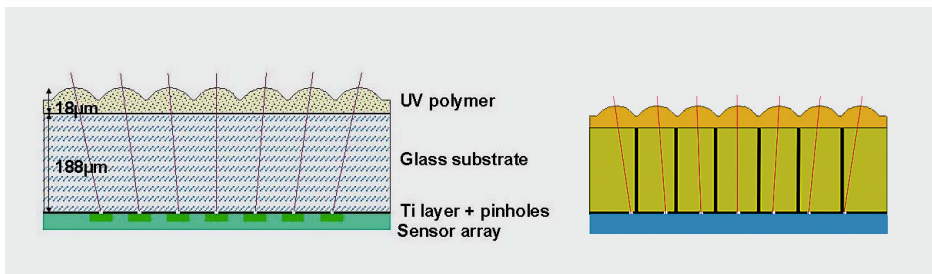


Abb. 2 a:
Schematische Seitenansicht der realisierten Kamera. Glassubstrat mit repliziertem Linsenarray auf der Vorderseite und Lochblendenarray und Detektorarray in der Bildebene der Mikrolinsen auf der Rückseite.

Fig. 2 a:
Schematic side view of the fabricated camera. Replicated lens array, glass substrate, pinhole array and detector array in focal plane.

Abb. 2 b:
Objektiv mit absorbierenden Wänden zwischen den Kanälen zur Verhinderung des Übersprechens.

Fig. 2 b:
Objective with opaque walls between channels for prevention of cross talk.

The photoresist master pattern is fabricated on a silicon wafer in a standard procedure (photolithography in combination with a heating/reflow process). An inverse mold is then generated from the master structure. The replication itself is carried out in a modified contact mask aligner where the gap between glass wafer and mask/mold is filled by a UV curing inorganic-organic hybrid polymer, which is subsequently cured and separated from the mold. In order to overcome the crosstalk problem we equipped the artificial apposition compound eye with opaque walls, using high-aspect-ratio photolithography (Fig. 2 b).

A compound eye objective made by the first technical approach (glass substrate) was directly attached to an opto-electronic sensor array with 128 x 128 pixels and 69 μm pixel-pitch capable of on-chip analog computation

of contrast magnitude and direction of image features /3/. The 206 μm thin imaging system has an F-number of 2.2, a field of view of $20^\circ \times 20^\circ$ and a magnification of an equivalent focal length of 24 mm /4/. Cameras with different pinhole sizes covering the photo-sensitive area of the sensor pixels ranging from 2 to 8 μm were realized in order to examine the influence on resolution and sensitivity (Fig. 3 a). The wafer-scale fabricated objectives are subsequently diced and aligned in front of the detector array (Fig. 3 b, c).

Characterization

Different test patterns were captured using the compound eye vision system and investigated with respect to resolution and sensitivity. Due to the lack of opaque walls between the channels in the first technological

approach, the size of the object presented to the optical system must be matched to its FOV to avoid cross-talk of adjacent channels. Figures 4 a and b show the same radial star pattern imaged by the artificial apposition compound eye and imaged using a bulk 1/3" image format objective with F/# 2.0 and a focal length of 12 mm, respectively. Fig. 4 b shows the limitation of resolution by the sensor's Nyquist frequency. The image resolution in Fig. 4 a using the artificial compound eye objective is approximately half that of the resolution shown in Fig. 4 b. The limiting factor of resolution of the compound eye objective is the overlapping of acceptance angles of the individual channels.

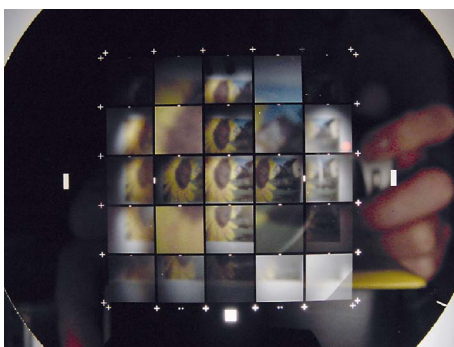


Abb. 3 a:
Wafer mit 5 x 5 ultra-flachen Objektiven vor der Vereinzelung, welche das Bild einer Sonnenblume abbilden.

Fig. 3 a:
Wafer with 5 x 5 ultra-thin objectives (before dicing) imaging a picture of sunflower.

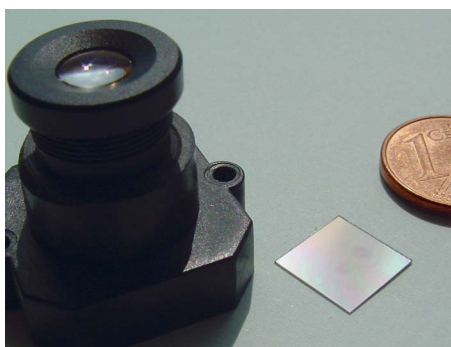


Abb. 3 b:
Vereinzelt künstliches Facettenaugenobjektiv im Vergleich zu einem 1 Euro-Cent-Stück und klassischem Objektiv, welches sonst zur Erzeugung des Bildes auf dem verwendeten Sensor genutzt wird.

Fig. 3 b:
Diced artificial compound eye-objective in comparison to a 1 Euro-Cent and the type of bulk objective usually used with the applied sensor.

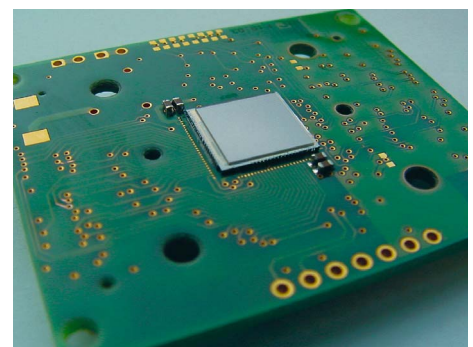


Abb. 3 c:
Künstliches Facettenaugenobjektiv, angebracht auf dem CMOS-Sensor (freundliche Leihgabe des Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) Neuchâtel, Schweiz).

Fig. 3 c:
Objective attached to CMOS-sensor (courtesy of Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) Neuchâtel, Switzerland).

Abbildung 4c zeigt die Aufnahme eines Portraits von Carl Zeiss, welche deutlich macht, dass mit dem beschriebenen ultradünnen Bilderfassungssystem sogar Gesichter erkennbar aufgenommen werden können. Dies verspricht für viele Anwendungen, wie z. B. Sicherheitsüberwachung, automobile Sensoren und Identifikation, von höchstem Interesse zu sein. Für eine quantitative MTF-Bestimmung wurden Strichgitter verschiedener Raumfrequenzen abgebildet. Mittels eines FFT-Formalismus wurde für jede Raumfrequenz die Frequenzantwort (SFR) berechnet, was, in den MTFs präsentiert, in Abb. 4d resultiert.

Wie erwartet, erzielt man mit dem kleinsten Lochblendendurchmesser das beste Auflösungsvermögen. Allerdings ist zu bedenken, dass mit kleiner werdendem Blendendurchmesser, zur Verbesserung der Auflösung, gleichzeitig die Lichtstärke des Objektivs drastisch abnimmt. Der Siemensstern wurde, teilweise außerhalb des Gesichtsfeldes liegend, durch eine Optik ohne Trennwände (Abb. 5a) und unter sonst gleichen Bedingungen durch ein Objektiv mit Trennwänden

(Abb. 5b) abgebildet, um den Effekt der optischen Isolation auf die Unterdrückung des Übersprechens zwischen den Kanälen zu demonstrieren. Dies konnte durch quantitative Messungen der Antwort des Objektivs auf eine $0,65^\circ$ -ausgedehnte Quelle, die dem abbildenden System unter verschiedenen Einfallswinkeln innerhalb und außerhalb des Gesichtsfeldes präsentiert wurde, bestätigt werden (Abb. 5c). Auf diese Weise kann folglich selbst für beliebig ausgedehnte Gesichtsfelder ein funktionstüchtiges und ultradünnes Bilderfassungssystem, basierend auf künstlichen Facettenaugen, realisiert werden.

Zusammenfassung

Wir demonstrierten einen neuartigen optischen Sensor, basierend auf künstlichen Facettenaugen. Die Baulänge des realisierten Objektivs beträgt nur 0,2 mm, es resultiert eine Auflösung von 60×60 Bildpunkten. Experimentelle Ergebnisse zeigen die hervorragende Eignung dieses Konzeptes für Gesichtserkennung.

Danksagung

Wir bedanken uns für die freundliche Leihgabe des CMOS-Sensors durch F. Heitger und P. Nussbaum vom Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) (Bio-inspired Systems-Microelectronics Division), Neuchâtel, Schweiz.

Literatur:

- /1/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Völkel, R.; Bräuer, A.: „Bilderfassungssystem und dessen Verwendung“, Deutsche Patentanmeldung 10 2004 003 013.8 (2004).
- /2/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.: „Artificial apposition compound eye – fabricated by micro-optics technology,“ Appl. Opt. 43(22), (2004) pp. 4303–4310.
- /3/ Rüedi, P.-F.; Heim, P.; Kaess, F.; Grenet, E.; Heitger, F.; Burgi, P.-Y.; Gyger, S.; Nussbaum, P.: „A 128×128 Pixel 120-dB Dynamic-Range Vision-Sensor Chip for Image Contrast and Orientation Extraction,“ IEEE Journal of Solid-State Circuits 38(12), (2003) pp. 2325–2333.
- /4/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Nussbaum, P.; Heitger, F.; Tünnermann, A.: „Ultra-Thin Camera Based on Artificial Apposition Compound Eyes“, E-2, in Proceedings of the 10th Microoptics Conference, ISBN: 3-8274-1603-5, Elsevier GmbH, 2004.

Abb. 4:
Auflösungsvermögen der künstlichen Facettenaugenkamera ...

Fig. 4:
Resolution of the artificial compound eye camera ...

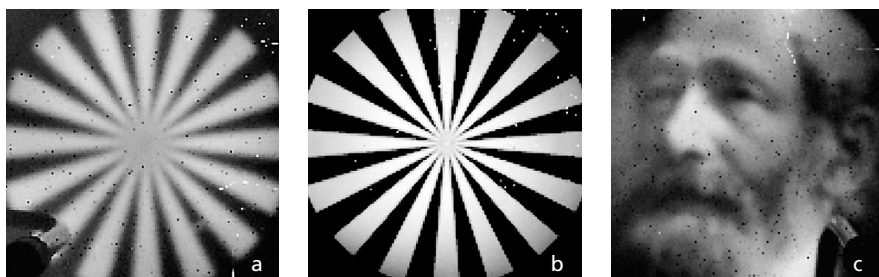


Abb. 4a: Abgebildeter Siemensstern.
Abb. 4b: Siemensstern, abgebildet durch klassisches Objektiv mit 1/3" Bildformat zum Vergleich.
Abb. 4c: Abbild von Carl Zeiss.

Fig. 4a: Radial star pattern.
Fig. 4b: Radial star pattern imaged by bulk 1/3" format objective for comparison.
Fig. 4c: Image of Carl Zeiss.

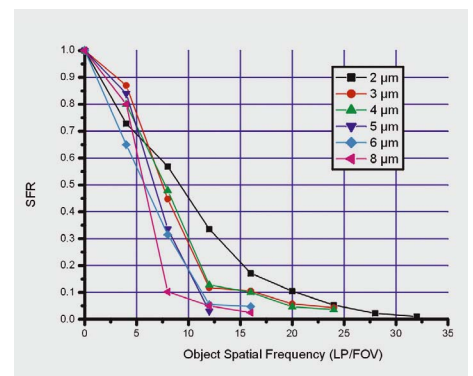


Abb. 4d:
MTF der Facettenaugenkamera mit Lochblendendurchmesser als Parameter.

Fig. 4d:
MTF of compound eye camera with pinhole diameter as the parameter.

Fig. 4 c shows the caption of a portrait-photograph of Carl Zeiss demonstrating the capability of face recognition. This is of particular interest for several applications such as security surveillance, automotive sensors and identification. For a quantitative MTF-determination, bar targets of different spatial frequencies were imaged. Each signal frequency response (SFR) was calculated using an FFT-formalism resulting in the MTFs presented in Fig. 4 d.

As expected the smallest pinhole size leads to the best MTF-characteristics. However using small pinholes for improvement of resolution of the compound eye camera results in a lower sensitivity.

For evaluation of cross talk the radial star pattern was imaged off-axis by a system without opaque walls (Fig. 5 a) under the same conditions as by a system including an optical isolation between ommatidia (Fig. 5 b).

The use of opaque walls for blocking off light from outside the FOV prevents the formation of ghost images and the image contrast is consequently improved. This was confirmed by a quantitative measurement of the response of the objective to a 0.65° -extended source presented to the imaging system under different angles of illumination inside and outside the FOV (Fig. 5 c). Thus a fully operational ultra-thin imaging device based on artificial compound eyes even for arbitrary large illuminated FOV has been achieved.

Summary

We demonstrated a novel optical sensor system based on artificial compound eye vision with an optics-thickness of approximately 0.2 mm and a resolution of 60 x 60 pixels. The experimental results show the suitability of the artificial apposition compound eye concept for face recognition.

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the provision of the opto-electronic vision sensor by F. Heitger and P. Nussbaum of the Bio-inspired Systems-Microelectronics Division of Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM), Neuchâtel, Switzerland.

References

- /1/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Völkel, R.; Bräuer, A.: „Bilderfassungssystem und dessen Verwendung“, Deutsche Patentanmeldung 10 2004 003 013.8 (2004).
- /2/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.: „Artificial apposition compound eye – fabricated by micro-optics technology,“ Appl. Opt. 43(22), (2004) pp. 4303–4310.
- /3/ Rüedi, P.-F.; Heim, P.; Kaess, F.; Grenet, E.; Heitger, F.; Burgi, P.-Y.; Gyger, S.; Nussbaum, P.: „A 128 x 128 Pixel 120-dB Dynamic-Range Vision-Sensor Chip for Image Contrast and Orientation Extraction,“ IEEE Journal of Solid-State Circuits 38(12), (2003) pp. 2325–2333.
- /4/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Nussbaum, P.; Heitger, F.; Tünnermann, A.: „Ultra-Thin Camera Based on Artificial Apposition Compound Eyes“, E-2, in Proceedings of the 10th Microoptics Conference, ISBN: 3-8274-1603-5, Elsevier GmbH, 2004.

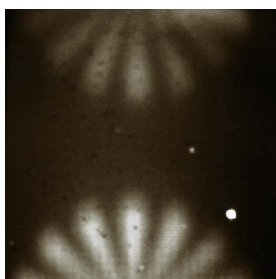


Abb. 5 a:
Geisterbild (oberer Teil) durch Übersprechen zwischen den Kanälen.

Fig. 5 a:
Ghost image (upper part) due to cross talk.

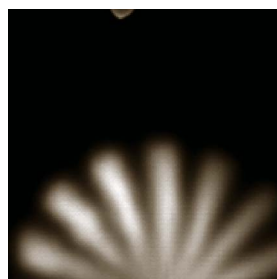


Abb. 5 b:
Durch die Einführung absorbierender Wände können Geisterbilder zwischen den Kanälen unterdrückt werden.

Fig. 5 b:
Ghost images are suppressed by the inclusion of opaque walls.

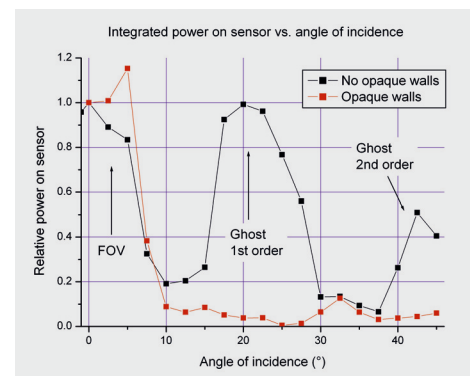


Abb. 5 c:
Quantitative Bestätigung des Effektes der absorbierenden Wände.

Fig. 5 c:
Quantitative measurement of the effect of opaque walls.

Konzentratoren für Hochleistungs-LEDs

Peter Schreiber, Sergey Kudaev, Ralf Steinkopf, Heike Schmidt



Peter Schreiber



Sergey Kudaev



Ralf Steinkopf



Heike Schmidt

Moderne LEDs sind vielversprechende Lichtquellen für viele Anwendungsfelder von der Raumbeleuchtung bis hin zu Lichtquellen mit hoher Leuchtdichte für Projektionsdisplays, Messzwecke und Mikroskopie. Der Aufbau von LED-Lichtquellen erfordert in den meisten Fällen eine chip-nahe erste Optik, die möglichst viel von dem abgestrahlten Licht in einen definierten Raumwinkelbereich konzentriert. Design und Realisierung verschiedener optischer Konzentratoren für diesen Einsatz werden im Weiteren beschrieben.

Der bekannte – nach dem Kantenstrahlenprinzip entworfene – parabolische Verbundkonzentrator (CPC) [1] zeigt gute Eigenschaften hinsichtlich der Effizienz für runde Quellen, aber unbefriedigende Homogenität der räumlichen und Winkelverteilung des abgestrahlten Lichtflusses. Um eine Optimierung von Effizienz und Homogenität auch für quadratische LED-Quellen zu ermöglichen, wurden auf Bezier-Splines basierende Designalgorithmen für reflektive (Abb. 1) und reflektiv/refraktive Konzentratoren (Abb. 2) für den kommerziellen Raytracer ZEMAX implementiert. Durch Nutzung der internen Optimierungsroutinen ist so ein Maßschneidern des Konzentrators für die jeweilige Applikation möglich.

Erste Labordemonstratoren für nach diesem Verfahren entworfene Konzentratoren wurden mittels Einkorn-Diamantdrehen auf einer Ultrapräzisionsmaschine precitec nanoform 350 hergestellt. Auf Totalreflexion basierte kompakte Konzentratoren wurden in PMMA, hohle Konzentratoren in Aluminium gedreht (Abb. 3). Kritisch bei der Herstellung waren Vibrationen der Elemente, die sich in erhöhter Rauigkeit

der bearbeiteten Oberflächen und vergrößerten Streulichtverlusten äußern. Typische erzielbare RMS Rauigkeitswerte betragen ca. 3...5 nm.

Die Charakterisierung der Muster mit modernen 1 mm² Dünnschicht-LEDs von OSRAM zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Designrechnungen (Abb. 4–6). Mit einem kompakten Konzentrator von 14,9 mm Länge und einem Durchmesser der Austrittsapertur von 7,2 mm wurde eine Effizienz von 70 % in den Design-Abstrahlwinkelbereich von $\pm 15^\circ$ gemessen. Die Abweichung vom Designwert 81 % ist hauptsächlich auf von Rauigkeiten herführendem Streulicht zurückzuführen.

Die Autoren danken Stefan Grötsch und Georg Bogner von OSRAM und Andreas Gebhardt vom Fraunhofer IOF. Die vorliegende Arbeit wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 13N8271 gefördert.

Literatur:

- [1] Winston, W. T.; Welford, R.: „The optics of non-imaging concentrators“, Academic Press, San Diego 1978.

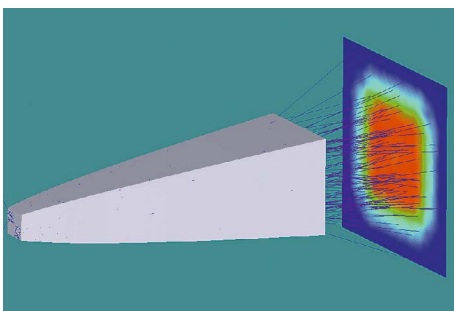


Abb. 1:
Bezier-Konzentrator-Design mit quadratischem Querschnitt.

Fig. 1:
Design of a Bezier-type concentrator with quadratic cross-section.

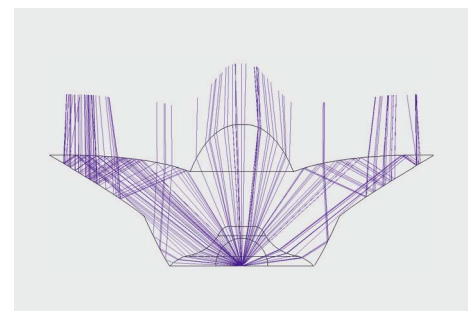


Abb. 2:
Design eines reflektiv/refraktiven Konzentrators.

Fig. 2:
Design of a reflective/refractive concentrator.

Concentrators for high-power LEDs

Peter Schreiber, Sergey Kudaev, Ralf Steinkopf, Heike Schmidt

Current state-of-the-art LEDs are promising light sources for a broad range of applications from room lighting to high-brightness illumination i. e. for miniaturized projection displays, measurement applications and microscopy. The realization of LED illumination devices usually requires a primary optics, which directs as much of the emitted flux as possible into a specified solid angle. Design and realization of different optical concentrators and their application for this purpose are described in the following report.

The well-known compound parabolic concentrator (CPC) designed by the edge-ray principle /1/ exhibits good collection efficiencies for circular source and output apertures, but exhibits poor homogeneity of both spatial and angular output flux distribution. To enable optimal performance with respect to homogeneity and efficiency for circular and also rectangular LED sources, design algorithms for reflective concentrators (Fig. 1) and reflective/refractive elements (Fig. 2), which are based on surface representation by Bezier splines, were implemented into the commercial raytracer ZEMAX.

By using the raytracer's built-in optimization algorithms, the concentrator is tailored for the specific application. The first laboratory samples designed by this approach were manufactured by single-point diamond turning on a pre-citec nanoform 350 ultra-high precision cutting machine. Solid concentrators based in total internal reflection were cut into PMMA polymer and hollow metallic concentrators were turned into aluminum cylinders (Fig. 3). A critical issue during these manufacturing steps were vibrations of the concentrator, which resulted in excess roughness of the turned surfaces causing scattering losses. Typical RMS surface roughness is in the order of 3...5 nm.

The characterization of the samples using modern 1 mm² thin film LEDs from OSRAM demonstrated a close correlation with the design calculations (Fig. 4–6). With a solid concentrator of 14.9 mm length and output aperture diameter of 7.2 mm, an efficiency of 70 % within the design angular range of $\pm 15^\circ$ was measured. The deviation from the design value of 81 % is mainly due to stray light caused by surface roughness.

The authors wish to thank Stefan Grötsch und Georg Bogner from OSRAM and Andreas Gebhardt from Fraunhofer IOF. This work is sponsored by the German ministry for education and research under contract 13N8271.

References:

- /1/ Winston, W. T.; Welford, R.: „The optics of non-imaging concentrators“, Academic Press, San Diego 1978.

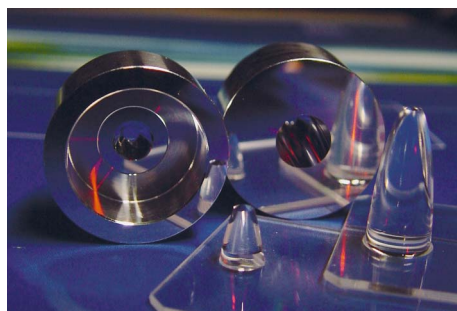


Abb. 3:
Kompakte und hohle Konzentratoren, hergestellt durch Einkorn-Diamantrehen.

Fig. 3:
Solid and hollow concentrators manufactured by single-point diamond turning.

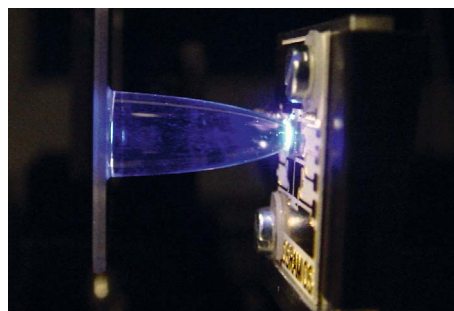


Abb. 4:
Kompakter Konzentrator montiert auf eine blaue Hochleistungs-LED.

Fig. 4:
Solid concentrator attached to a blue high-power LED.

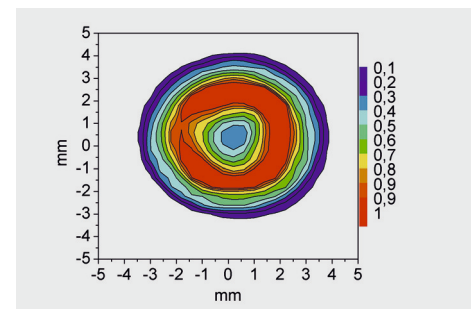


Abb. 5:
Gemessene Bestrahlungsstärkeverteilung in der Ausgangsapertur eines kompakten Konzentratoren.

Fig. 5:
Measured spatial irradiance distribution in the output aperture of a solid concentrator.

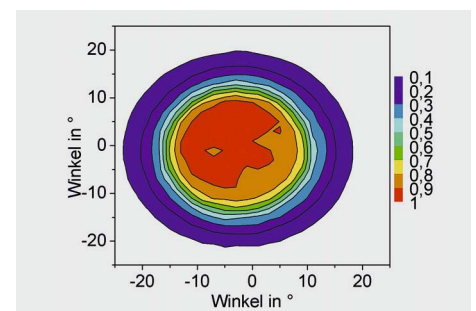


Abb. 6:
Gemessene Intensitätsverteilung des kompakten Konzentratoren.

Fig. 6:
Measured angular intensity distribution of a solid concentrator.

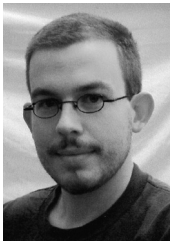
Kunststoffwafer-Technologie zur parallelen Erzeugung miniaturisierter optischer Systeme

Peter Dannberg, Jacques Duparré, Andreas Gebhardt,
Martin Bitzer¹, Reinhard Völkel²

¹Fresnel Optics GmbH Apolda, ²SUSS MicroOptics SA Neuchâtel



Peter Dannberg



Jacques Duparré



Andreas Gebhardt



Martin Bitzer



Reinhard Völkel

Waferkonzepte haben sich über die Mikroelektronik hinaus in Bereichen etabliert, wo Miniaturisierung und parallele Herstellung vieler Systeme, lithografische Strukturierung und die Justage mehrerer Ebenen zueinander eine Rolle spielen. Auch im Bereich miniaturisierter und Mikro-Optik gibt es hierzu erste Ansätze /1/, /2/. Die im Folgenden beschriebenen Arbeiten* sollen am Beispiel der Erzeugung eines mehrlinsigen VGA-Kameraobjektivs mit sehr kurzer Baulänge die Herstellung von Linsen im Array, die Justage und Montage gestapelter Wafer und die Vereinzelung geeignet technologisch umsetzen und kritisch bewerten. Eine Herausforderung sind hierbei die aufgrund des Waferkonzeptes passiv erfolgende Zentrierung und Fokussierung der Einzelsysteme in der Array-Anordnung. Des Weiteren können die Linsenoberflächen nicht mit lithografischen Verfahren erzeugt werden. Werkzeugherstellung, Kunststoffverarbeitung und thermische Ausdehnung limitieren die erreichbaren Justagetoleranzen. Dazu kommen die anwendungsspezifischen Forderungen bezüglich Streulicht und Reflexen, Winkelabhängigkeit, spektraler Charakteristik, Kompatibilität zu CMOS-Sensoren und die Verträglichkeit mit weiteren technologischen Schritten bei der Systemintegration.

Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen erfolgte die Realisierung auf der Basis Heißprägen in thermoplastische Kunststoffe. Diese Technik hat gegenüber UV-Abformung auf Glaswafern zwar eine geringere laterale Präzision, aber Vorteile bei Baulänge, Vereinzelung und Herstellungskosten. Ein angepasstes Optikdesign berücksichtigt die optischen Eigenschaften von Kunststoffen, die technologischen Grenzen beim Heißprägen incl. Justagetoleranzen sowie das Design nicht-optischer Oberflächen und den Einfluss

auf Streulicht und Reflexe. Im Einzelnen folgten daraus die Verwendung von PMMA (Zeonex auch möglich), Substratgröße 6 Zoll, die Verwendung asphärischer Linsenelemente, einseitig plan, mit Mottenaugenstrukturen zur Entspiegelung. Die Aperturblende wurde als schwarze PMMA-Platte mit konischen Durchbrüchen realisiert. Master für die Abformung wurden durch Ultrapräzisionsbearbeitung erzeugt; Diamantdrehen eröffnet hierbei durch das programmierte Abfahren der Linsenkontur maximale Freiheiten hinsichtlich asphärischer Formen. Verfahrensbedingt wird immer nur ein Lenslet, welches sich im Spindelzentrum befindet, hergestellt. Die einzelnen gefertigten Linsenspins werden zu einer Gesamtanordnung assembliert (Abb. 1). Eine Präzision der Array-Anordnung von $< 5 \mu\text{m}$ lateral bzw. $< 10 \mu\text{m}$ axial konnte erzielt werden. Durch mehrere Generationen galvanischer Abformungen wurden die eigentlichen Stempel für das Heißprägen erzeugt. Abb. 2 zeigt Kunststoffplatten mit Linsen sowie Aperturblenden. Erste Tests haben die Möglichkeit der Montage in einem modifizierten Mask-Aligner (SUSS MA8) gezeigt.

* gefördert im EU Projekt IST2001 35366 (WALORI)

Literatur:

- /1/ Roks, Edwin: „Imaging for mobile phones“, 2nd Fraunhofer IMS Workshop for CMOS imaging, Duisburg 2004.
- /2/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L. and Bräuer, A.: „Polymer UV-moulding for micro-optical systems and opto-electronic integration“ SPIE Proceedings 4179 (2000), 137–145.

Plastic wafer technology for parallel generation of miniaturized optical systems

Peter Dannberg, Jacques Duparré, Andreas Gebhardt, Martin Bitzer¹, Reinhard Völkel²

¹Fresnel Optics GmbH Apolda, ²SUSS MicroOptics SA Neuchâtel

Apart from microelectronics, wafer-scale concepts are established in fields where miniaturisation and parallel generation of a high number of systems, as well as lithography and alignment of different layers, are involved. There are also preliminary investigations in the field of miniaturized optics [1], [2]. The aim of the following project* is the construction of a VGA camera lens which has a short overall length. Such a lens would validate the wafer approach including: the generation of lenslets in an array geometry, alignment and bonding of wafer stacks and subsequent dicing. This approach requires an enhanced level of precision in order that each individual system can be accurately centred and focused without additional active alignment. In addition the surface of the lenses cannot be generated by means of lithography. Tooling, plastic processing and thermal expansion all limit the precision of alignment. Additional challenges are the specific requirements concerning: flare, veiling

glare, angle dependence of the imaging, spectral characteristics, tolerance to CMOS image sensors and compatibility with subsequent process steps.

In contrast to previous approaches our concept is based on hot embossing of thermoplastic material. This may result in reduced lateral accuracy but has the advantages of shorter overall length, ease of dicing and lower fabrication cost. The lens design allows for the optical properties of thermoplastics, technological limits in the tooling and hot embossing, including alignment tolerances, as well as for the influence of non-optical surfaces on the flare level. Specifically we used PMMA (Zeonex should also be possible), 6 inch substrates, aspherical lenslets in a plano-konvex geometry together with moth eye structures for flare reduction. A black PMMA substrate with conical openings was used as the aperture stop. Master structures for replication have been generated using ultra-precision machining. In such cases, diamond turning offers the maximum flexibility

in the fabrication of aspheres. According to the turning process every lens surface was fabricated in the form of a single pin. The array geometry has been achieved by the assembly of pins on a base plate (see Fig. 1). The corresponding accuracy was better than 5 µm laterally and 10 µm axially. Final hot embossing tools were generated by subsequent electroplating steps. Fig. 2 shows replicated plastic substrates carrying lenslets as well as aperture stops. Initial tests proved the alignment and bonding of the substrates in a modified mask-aligner (SUSS MA-8) is possible.

* supported by EU in project IST2001 35366 (WALORI)

References:

- /1/ Roks, Edwin: „Imaging for mobile phones“, 2nd Fraunhofer IMS Workshop for CMOS imaging, Duisburg 2004.
- /2/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L. and Bräuer, A.: „Polymer UV-moulding for micro-optical systems and opto-electronic integration“ SPIE Proceedings 4179 (2000), 137–145.

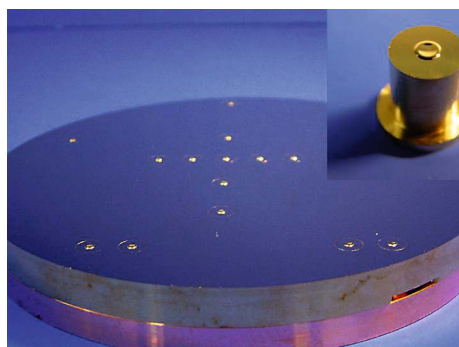


Abb. 1:
Ultrapräzisionsgedrehte Pins in Matrixanordnung.
Die Anzahl der Systeme ist auf 15 reduziert.

Fig. 1:
Ultra-precision machined pins in a matrix configuration. The number of systems on a wafer has been reduced to 15, but the process is capable of much higher numbers (like the desired ~200).



Abb. 2:
Ø 6 Zoll Kunststoffwafer: transparent mit Arrays präziser asphärischer Linsen
(Formfehler < 300 nm PV) sowie darunter schwarz mit konisch geformten
Blenden.

Fig. 2:
Ø 6 inch PMMA wafers carrying precise aspheres (form deviation < 300 nm PV)
and aperture stops.

Laser-Lithographie für Mikrooptik auf gekrümmten Oberflächen

Uwe-Detlef Zeitner, Corina Gräßler



Uwe-Detlef Zeitner



Corina Gräßler

Laser-Lithographie ist eine leistungsfähige Technologie für die Herstellung mikrooptischer Elemente, wie z. B. binärer oder geblazter Gitter, Mikrolinsenarrays oder computergenerierter Hologramme. In der Vergangenheit war die Laser-Lithographie, wie die meisten anderen lithographischen Mikrostrukturierungstechnologien, auf die Herstellung von Strukturen auf ebenen Substraten beschränkt. Daneben existieren jedoch zahllose Anwendungen, die von hochqualitativen optischen Mikrostrukturen auf sphärischen oder beliebig gekrümmten Substraten profitieren. Beispiele sind hybride farb-korrigierte refraktiv-diffraktive Linsen, geblazte Gitter auf Sphären für Spektrometer oder Kombinationen von Mikrolinsenarrays und konventionellen Linsen für Homogenisierungsanwendungen. Zusammen mit der Firma Heidelberg Instruments wurde ein DWL400 Laser-Lithographiesystem für hochauflösende Belichtungen auf gekrümmten Oberflächen entwickelt.

In einem Laser-Lithographiesystem wird das vom Laser kommende Licht von einem Mikroskopobjektiv auf das mit Resist belackte Substrat fokussiert,

welches sich auf einem beweglichen x-y-Tisch befindet. Die Kontrolle der Laserintensität zusammen mit der Tischbewegung ermöglicht so die Belichtung eines vorgegebenen Musters. Das neu entwickelte Laser-Lithographiesystem enthält darüber hinaus substantielle Erweiterungen (siehe Abb. 1). Im x-y-Tisch sind zwei Rahmen für die Kippung des Substrats in orthogonalen Achsen integriert. Die gesamte Platte, die den Laser, die Strahlformungs- und Modulationsoptik sowie das Mikroskopobjektiv trägt, kann gekippt werden, um einen hinreichenden Verfahrweg in z-Richtung zur Belichtung auf stark gekrümmten Substraten zu realisieren. Die Substrate können so an jedem Punkt mit der lokalen Oberfläche senkrecht zur optischen Achse der Fokussierungsoptik positioniert werden, wodurch eine hochauflösende Belichtung auch auf stark geneigten Flächen möglich wird. Alle Bewegungen sind zum Erreichen einer maximalen Positioniergenauigkeit interferometrisch kontrolliert. Die Software für Datenerzeugung und Belichtungskontrolle wurde entsprechend angepasst.

Beispiele strukturierter Konkavlinsen sind in Abb. 2 dargestellt. Die linke Seite von Abb. 2 zeigt ein binäres zirkuläres Gitter auf einem Substrat mit 12,5 mm Durchmesser und einem Krümmungsradius von 50 mm. Die rechte Seite der Abb. 2 zeigt ein konkaves Substrat mit goldbeschichtetem linearem geblaztem Gitter. Beide Gitter haben 10 µm Gitterperiode.

Anwendungen von Mikrostrukturen auf gekrümmten Oberflächen umfassen neben mikrooptischen Elementen auch Strukturen für Mikrofluidik, Mikroelektronik oder Mikromechanik. Die höchsten Anforderungen an die absolute Positioniergenauigkeit der Strukturen resultieren jedoch typischerweise aus der Optik.

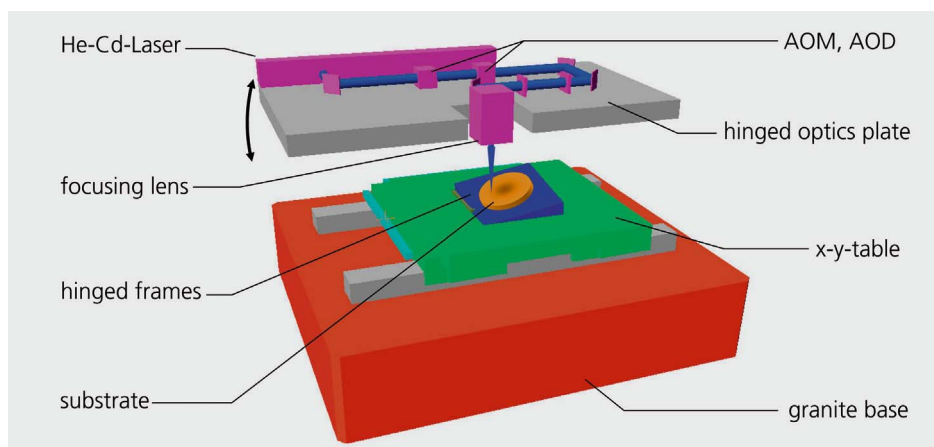


Abb. 1:
Skizze des Laser-Lithographiesystems für Belichtung auf gekrümmten Substraten.

Fig. 1:
Sketch of the laser lithography system for exposure on curved substrates.

Laser-lithography for micro-optics on curved surfaces

Uwe-Detlef Zeitner, Corina Gräßler

Laser-lithography is a powerful technology for the fabrication of micro-optical elements such as binary or blazed gratings, microlens arrays, computer generated holograms etc. In the past, as with most other lithographic micro-structuring techniques, laser-lithography was restricted to structure generation on plane substrates. However, there are innumerable applications which would benefit from high quality optical microstructures on spherical or arbitrarily curved surfaces. Examples include hybrid refractive-diffractive lenses for color correction, blazed gratings on spheres for spectrometers, combinations of microlens arrays and conventional lenses for homogenization. Together with the company Heidelberg Instruments a DWL400 laser lithography system has been extensively modified for the purpose of high resolution exposure on curved surfaces.

In most laser lithography systems the light coming from the laser is focused by a fixed microscope lens onto the resist coated substrate which is mounted on a moving x-y-table. By controlling the laser intensity in correlation with the table movement a predefined pattern is exposed. In addition the newly developed laser lithography system contains some substantial extensions (see sketch in Fig. 1). In the x-y-table two frames for tilting the substrate in orthogonal directions are included. The whole plate carrying the laser, the beam forming and modulating optics, and the focussing lens can be tilted to obtain a sufficiently large z-movement for exposure of curved substrates which have a large surface sag. As a result the substrates can be positioned at each coordinate with the surface normal to the axis of the focussing optics. Thus, a high resolution exposure is possible even on strongly tilted surface areas. All movements are interferometrically controlled for maximum positioning accuracy. The software for data preparation and exposure control was modified accordingly.

Examples of patterned concave lenses are shown in Fig. 2. In the left part of Fig. 2 a binary circular grating (axicon) written on a 12.5 mm diameter substrate of about 50 mm radius of curvature is displayed. The right picture of Fig. 2 shows a concave substrate with a linear blazed grating covered with a reflecting gold layer. Both gratings have a period of $10\text{ }\mu\text{m}$. The last example is designated for application as a focusing grating in a fiber spectrometer.

Applications of micro structures on curved surfaces are not limited to micro-optical elements but can also include structures for micro-fluidics, microelectronics, or micro-mechanics. However, the highest requirements for absolute positioning accuracy of the structures are typically found in optics.

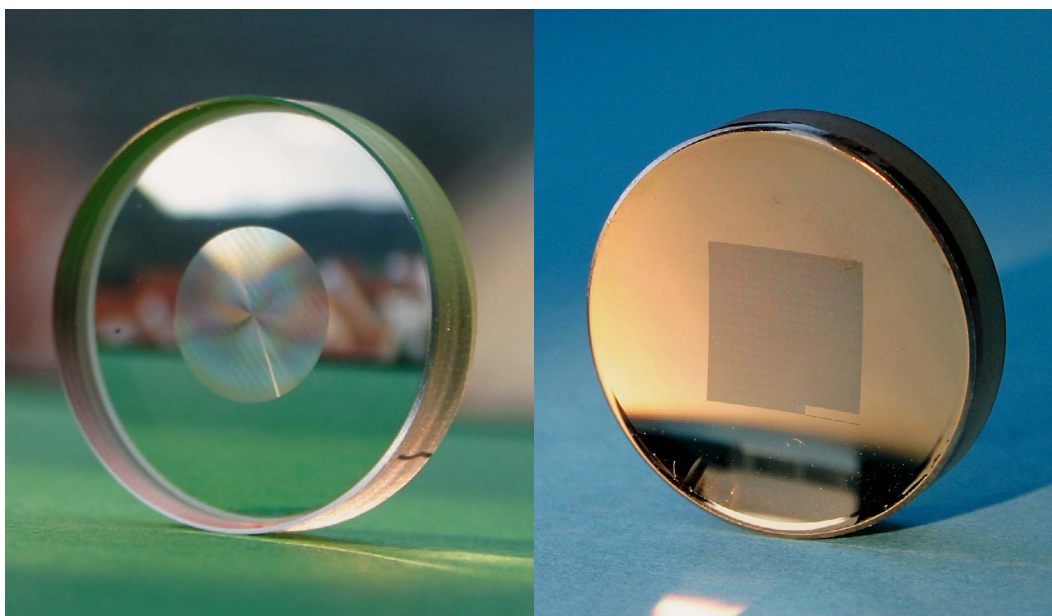


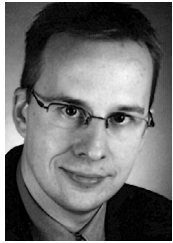
Abb. 2:
Diffraktive Strukturen
auf konkaven Substraten.
Links: zirkulares binäres Gitter,
Rechts: lineares gebraztes Gitter.

Fig. 2:
Diffractive structures
on concave substrates.
left: circular binary grating,
right: linear blazed grating.

Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen

Stefan Nolte¹, Matthias Will¹, Andreas Tünnermann

¹ Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik



Stefan Nolte



Matthias Will



Andreas Tünnermann

Einleitung

Die Mikromaterialbearbeitung gewinnt mit der zunehmenden Miniaturisierung von Komponenten und Baugruppen immer mehr an Bedeutung. Jedoch sind der Herstellung kleiner Strukturen mit Mikrometer- oder sogar Nanometergenauigkeit heutzutage enge Grenzen gesetzt. Insbesondere die hochflexible Strukturierung mit Hilfe von Laserstrahlung scheitert im Allgemeinen – trotz entsprechender Fokussierbarkeit der Strahlung – an dem hohen Wärmeintrag in das Werkstück.

Wechselwirkung ultrakurzer Laserpulse mit Materie

Thermische oder mechanische Schäden lassen sich minimieren bzw. vermeiden, wenn ultrakurze Laserpulse mit Pulsdauern unterhalb weniger Piko- oder sogar im Femtosekundenbereich eingesetzt werden (Abb. 1). Bei geeigneter Wahl der Bearbeitungsparameter ist so eine nahezu schmelzfreie Bearbeitung aller Werkstoffe mit entsprechender Präzision möglich.

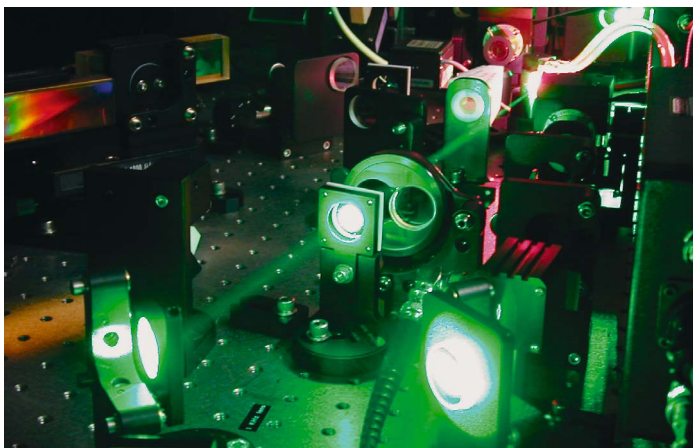


Abb. 1:
Detailaufnahme eines Ultrakurzpulslasersystems.

Fig. 1:
Detail of an ultra-short pulse laser system.

Dies liegt an der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie, die sich deutlich von der Bearbeitung mit langen Pulsen unterscheidet. Bei der Bearbeitung von Metallen koppeln ultrakurze Pulse direkt an die freien Elektronen, bei Halbleitern oder Dielektrika werden zunächst freie Ladungsträger durch Multiphotonenabsorption erzeugt, die dann weiter Laserstrahlung absorbieren und durch Stöße neue freie Elektronen erzeugen (Avalancheionisation). Erst nach dem Laserpuls kommt es zu einem schnellen Energieübertrag an das Festkörpergitter, was schließlich zur Sublimation und Plasmabildung führt. Diese Prozesse verlaufen schnell im Vergleich zu Wärmeleitungsprozessen. Entsprechend können sehr feine Strukturen in praktisch allen Materialien ohne eine thermische Beeinflussung des Werkstücks eingebracht werden.

Anwendungen

Seit Mitte der neunziger Jahre wurden grundlegende Untersuchungen zur Ablation mit ultrakurzen Laserpulsen durchgeführt /1/, /2/, /3/. Mittlerweile ist die Prozessentwicklung so weit fortgeschritten, dass sich fertigungsrelevante Bauteile mit entsprechend hoher Präzision strukturieren lassen (Abb. 2) /4/, /5/.

Micro-materials processing using ultrashort laser pulses

Stefan Nolte¹, Matthias Will¹, Andreas Tünnermann

¹Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik

Introduction

Micro-materials processing is gaining more and more importance due to the increasing miniaturization of components and devices. However, the availability of techniques for the manufacture of fine structures with micrometer or even nanometer precision are limited. Particularly the use of laser radiation for highly flexible structuring – although focusable to micron spot size – fails in general due to the high heat generation within the workpiece.

Interaction of ultra short laser pulses with matter

However, thermal or mechanical damage can be minimized or even avoided through the use of ultrashort laser pulses with a duration of a few picoseconds or in the femtosecond regime (Fig. 1). The choice of appropriate parameters enables an almost melting-free processing of all materials at the highest level of precision.

The reason for this can be found in the interaction process between the laser radiation and the workpiece which differs significantly from long pulse processing. In case of metals the laser radiation is directly coupled to the free electrons. For the processing of semiconductors or dielectrics free electrons are generated by multi-photon absorption in the initial step. These electrons are then accelerated in the laser field and generate more free electrons by impact ionization (avalanche ionization).

After the laser pulse a fast energy transfer to the lattice takes place, resulting in sublimation and plasma generation. These processes are fast compared to typical time-scales for heat diffusion. As a consequence, fine structures can be generated in practically any material without thermal influence.

Applications

Basic investigations on ablation using ultrashort laser pulses have been performed since the mid 1990s /1/, /2/, /3/. Meanwhile, the progress in process development allows for the structuring of real components with the appropriate precision (Fig. 2) /4/, /5/.

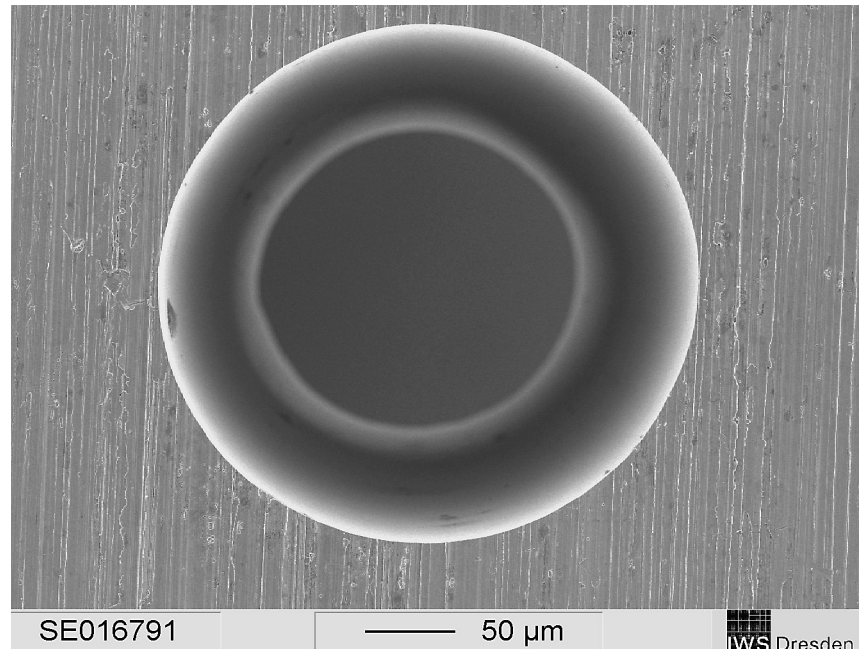


Abb. 2:
Bohrung in 1 mm Chrom-Nickel-Stahl (Durchmesser 300 μm).
Weder Aufschmelzungen noch Gefügeveränderungen sind zu beobachten.

Fig. 2:
Hole drilled in 1 mm stainless steel (diameter 300 μm).
Neither a melt recast layer nor structural damages are visible.

Neben der klassischen Lasermaterialbearbeitung erlauben Ultrakurzpuls-lasersysteme aber auch völlig neue Anwendungen, so können z. B. optische Eigenschaften gezielt verändert werden.

Dazu wird die Laserstrahlung in das Volumen transparenter Materialien fokussiert. Aufgrund der hohen Intensitäten kommt es im Fokus durch Mehrphotonen- und Avalancheprozesse zur lokalen Energieabsorption, woraus ein optischer Durchbruch und die Bildung eines Mikroplasmas resultiert. In der Folge kommt es zu Bindungsbrüchen und zur Ausbildung von Spannungen, die zu einer lokalen permanenten Veränderung des Brechungsindexes führen. Durch Bewegen des Fokus lassen sich so ausgedehnte Strukturen erzeugen (Abb. 3), in denen Licht geführt werden kann. So lassen sich z. B. vergrabene Wellenleiter im Inneren verschiedenster transparenter Gläser und Kristalle schreiben (Abb. 4) /6/.

Durch entsprechende Fokusbewegung können leicht dreidimensionale Wellenleiterstrukturen erzeugt werden /7/, wodurch sich einerseits die Packungsdichte optischer Funktionen erhöhen und Kreuzungspunkte vermeiden, aber auch völlig neuartige integriert-optische Bauelemente realisieren lassen /8/.

Ausblick

Derzeit scheitert eine wirtschaftliche industrielle Umsetzung dieser Technologie im Allgemeinen noch an der Komplexität und der relativ geringen Leistung kommerzieller Ultrakurzpuls-laser. Alternative Laserkonzepte, z. B. auf Faserbasis, die eine deutliche Steigerung der mittleren Leistung erlauben, befinden sich aber in der Entwicklung /9/.

Literatur:

- /1/ Stuart, B. C.; Feit, M. D.; Herman, S.; Rubenchik, A. M.; Shore, B. W.; Perry, M. D.: „Optical ablation by high-power short-pulse lasers“, J. Opt. Soc. Am. B 13 (1996) 459.
- /2/ Chichkov, B. N.; Momma, C.; Nolte, S.; von Alvensleben, F.; Tünnermann, A.: „Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids“, Appl. Phys. A 63 (1996) 109.
- /3/ Nolte, S.; Momma, C.; Jacobs, H.; Tünnermann, A.; Chichkov, B. N.; Wellegehausen, B.; Welling, H.: „Ablation of metals by ultrashort laser pulses“, J. Opt. Soc. Am. B 14 (1997) 2716.
- /4/ Willert, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: „Einfluss der Laserpulsdauer auf die Qualität von Präzisionsbohrungen“, Thüringer Werkstofftag 2002.
- /5/ Willert, M.: „Strukturierung von metallischen Werkstoffen mit Laserstrahlung unter Vermeidung von Gefügeveränderungen“, Dissertation Friedrich-Schiller-Universität Jena 2003, Bosch Schriftenreihe.
- /6/ Davies, K. M.; Miura, K.; Sugimoto, N.; Hirao, K.: „Writing waveguides in glass with a femtosecond laser“, Opt. Lett. 21 (1996) 1729.
- /7/ Nolte, S.; Will, M.; Burghoff, J.; Tünnermann, A.: „Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics“, Appl. Phys. A 77 (2003) 109.
- /8/ Pertsch, T.; Peschel, U.; Lederer, F.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: „Discrete diffraction in two-dimensional arrays of coupled waveguides in silica“, Opt. Lett. 29 (2004) 468.
- /9/ Limpert, J.; Clausnitzer, T.; Liem, A.; Schreiber, T.; Fuchs, H.-J.; Zellmer, H.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: „High average power femtosecond fiber CPA system“, Opt. Lett. 28 (2003) 1984.

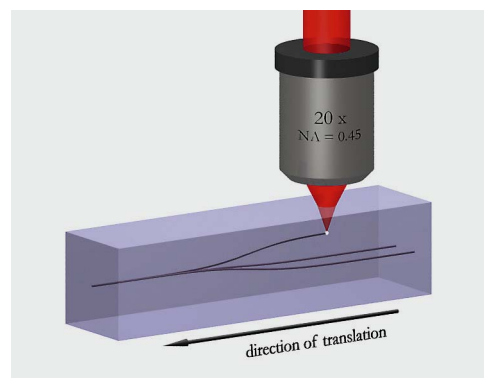


Abb. 3:
Schematische Darstellung des direkten Schreibens von Wellenleitern im Volumen transparenter Festkörper.

Fig. 3:
Schematic diagram of the direct writing of optical waveguides within the volume of transparent solids.

In addition to classical materials processing, ultrashort pulse laser systems open up completely new applications, e.g. the specific alteration of optical properties by directly focusing intense laser radiation inside the volume of a transparent substrate.

Nonlinear absorption of the laser energy in the focal volume takes place leading to an optical breakdown and the formation of a micro-plasma. This induces stress and permanent structural changes resulting in a modification of the refractive index. It is therefore possible to generate light-guiding structures by moving the laser focus (Fig. 3). Using this technique optical waveguides buried inside various transparent glasses and crystals can be manufactured (Fig. 4) /6/.

Through the appropriate movement of the focus position true three-dimensional waveguiding structures can be generated easily /7/. This allows not only for an increase of the packaging density of optical functions and the avoidance of crossings, but also for the realization of completely new integrated optical devices /8/.

Outlook

An economical industrial use of this technology is currently hindered by the complexity and limited available power of today's commercial ultrashort pulse laser systems. However, alternative laser concepts such as those based on optical fibers, which promise a significant improvement of the average power, are under development /9/.

References:

- /1/ Stuart, B. C.; Feit, M. D.; Herman, S.; Rubenchik, A. M.; Shore, B. W.; Perry, M. D.: „Optical ablation by high-power short-pulse lasers“, J. Opt. Soc. Am. B 13 (1996) 459.
- /2/ Chichkov, B.N.; Momma, C.; Nolte, S.; von Alvensleben, F.; Tünnermann, A.: „Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids“, Appl. Phys. A 63 (1996) 109.
- /3/ Nolte, S.; Momma, C.; Jacobs, H.; Tünnermann, A.; Chichkov, B. N.; Wellegehausen, B.; Welling, H.: „Ablation of metals by ultrashort laser pulses“, J. Opt. Soc. Am. B 14 (1997) 2716.
- /4/ Willert, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: „Einfluss der Laserpulsdauer auf die Qualität von Präzisionsbohrungen“, Thüringer Werkstofftag 2002.
- /5/ Willert, M.: „Strukturierung von metallischen Werkstoffen mit Laserstrahlung unter Vermeidung von Gefügeveränderungen“, Dissertation Friedrich-Schiller-Universität Jena 2003, Bosch Schriftenreihe.
- /6/ Davies, K. M.; Miura, K.; Sugimoto, N.; Hirao, K.: „Writing waveguides in glass with a femtosecond laser“, Opt. Lett. 21 (1996) 1729.
- /7/ Nolte, S.; Will, M.; Burghoff, J.; Tünnermann, A.: „Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics“, Appl. Phys. A 77 (2003) 109.
- /8/ Pertsch, T.; Peschel, U.; Lederer, F.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: „Discrete diffraction in two-dimensional arrays of coupled waveguides in silica“, Opt. Lett. 29 (2004) 468.
- /9/ Limpert, J.; Clausnitzer, T.; Liem, A.; Schreiber, T.; Fuchs, H.-J.; Zellmer, H.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: „High average power femtosecond fiber CPA system“, Opt. Lett. 28 (2003) 1984.

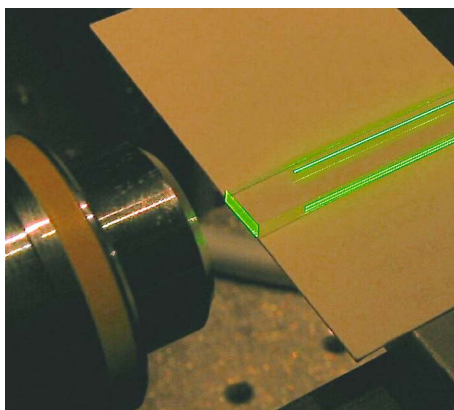


Abb. 4:
Volumenwellenleiter in gebondetem Material mit aktivem (Er/Yb-dotiert) und passivem Bereich. Licht wird in den passiven Teil eingekoppelt, geführt und regt die Fluoreszenz im aktiv dotierten Bereich an.

Fig. 4:
Femtosecond written waveguide in a bonded glass with a doped (Er/Yb) and an undoped region. Pump light is coupled into the device through the undoped region (where it is guided) and excites the fluorescence in the doped region.

Faserlaser – Innovative Strahlquellen für Forschung und Industrie

Holger Zellmer¹, Matthias Reich¹, Andreas Liem¹,
Thomas Schreiber¹, Jens Limpert¹, Andreas Tünnermann

¹ Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik



Holger Zellmer



Matthias Reich



Andreas Liem



Thomas Schreiber



Jens Limpert



Andreas Tünnermann

Einleitung

Mehr als 40 Jahre Entwicklung haben Festkörperlaser zu attraktiven Strahlquellen für Forschung und Industrie gemacht. Ihr Anwendungsbereich erstreckt sich von der Grundlagenforschung über Life Science und Metrologie bis in die industrielle Fertigung. Die meisten der heutigen Anwendungsfelder erfordern kompakte Laserquellen mit hohem Wirkungsgrad, exzellenter Strahlqualität und geringem Wartungsaufwand. Diese Anforderungen können in idealer Weise mit diodengepumpten Festkörperlaser erfüllt werden.

Jedoch wird durch die Stokes-Shift, der Energiedifferenz zwischen Anregungs- und Emissionswellenlänge, Wärme im aktiven Material deponiert, was die maximal erzielbare Ausgangsleistung und Strahlqualität eines Lasers beeinträchtigt. Da die Wärme im gesamten Volumen des Laserkristalls entsteht, die Wärmeableitung aber nur über die Mantelflächen erfolgen kann, entsteht innerhalb des Kristalls ein Temperaturgradient von innen nach außen, welcher aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex zu einem Brechzahlgradienten und somit zu einer thermischen Linse führt.

Ferner führt der Temperaturgradient zu mechanischem Stress, der zum einen über den fotoelastischen Effekt zum Brechzahlgradienten beiträgt und zum anderen Spannungsdoppelbrechung hervorruft. Thermische Linsenwirkung und Spannungsdoppelbrechung führen zur Verschlechterung der Strahlqualität bzw. zur Depolarisation der erzeugten Laserstrahlung. Ein wichtiges Kriterium beim Design moderner Festkörperlaser ist daher das Reduzieren bzw. die Kontrolle thermischer Effekte.

Neue Laserkonzepte

Neuartige Konzepte, wie der Scheibenlaser und der Faserlaser (Abb. 1), zielen vor allem auf die Umgehung thermischer Effekte. Im Gegensatz zu Scheibenlasern, die ein kurzes aktives Medium mit großem Durchmesser zur Verminderung thermischer Effekte verwenden, basieren Faserlaser auf einem aktiven Medium mit nur wenigen Mikrometern Durchmesser, aber mehreren Metern Länge. Die Strahlqualität des Faserlasers wird dabei allein von der Brechzahlstruktur bestimmt, die durch die Faserherstellung fest vorgegeben wird. Brechzahländerungen durch thermische Effekte sind vergleichsweise klein gegenüber den durch die Glaszusammensetzung eingestellten Brechzahlen und haben somit keinerlei Einfluss auf die Strahlqualität. Zusätzlich sorgt das große Verhältnis von Oberfläche zu aktivem Volumen für eine gute Wärmeabfuhr, so dass selbst bei hohen Ausgangsleistungen keine aktive Kühlung der Faser erforderlich ist.

Fiber lasers –

Novel light sources in research and industry

Holger Zellmer¹, Matthias Reich¹, Andreas Liem¹,
Thomas Schreiber¹, Jens Limpert¹, Andreas Tünnermann

¹ Friedrich Schiller University Jena, Institute of Applied Physics

Introduction

In more than forty years of development solid state lasers became attractive light sources for use in research and industry. Their applications range from basic research over life science and metrology to industrial production. Most of the modern applications require compact laser sources with high plug efficiency, excellent beam quality, and low maintenance costs. This demands can be ideally fulfilled by diode pumped solid state lasers.

However, heat is deposited in the active material of the lasers owing to the Stokes shift between the pump and laser wavelength. This affects the accomplishable output power and beam quality. Because heat is deposited in the total volume of the active medium and the heat is removed via the barrel faces of the laser rod only, a temperature gradient builds up inside the laser crystal. Owing to the temperature dependence of the refractive index this temperature gradient causes a refractive index gradient and thus a thermal lens. In addition, the temperature gradient causes mechanical stress which adds to the thermal lensing effect by the elasto-optic properties of the active material. Furthermore, stress induced birefringence leads to the depolarization of the laser radiation. Hence, the reduction and the control of the thermal effects in the active medium is one of the main issues in the design of modern diode pumped solid state lasers.

Novel laser concepts

Novel laser concepts like the thin disk laser or the fiber laser (Fig. 1) aim to avoid or workaround thermal effects. In contrast to the thin disk laser which utilizes a short active medium with large diameter to avoid thermal distortion of the wavefront, fiber lasers are based on an active medium with only a few micron diameter but a length of several meters. The beam quality of the fiber laser is solely determined by the refractive index profile of the fiber which is given by the fiber's fabrication process. Thermal induced changes of the refractive index are small compared to the refractive index profile of the glass composition and will not influence the beam profile of a fiber laser. Moreover, the advantageous ratio of surface to active volume ensures an excellent heat removal from the fiber. Hence, no active cooling of the fiber is required even at high power laser operation.

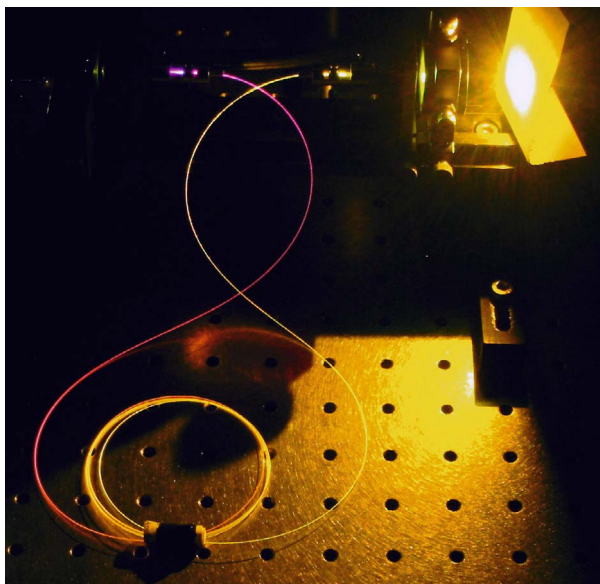


Abb. 1:
Erzeugung eines Superkontinuums in einer photonischen Kristallfaser.

Fig. 1:
Super continuum generation in a photonic crystal fiber.

Hochleistungs-Faserlaser

Für den Hochleistungs-Laserbetrieb wird das Doppelkernkonzept angewendet, um Pumplicht geringer Strahlqualität aus Laserdioden-Stacks in die Faser einkoppeln zu können (Abb. 2). Dabei ist der aktive Kern der Faser von einem Multimodekern umgeben, der in Durchmesser und numerischer Apertur an gängige Hochleistungs-Diodenlaser angepasst ist. Das Pumplicht propagiert in diesem Pumpkern, wird im Verlauf der Faser im aktiven Kern absorbiert und regt dort den Laserprozess an. Eine besonders effiziente Pumplichtabsorption lässt sich erhalten, indem die Zylindersymmetrie des Pumpkerns gebrochen wird. Besonders geeignet dazu sind rechteckige, D-förmige und sechseckige Querschnittsflächen des Pumpkerns. Die Wellenleiterstruktur des aktiven Faserkerns hat einen Durchmesser von typisch 10 μm . Das führt bei hohen Laserleistungen zu extrem hohen Leistungsdichten im Faserkern, die einen Wert von 100 MW/cm^2 überschreiten können. Hierdurch können zum einen störende nichtlineare Effekte

auftreten, zum anderen besteht bei solch hohen Leistungsdichten die Gefahr, dass die Faserendflächen zerstört werden. Um die Leistungsdichte zu verringern, wurden Fasern mit großem Modenfelddurchmesser entwickelt, so genannte Large Mode Area (LMA) Fasern, die Modenfelddurchmesser von 20–30 μm haben. Mit solchen Fasern wurden Ausgangsleistungen um 0,5 kW im Grundmodebetrieb demonstriert. Im Multimodebetrieb wurden 1,3 kW bei guter Strahlqualität ($M^2 < 3$) erreicht.

Die große Länge der aktiven Fasern führt in Verbindung mit der geringen Querschnittsfläche des Faserkerns zu einer sehr hohen Durchgangsverstärkung, die im Bereich von 30–40 dB liegen kann. Sie kann zur Verstärkung sowohl von kontinuierlichen als auch von gepulsten Signalen ausgenutzt werden. Spektrale und zeitliche Eigenschaften von Laseroszillatoren mit geringer Leistung können mit solchen Master Oscillator Fiber Power Amplifier (MOFPA) Systemen in den Hochleistungsbereich übertragen werden. Im schmalbandigen Einfrequenzbetrieb

konnten Leistungen von über 150 W mit sehr geringem Amplitudenrauschen erreicht werden, im Pulsbetrieb wurden 2 mJ bei einer mittleren Leistung von 100 W bei 50 ns Pulsdauer demonstriert. Eine Verringerung der Wiederholrate erlaubt Pulsenergien von 4 mJ. Ferner stellen Faserverstärker eine einfache Lösung zur Erzeugung von kurzen Pulsen mit hoher Energie und großer Repetitionsrate dar. Dabei wird das Prinzip der Chirped Pulse Amplification (CPA), (Abb. 3), angewendet, bei dem die Pulse vor der Verstärkung zeitlich gestreckt und anschließend wieder auf ihre ursprüngliche Dauer komprimiert werden, um die Pulsspitzenleistung im Inneren des Faserverstärkers klein zu halten. Mit solchen Faser-CPA-Systemen lassen sich bei hohen Repetitionsraten mittlere Leistungen um 100 W und Pulsdauern um 80 fs erreichen. Eine Verringerung der Repetitionsrate erlaubt Pulsenergien $> 100 \mu\text{J}$, was den Faserlaser zu einer idealen Quelle für die Materialbearbeitung von Dielektrika und Metallen macht.

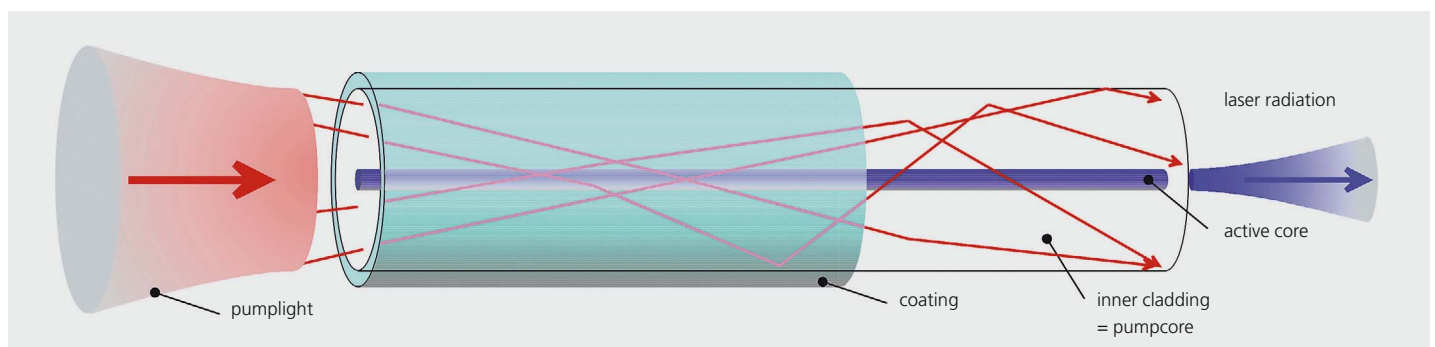


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau eines Faserlasers. Die koaxiale Doppelkernstruktur mit einem Monomodekern für die erzeugte Laserstrahlung und einem Multimodekern für das Pumplicht erlaubt transversalen Grundmodebetrieb bei Verwendung von Hochleistungs-Multimode-Diodenlasern als Pumpquelle.

Fig. 2: Schematic of a fiber laser. The coaxial double clad structure consisting of a single mode core for the generated laser radiation and a multi mode core for the pump radiation enables single transverse mode laser operation applying multi mode pump radiation by high power diode laser pump sources.

High power fiber lasers

To accomplish high power operation the double clad fiber design is applied (Fig. 2). This allows to couple high power laser radiation from a stacked array laser diode to the active fiber. The pump light is launched into an inner cladding of the fiber which acts as a waveguide for the pump light. The pump light propagates in the pump cladding and is gradually absorbed in the active fiber core over the entire fiber length. The pump absorption becomes more efficient with a broken symmetry of the pump cladding. Suitable geometries are D-shaped and hexagonal cross sections of the pump cladding. The dimension of the active fiber core is in the range of $10\text{ }\mu\text{m}$, typically. In high power operation this causes high power densities which can exceed 100 MW/cm^2 . On one hand the high power densities give rise to

nonlinear effects in the fiber and on the other hand there is the risk of damaging the fiber end facets. To reduce the power density special fibers with a large mode field diameter have been developed, the so called large mode area (LMA) fibers. These fibers have a mode field diameter of $20\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ for the fundamental mode. With such fibers a single mode output power of 500 W was demonstrated. In multimode operation an output power of 1.3 kW was accomplished with an $M^2 < 3$.

The long interaction length of a fiber in combination with the small geometrical cross section results in a very high single pass gain in the range of up to $30\text{--}40\text{ dB}$. This can be applied to amplify continuous or pulsed laser radiation. Spectral and temporal properties of low power laser oscillators can be transferred to high power levels applying such master oscillator fiber power amplifier (MOFPA) systems.

In narrow linewidth single frequency operation an output power of 150 W was achieved with extremely low amplitude noise. In pulsed operation (50 ns pulse duration) a pulse energy of 2 mJ was accomplished at an average power of 100 W . By reducing the repetition rate a pulse energy of 4 mJ was achieved. Furthermore, fiber lasers offer a straight forward design for the generation of ultrashort pulses with high energy and high repetition rate. Applying the chirped pulse amplification technique (CPA), (Fig. 3) the pulses are stretched in the time domain by a dispersive delay line, amplified, and recompressed to their original duration after amplification. With fiber CPA systems average output powers of 100 W have been demonstrated at high repetition rates. By reducing the repetition rate high pulse energies $> 100\text{ }\mu\text{J}$ can be achieved. This makes a fiber laser an ideal light source for short pulses material processing of metals and dielectrics.

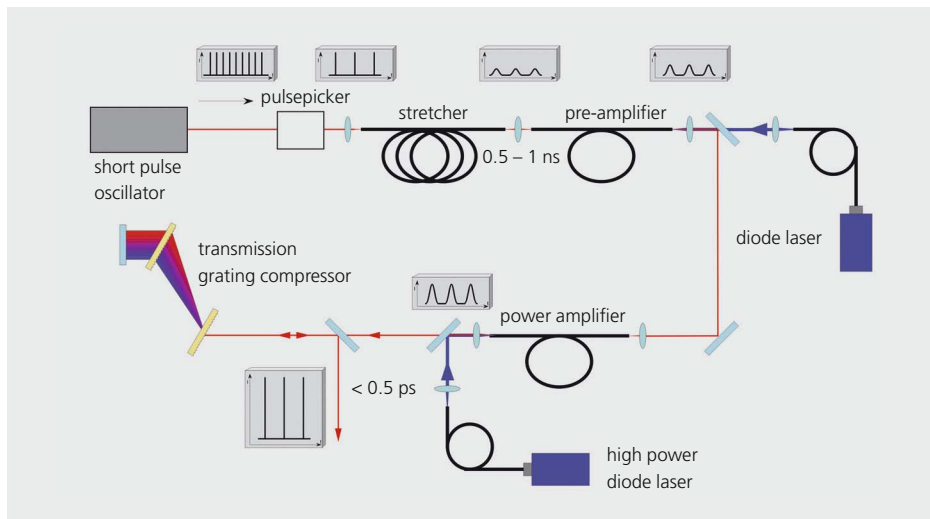


Abb. 3:
Prinzipieller Aufbau eines Kurzpuls-Faser-CPA-Systems. Femtosekunden-Laserpulse hoher Folgefrequenz aber geringer Leistung werden mit Hilfe eines schnellen optischen Schalters (Pulspicker) auf die in der Anwendung gewünschte Wiederholrate gebracht und in einem dispersiven Faser- oder Gitterstrecke auf eine Dauer von $0,5\text{--}1\text{ ns}$ gestreckt. Dadurch verringert sich die Spitzenintensität der Pulse und sie können in einem zweistufigen Faserverstärker die gewünschte Pulsenergie erlangen. In einem Gitterkompressor, der eine zum Strecke komplementäre Dispersion hat, werden die Pulse wieder in den Femtosekundenbereich komprimiert und gelangen dann zur Anwendung.

Fig. 3:
Setup of a short pulse fiber CPA-system. Femtosecond pulses of high repetition rate but low pulse energy are divided to the desired repetition rate with a fast optical switch, the so called pulse picker. In a dispersive delay line the pulse are stretched to $0,5\text{--}1\text{ ns}$ in time domain. The peak intensity is reduced by the stretching and the pulses can be amplified in a 2 stage amplifier to the required pulse energy. In a grating compressor that has complementary dispersion to the stretcher the pulses are recompressed to the femtosecond regime.



Christoph Damm



Andreas Gebhardt



Thomas Peschel

Einleitung

Wirbelschleppen, wie sie hinter startenden oder landenden Flugzeugen entstehen, können eine erhebliche Gefahr für nachfolgende Maschinen darstellen. Sie sind der Grund für die gegenwärtig bis zu 11 km (6,5 Meilen) großen Abstände zwischen den Flugzeugen. In dem europäischen Projekt I-WAKE wurden solche Wirbelschleppen erstmals von einem nachfolgenden Flugzeug aus mittels Lidar nachgewiesen. Die Projektpartner sind Thales Avionics (F) als Projektführer, Airbus (D), das Niederländische Nationale Laboratorium für Luft- und Raumfahrt NLR (NL), die Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt DLR (D), die Universitäten Hamburg (D) und Louvain (B), LISA Laser (D) und das Fraunhofer IOF.

Messung von Turbulenzen

Auf lange Sicht soll ein Sensor entstehen, der den Piloten vor gefährlichen Turbulenzen warnt. Detektiert wird das von Partikeln in der Luft zurückgestreute Licht. Turbulenzen führen aufgrund der Dopplerverschiebung zu einer Verbreiterung des Frequenzbereiches dieses Signals. Die geringe Signalstärke erzwingt eine große Öffnung des Detektionssystems von ca. 100 mm Durchmesser. Gleichzeitig soll ein bestimmter Winkelbereich vor der Maschine mit dem Laserstrahl in kurzer Zeit abgetastet werden.

Für diese Aufgabe wurde ein Scanner mit großer Apertur und gleichzeitig großer Ablenkgeschwindigkeit benötigt. Die Abtastung umfasst eine schnelle Vertikalbewegung mit 7,5 Hz und $\pm 1,5^\circ$ Amplitude verbunden mit einem langsameren Horizontalschwenk von 5 s Dauer und $\pm 6^\circ$ Amplitude. Dadurch ergeben sich Winkelbeschleunigungen von maximal 30 rad/s².

Bisherige Scanner setzen für die schnelle Bewegung meistens gegenläufig rotierende Prismen ein. Für die Horizontalablenkung dient ein Spiegel. Dieser Ansatz verhindert aber eine Kompensation der Flugzeugbewegungen, da die Strahlablenkung durch einen Prismenscanner einer im Wesentlichen durch die Konstruktion vorgegebenen Kurve folgt und das Prismensystem aufgrund seiner Trägheit nicht schnell und flexibel genug nachgeführt werden kann. Außerdem kommt es durch die Rollbewegung des Flugzeugs zu einer Verkippung des Bildfeldes. Um diese auszugleichen, muss auch die Horizontalablenkung schnell erfolgen können.

Scannen mittels Leichtgewichtsspiegeln

Für das von uns erstellte System wurde deshalb ein Aufbau gewählt, bei dem beide Ablenkbewegungen durch Spiegel realisiert werden. Für die vorgesehene Wellenlänge von 2 μm lassen sich solche Spiegel vorzugsweise als Metallspiegel ausführen. Die Herausforderung bei diesem Ansatz liegt in der Größe der benötigten Spiegel: Da die Detektion des Signals kohärent erfolgen soll, sind nur Abweichungen der Spiegeloberfläche von maximal 100 nm r.m.s. ($\lambda/20$ für 2 μm Wellenlänge) von der ideal ebenen Fläche zulässig. Gleichzeitig skaliert die durch die Winkelbeschleunigung induzierte Flächendeformation mit der dritten Potenz der Spiegelgröße, wenn man ein konstantes Aspektverhältnis Durchmesser/Dicke voraussetzt.

Light weight mirrors for fast Lidar-Scanners

Christoph Damm, Andreas Gebhardt, Thomas Peschel

Introduction

Wake vortices, which arise behind aircrafts, can be extremely dangerous for planes following, particularly during take-off and landing. Such vortices are the main reason for the large distances of up to 6.5 miles (11 km) that have to be kept between aircrafts. Within the European project I-WAKE such wake vortices were detected for the first time by lidar from aboard the following aircraft. The partners in this Project are Thales Avionics (F) as the consortium leader, Airbus (D), the Dutch National Aerospace Laboratory NLR (NL), the German Society for Aerospace Research (D), the universities of Hamburg (D) and Louvain (B), LISA Laser (D), and the Fraunhofer IOF (D).

Measurement of turbulences

In the long term, an onboard sensor shall be developed that warns the pilot in the case of dangerous turbulence. The sensor relies on light scattered back by aerosols. Velocity fluctuations due to turbulence cause a Doppler broadening of the frequency band of the signal. The small signal level requires a large detection system aperture with a diameter of approximately 100 mm. This beam must scan a specific area of interest in front of the aircraft.

This task required a relatively fast, large aperture scanner. Scanning is comprised of a fast vertical motion with an amplitude of $\pm 1.5^\circ$ at a frequency of 7.5 Hz and a slow horizontal sweep of $\pm 6^\circ$ within 5 s. The maximum angular accelerations are of the order of 30 rad/s^2 . Previous scanner systems mostly relied on counter-rotating prisms for the fast motion while the horizontal scan is done with a mirror. However, this approach does not allow compensation for the motion of the aircraft

because the fast scanning motion is predefined by the design of the prism system and cannot be changed fast enough because of prism inertia. Furthermore, the roll motion of the aircraft results in a tilt of the scanning area, and in order to compensate for this the horizontal scanner has to perform a fast motion.

Scanners based on light-weight mirrors

The system developed in the present project relies on mirrors to realize both scanning motions. Since the wavelength of the sensor is $2 \mu\text{m}$ such mirrors should preferably be manufactured from metal by single-point diamond turning. The challenge of this approach lies in the size of the mirrors: Since a coherent detection of the signal is used, the surface aberrations of the mirrors must be below 100 nm r.m.s. (i.e. $\lambda/20$ for $2 \mu\text{m}$ wavelength). On the other hand the surface deviations induced by the angular acceleration of the mirrors is proportional to the mirror size cubed, if one assumes a constant ratio of mirror diameter and thickness. For the required aperture and surface quality a massive mirror would possess an unacceptably high thickness and thus inertia. Consequently, a light-weight structure of maximum stiffness was necessary.

Für die vorgesehene Spiegelgröße und die geforderten geringen Oberflächen-deformationen wäre ein massiver Spiegel nur bei unakzeptabel hoher Dicke und damit großer Trägheit einsetzbar. Deshalb wurde eine möglichst steife Leichtgewichtstruktur gesucht. Der übliche Ansatz, Leichtgewichtstrukturen durch Ausfräsen der Rückseite des Spiegels zu erzeugen, hat sich in ersten Finite-Element-Berechnungen als nicht realisierbar erwiesen, da zu große Flächendeformationen auftraten. Gleichzeitig neigt ein solches Design zum Durchdrücken der Stützstrukturen bei der Bearbeitung der Vorderseite des Spiegels.

Deshalb muss die verbleibende Materialdicke relativ hoch gewählt werden, was die Masseersparnis durch die Leichtgewichtstruktur begrenzt. Zur Lösung des Problems wurde am Fraunhofer IOF ein neuartiges Verfahren zur Herstellung von Leichtgewichtstrukturen entwickelt. Dabei werden die Scannerspiegel mit Bohrungen versehen, die wie ein Gitter in zwei orthogonalen Richtungen parallel zur Spiegeloberfläche laufen.

Dadurch konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Gewichtsreduktion um 60 %.
- Die Rückseite des Spiegels bleibt als geschlossene Fläche erhalten und kann dadurch maximal zur Steifigkeit beitragen. Material wird vorzugsweise in der neutralen Fläche entnommen, wo es kaum zur Steifigkeit beiträgt.

- Vorder- und Rückseite können relativ dünn gehalten werden, da der Gewölbeeffekt ein Durchdrücken der Fläche über den Bohrungen erschwert. Im konkreten Fall wurde eine verbleibende Materialstärke von 1,5 mm erreicht.
- Die geschlossene Rückfläche erleichtert das Aufspannen des Spiegels auf der Bearbeitungsmaschine.

Es wurden zwei Spiegel aus Aluminium (6061) gefertigt. Die Dicke der Spiegel beträgt jeweils 12 mm bei einem Bohrungsdurchmesser von 9 mm (Abb. 1). Es wurden die in Tab. 1 aufgeführten Parameter erreicht.

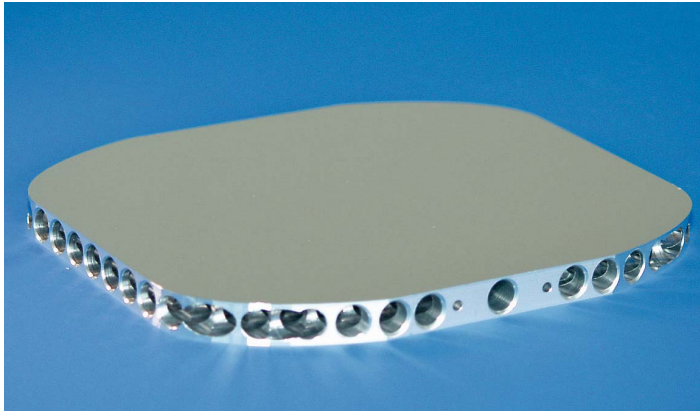


Abb. 1:
Leichtgewichtspiegel (Spiegel 1)
nach der Diamantbearbeitung.

Fig. 1:
Light weight mirror (mirror 1)
after single-point diamond turning.

Tab. 1:
Parameter.

Spiegel	1	2
Abmessungen [mm]	178 x 146	146 x 110
Masse [g]	359	208
Trägheitsmoment [g cm ²]	6960	2240
Flächenkipfung bei 30 rad/s ² (aus FEM-Berechnung s. Abb. 2) [Bogensekunden]	0,9	0,3
r.m.s. Flächenfehler bei 30 rad/s ² zur besten Fitebene (aus FEM-Berechnung) [nm]	18	5

Conventional manufacture of light-weight structures relies on milling pockets into the reverse side of the mirror. However, as initial finite-element calculations proved, this approach would result in unacceptable surface deformations for the given task. Furthermore, such a design tends to show a print-through of the light-weight structure when the mirror surface is machined. This requires that the remaining thickness of the front sheet of the mirror is relatively large but this in turn reduces the effect of light-weighting.

To solve this problem a new light-weighting technology was developed at Fraunhofer IOF. It relies on drilling holes in the form of an orthogonal grid. The holes run along the centerline of the mirror, parallel to its front surface.

Using this technology we obtained the following results:

- Weight reduction by 60 %.
- The back surface of the mirror remains untouched and can give a maximum contribution to stiffness. Material is preferably removed from the center of the mirror where it provides only marginal contributions to stiffness.

- Both, front and back sheets can be kept thin because the vault-like shape of the holes reduces print-through effects. The present design uses front and back sheets as thin as 1.5 mm in contrast to the 4 mm (minimum) thickness necessary in a conventional design.
- The intact back sheet makes machining of the mirror much easier.

Two mirrors were made from aluminium 6061. Their thickness is 12 mm while the bore diameter is 9 mm (see Fig. 1). The following parameters have been achieved (Tab. 1).

Tab.1:
Parameters.

Mirror	1	2
Size [mm]	178 x 146	146 x 110
Mass [g]	359	208
Rotatory inertia [g cm ²]	6,960	2,240
Tilt of front surface at 30 rad/s ² (by FEM-calculation, see Fig. 2) [arc sec]	0.9	0.3
r.m.s. surface deviation wrt. an ideal plane at 30 rad/s ² (by FEM-calculation) [nm]	18	5

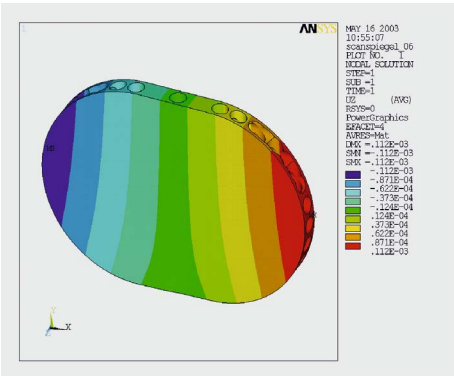


Abb. 2:
Finite-Element-Berechnung der Deformationen von Spiegel 2 unter einer Winkelbeschleunigung von 30 rad/s². Der Hauptanteil der Deformation entspricht einer Verkipfung der optisch wirksamen Fläche um 0,3 Bogensekunden. Die Abweichung von der Ebene beträgt im Mittel 5 nm.

Fig. 2:
Finite-Element-calculation showing the surface deviations of mirror 2 under an angular acceleration of 30 rad/s². The majority of the deformation is due to a surface tilt of 0.3 arc sec which has no influence on the optical performance. The remaining surface deviation amounts to 5 nm r.m.s.

Die Oberflächenbearbeitung erfolgte durch Einkorn-Diamantdrehen. Es wurde ein Flächenfehler von 43 nm r.m.s. in einem Messfleck von 60 mm Durchmesser bei einer verbleibenden Rauigkeit von 7 nm Rq erreicht (Abb. 3).

Beide Spiegel wurden in jeweils ein Scannermodul (Abb. 4) eingebaut, die über Limited-Angle-Torque-Motoren der Firma Kollmorgen angetrieben werden. Die Positionsmessung erfolgt über optische Winkelenncoder. Um Reibungseinflüsse weitgehend auszuschließen, wurde die Lagerung der Scannerwelle über Festkörpergelenke realisiert.

Beide Scannermodule wurden in den Experimentalaufbau integriert, der in das Versuchsflugzeug des Niederländischen Nationalen Laboratoriums für Luft- und Raumfahrt (NLR) eingebaut wurde (Abb. 5). Da der Horizontalspiegel außerhalb der Flugzeugkabine liegt, musste vom Projektpartner NLR eine spezielle Verkleidung realisiert werden. Weiterhin wurde durch die NLR die Flugtauglichkeit des Aufbaus zertifiziert.

Mit diesem Experimentalaufbau wurden im Juni 2004 erfolgreiche Messflüge im Raum Toulouse (F) durchgeführt (Abb. 6).

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung dieser Untersuchungen durch die Europäische Union im Rahmen des Projektes I-wake (Vertrag Nr.: G4RD-CT-2002-00778) sowie bei den Partnerinstitutionen im genannten Projekt für die gute Zusammenarbeit.

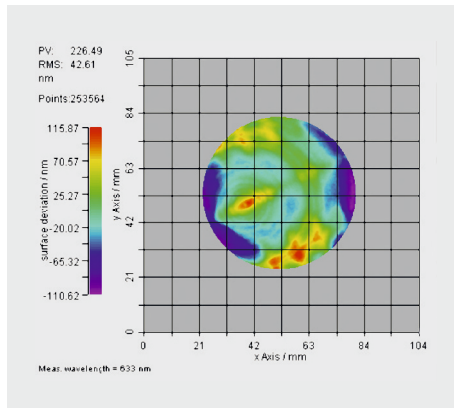


Abb. 3:
Interferometrische Messung
der Oberflächenqualität an Spiegel 1.

Fig. 3:
Interferometrical measurement of the
surface of mirror 1.

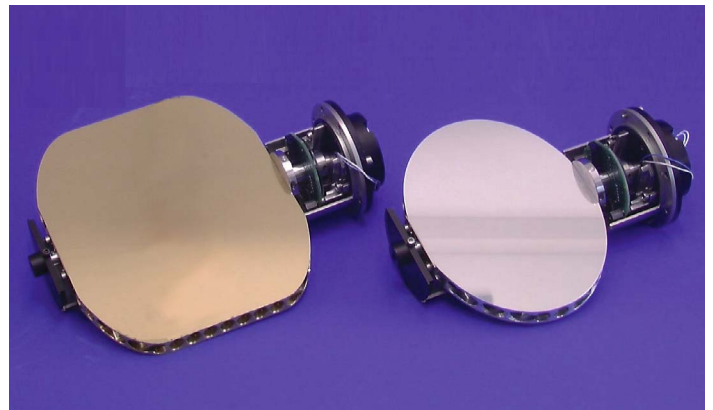


Abb. 4:
Scannermodule für den Einsatz im Flugzeug.

Fig. 4:
Scanner modules to be integrated in the demonstrator.

The mirror surfaces were produced by single-point diamond turning. A surface deviation of 43 nm r.m.s. was measured within a patch of 60 mm diameter. The remaining surface roughness amounted to 7 nm r.m.s. (see Fig. 3).

Both mirrors were integrated into scanner modules (see Fig. 4). They are driven by Limited-Angle-Torque motors made by Kollmorgen. The scanner position is monitored via optical angular encoders. To keep friction effects as small as possible, we used solid-state hinges for the scanner bearings.

Both scanner modules were integrated into a demonstrator of the sensor system which was flown on the Cessna research aircraft of the Dutch National Aerospace Laboratory (NLR). Because the horizontal scan mirror is located outside the aircraft cabin a special fairing was designed by NLR (Fig. 5). Furthermore the airworthiness of the demonstrator was certified by NLR. Using this demonstrator measurement flights were successfully performed in the Toulouse region in June 2004 (Fig. 6).

Acknowledgment

The authors would like to thank the European Commission for funding the research work of the I-WAKE project (contract number: G4RD-CT-2002-00778). Furthermore we would like to thank all partners in the project for their co-operation.



Abb. 5:
Scanner nach dem Einbau in das Forschungsflugzeug des
Niederländischen Nationalen Laboratoriums für Luft- und Raumfahrt (NLR).
Der sichtbare Laserstrahl gehört zu einem Justierlaser.

Fig. 5:
Scanner system after integration into the research aircraft of the Dutch
National Aerospace Laboratory (NLR). The visible beam is generated by an
adjustment laser.



Abb. 6:
Das Versuchsflugzeug der NLR während der Flugtests.

Fig. 6:
The NLR research aircraft during one of the measurement flights.

Kleine Stäbchen große Wirkung – Miniaturisiertes Ablensystem für Lithographieanlagen

Stefan Risse, Christoph Damm, Andreas Gebhardt, Mathias Rohde,
Christoph Schenk, Gerhard Schubert¹, Hans-Joachim Döring¹, Thomas Elster¹

¹ Leica Microsystems Lithography GmbH



Stefan Risse



Christoph Damm



Andreas Gebhardt



Mathias Rohde



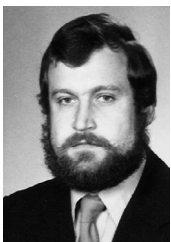
Christoph Schenk



Gerhard Schubert



Hans-Joachim Döring



Thomas Elster

Für die schnelle und exakte Ablenkung eines Elektronenstrahls werden die Elektronen häufig durch elektrostatische Felder gezielt in ihrer Flugbahn beeinflusst. Hierzu werden einzelne Ablenkelemente oder Gruppen von Elektroden mit unterschiedlichen Spannungspotentialen beschaltet. Eine Miniaturisierung der Ablensysteme ermöglicht den Einbau an einer elektronenoptisch günstigen Position innerhalb der elektronenoptischen Säule. Eine schnelle und genaue Strahlablenkung mit hoher Ablenkempfindlichkeit ist möglich!

Im Rahmen eines thüringischen Forschungsprojektes wurden am Fraunhofer IOF neue Möglichkeiten für die Gestaltung und den Aufbau elektrostatischer Ablensysteme entwickelt und ein Demonstrator aufgebaut (Abb. 1). Gemeinsam mit der Firma Leica Microsystems Lithography GmbH erfolgte diese Entwicklung für eine Elektronenstrahl-Lithographieanlage für die Wafer- und Maskenstrukturierung.

Das Design der neuen Baugruppe beruht auf einer kinematisch definierten Anordnung von dünnen Stäben (Abb. 2). Die Anordnung der Elektroden resultiert aus einer elektronenoptischen Modellrechnung mit der Finite-Elemente-Methode. Auf der Größe einer Zigarre können bis zu 36 Elektroden auf unterschiedlichen Teilkreisen und mit verschiedenen Winkellagen zueinander angeordnet und getrennt elektrisch kontaktiert werden. Die einzelnen Ablenkelemente wurden untereinander durch eine »Huckepack«-Elektronik verschaltet. Als Aufbau- und Verbindungstechnik wurde eine am Fraunhofer IOF entwickelte Diodenlaser-Löttechnologie auf Gold/Zinn-Basis eingesetzt (Abb. 3). Mit dieser Technik wurden flussmittelfreie Verbunde aufgebaut und die Forderung nach einem vakuumtaug-

lichen Design ohne Freisetzung von Kohlenwasserstoffen eingehalten. Die Langzeitstabilität der Baugruppe wird erreicht. Entscheidend für den Erfolg der Baugruppe war der Einsatz von sprödharten Werkstoffen wie Glas und Glaskeramik. Durch eine Beschichtung der Oberflächen mit Gold wurden hervorragende elektrische Eigenschaften erzielt.

Der innerhalb des Projektes aufgebaute Demonstrator wurde in einer Versuchsanlage bei Leica Microsystems Lithography getestet. Die erhöhte Ablenkempfindlichkeit und eine sehr gute Orthogonalität konnten durch Messungen nachgewiesen werden. Das erreichte Qualitätsniveau des Demonstrators beträgt bezüglich der Symmetriegenauigkeit der Elemente wenige μm . Die in der vorgestellten Baugruppe realisierte Anordnung reduziert Fehler höherer Ordnung. So werden jetzt nicht nur das drei- sondern auch das fünfzählige Feld unterdrückt (Abb. 4). Die miniaturisierte Baugruppe bildet die Grundlage für eine neue, verkleinerte elektronenoptische Säule für zukünftige Lithographiegeräte bei Leica. Bis zum Einsatz dieser Baugruppe in Lithographietools sind aber noch weitere grundlegende Untersuchungen notwendig.

Wir danken dem Land Thüringen für die freundliche Unterstützung dieses Forschungsprojektes.

Small bars, large effects – Miniaturized deflection system for lithography equipment

Stefan Risse, Christoph Damm, Andreas Gebhardt, Mathias Rohde,
Christoph Schenk, Gerhard Schubert¹, Hans-Joachim Döring¹, Thomas Elster¹

¹Leica Microsystems Lithography GmbH

For the fast and precise e-beam deflection, which is necessary for many lithography systems, electrostatic fields are used to accurately direct electrons. To achieve this, single deflection elements or groups of electrodes are set at several voltage potentials. A miniaturized version of such a deflection system facilitates its positioning at a favourable place within the electron-optical column. An efficient and accurate beam deflection with high sensitivity is consequently possible.

Within the scope of a research project funded by the government of Thuringia the Fraunhofer IOF developed new ways to design and manufacture novel electrostatic deflection systems (Fig. 1). Together with the Leica Microsystems Lithography GmbH, an e-beam lithography system for structuring wafers and masks was developed.

The design of the new device was based on a kinematically defined arrangement of thin bars (Fig. 2). The arrangement of the electrodes was calculated by the Finite Element Method. At a cigar-length distance, up to 36 individually contacted electrodes were placed on a variety of pitched circles at different angles to each other. The single deflection elements were charged by a "Huckepack" electronic system. A laser soldering technique based on a gold tin solder developed at the Fraunhofer IOF was used for the manufacture (Fig. 3). By using this technique a flux free compound was generated and the environmental requirements for vacuum compatibility and prevention of hydrocarbon contamination were met. The long term stability of the device was established. The use of brittle-rigid materials like glass or glass ceramics was crucial for success. Excellent electric properties were achieved by coating the surfaces with a gold layer.

The demonstrator manufactured was tested by Leica Microsystems Lithography GmbH. An increased sensitivity in deflection and a much smaller orthogonal error were demonstrated. The elements in the system are symmetrically accurate to within a few micrometers. The arrangement of the demonstrator's electrodes reduces higher order errors. With this design not only the third- but also the fifth-order errors are suppressed (Fig. 4).

The miniaturized device forms the basis for an even smaller electronoptical column for lithography devices to be used at Leica in the future. However, before using this device in lithography tools, further basic analysis and measurements are necessary.

We want to thank the government of Thuringia for their kind support of this project.

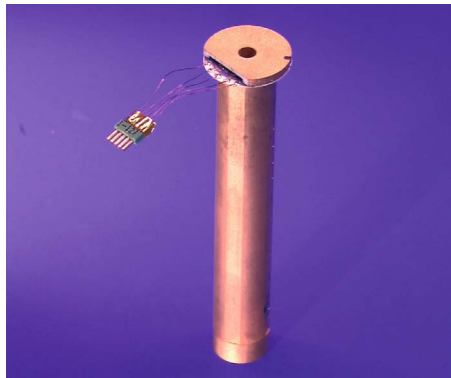


Abb. 1:
Elektrostatisches Ablenssystem.

Fig. 1:
Electrostatic deflection system.



Abb. 2:
Schnittmodell mit Stabelektroden.

Fig. 2:
Section model with bar-electrodes.

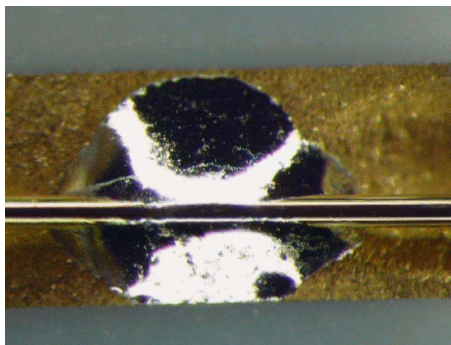


Abb. 3:
Lötstelle einer Elektrode.

Fig. 3:
Soldered point of electrode.

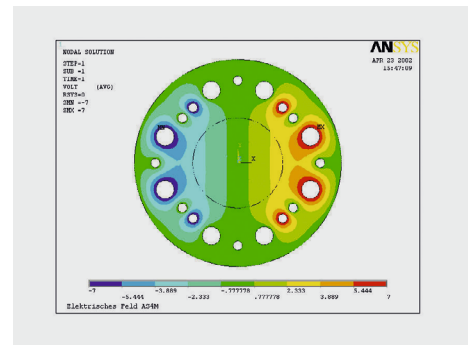


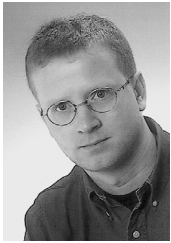
Abb. 4:
Simulation des elektrostatischen Feldes.

Fig. 4:
Calculation of electrostatic field.

Mikromontage eines Gitterspaltes für ein astronomisches Spektrometer

Erik Beckert, Gerd Harnisch, Gilbert Leibeling, Michael A. Andersen¹

¹Astrophysikalisches Institut Potsdam



Erik Beckert



Gerd Harnisch



Gilbert Leibeling



Michael A. Andersen

Für das ultrahochauflösende Echelle-Spektrometer PEPSI (Potsdam Echelle Polarimetric and Spectroscopic Instrument /1/) am neuen Large Binocular Telescope (LBT) auf Mt. Graham in Arizona wurde der Prototyp eines »Waveguide image slicer« /2/ als hybride mikrooptische Baugruppe montiert. Der Image Slicer dient als gitterförmiger Eintrittspalt des Spektrometers (Abb. 1) und erlaubt aufgrund seiner Konfiguration die spektrale Beobachtung von linear und zirkular polarisiertem Licht mit einer bisher unerreichten Auflösung von $R = 300\,000$, womit theoretisch auch der Erde ähnliche Planeten außerhalb unseres Sonnensystems detektiert werden könnten.

Um die hohe Auflösung des Spektrometers zu gewährleisten war es notwendig, die Gitterstruktur im Eintrittspalt zu minimieren. Für die lichtdurchlässigen Strukturen des Gitters kamen extrem dünne Glasplatten (Dicke $30\,\mu\text{m}$) zum Einsatz, die zugeschnitten, an der reflektierenden Endfläche metallisiert und für den Prototypen zu einem aus sieben einzelnen Platten bestehenden Stapel mit Endabmessungen von ca. $0,23\,\text{mm} \times 0,23\,\text{mm} \times 10\,\text{mm}$ miteinander verklebt wurden.

Als technologisch anspruchsvoll erwies sich neben dem Zuschnitt und der Handhabung der extrem empfindlichen Glasplatten die Einstellung eines minimalen Klebespalts zwischen den einzelnen Platten, um sowohl einen hohen Füllfaktor (Glas) mit möglichst kleinen Gitterlinien (Klebstoff) zu realisieren als auch die interne Totalreflexion in der wellenleitenden Struktur sicherzustellen. Bei der Montage der Baugruppe (Abb. 2) kam daher ein sehr genauer ($5\,\mu\text{m}$) Pick & Place-Roboter mit einem speziell an die dünnen Glasplatten angepassten,

kraftsensitiven Greifer zum Einsatz. Der dünnflüssige, UV-aushärtende und brechzahlangepasste Klebstoff wurde mit mikroskopisch kleinen Abstandhaltern durchmischt, um einen minimalen und homogenen Klebespalt zu gewährleisten. Mit Hilfe feinoptischer Bearbeitungsverfahren zur Rückverdünnung des Stapels auf die geforderten Außenabmessungen (Abb. 3) wurde ein Prototyp aufgebaut, bei dem Klebespalte zwischen den Glasplatten von $3\,\mu\text{m}$ erfolgreich nachgewiesen werden konnten (Abb. 4). Gegenwärtig erfolgen die Erprobung des Prototypen am Astrophysikalischen Institut in Potsdam und die Erarbeitung der Spezifikation für einen 12-fach Image Slicer.

Literatur:

- /1/ Strassmeier, K. et al.: „The science case of the PEPSI high-resolution echelle spectrograph and polarimeter for the LBT“, *Astronomische Nachrichten*, Vol. 325, No. 4 (2004), pp. 278–298
- /2/ Suto, H.; Takami, H.: „Waveguide image slicer“, *Applied Optics* Vol. 36, No. 19 (1997), pp. 4582–4586

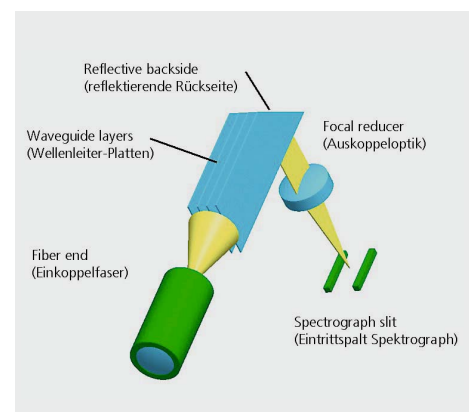


Abb. 1:
Schematischer Aufbau eines »Waveguide image slicer«.

Fig. 1:
Schematic layout of a waveguide image slicer.

Microassembly of a grating slit for astronomical spectroscopy

Erik Beckert, Gerd Harnisch, Gilbert Leibelng, Michael A. Andersen¹

¹Astrophysikalisches Institut Potsdam

For the ultra high resolution Echelle Spectrograph PEPSI (Potsdam Echelle Polarimetric and Spectroscopic Instrument /1/) at the new Large Binocular Telescope (LBT) facility on Mt. Graham in Arizona the prototype of a "waveguide image slicer" /2/ has been developed and assembled. This hybrid micro-optical device serves as an entrance grating slit of the spectrograph (Fig. 1) and, due to its configuration, allows spectral observation of circularly and linearly polarized light at a currently unmatched resolution of $R = 300,000$ to detect, for instance, earth like extra solar planets.

To realize the high resolution of the spectrograph it was necessary to minimize the grating structure of the entrance slit. For the transparent regions of the prototype grating extremely thin glass plates (thickness of $30\text{ }\mu\text{m}$) were cut to size, metallized on the reflective ends and finally bonded together by an adhesive to form a seven-plate stack with dimensions of $0.23\text{ mm} \times 0.23\text{ mm} \times 10\text{ mm}$.

Besides the technologically challenging tasks of cutting and handling the extremely sensitive glass plates the tuning of the smallest possible adhesive gaps between the plates was necessary to realize a high fill factor (glass) with small grating lines (adhesive) and to maintain total internal reflection within the waveguiding structure. For the assembly of the prototype (Fig. 2) a precise "Pick & Place" robot (accurate to $5\text{ }\mu\text{m}$) together with a force-sensitive gripper that was adapted to the thin glass plates were employed. The low viscous, UV-curing and index-matched

adhesive was mixed with microscopic spacer elements to ensure a small and homogenous adhesive gap. With the help of optical finishing technologies to thin down the stack to its final dimensions (Fig. 3) a prototype was assembled that demonstrates adhesive gaps with a thickness as low as $3\text{ }\mu\text{m}$ (Fig. 4). Currently this prototype is being evaluated at the "Astrophysikalisches Institut" in Potsdam, while a specification for a 12-plate image slicer is being developed.

References:

- /1/ Strassmeier, K. et al.: „The science case of the PEPSI high-resolution echelle spectrograph and polarimeter for the LBT“, *Astronomische Nachrichten*, Vol. 325, No. 4 (2004), pp. 278–298.
- /2/ Suto, H.; Takami, H.: „Waveguide image slicer“, *Applied Optics* Vol. 36, No. 19 (1997), pp. 4582–4586.

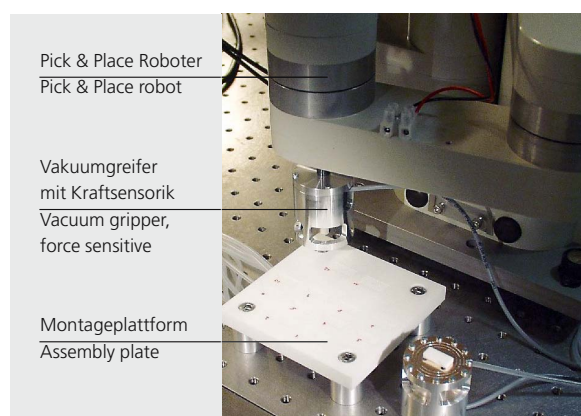


Abb. 2:
Montageumgebung.

Figure 2:
Assembly equipment.

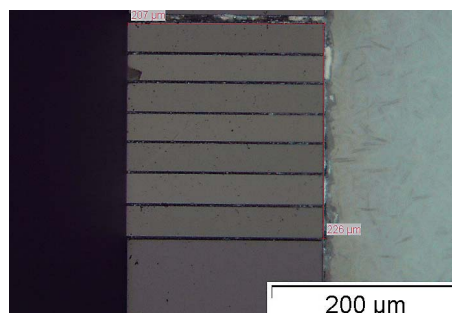


Abb. 3:
Eintrittsfenster mit Gitter.

Fig. 3:
Entrance window with grating.

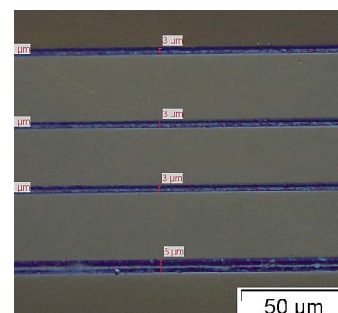


Abb. 4:
Gestapelte Glasplatten, Klebespalt
ca. $3\text{ }\mu\text{m}$.

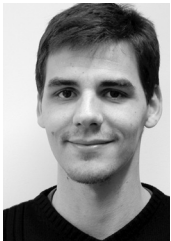
Fig. 4:
Stacked plates; adhesive gap
approx. $3\text{ }\mu\text{m}$.

Lotuseffekt, Kohlrabiblatt, Mottenauge? Nanostruktur-Design für ultrahydrophobe Oberflächen

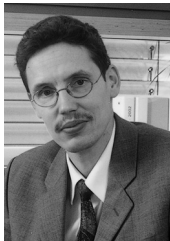
Angela Duparré, Marcel Flemming, Gunther Notni



Angela Duparré



Marcel Flemming



Gunther Notni

Die Natur als Vorbild

Seit einigen Jahren ist bekannt, dass glatte Oberflächen mit einer entsprechenden molekularen Oberflächenstruktur eine »intrinsische Hydrophobie« mit Wasserkontaktwinkeln bis max. 120° ausbilden, zum Erreichen von Ultrahydrophobie mit wesentlich höheren Kontaktwinkeln aber zusätzlich eine raue Struktur vorhanden sein muss /1/, (Abb. 1).

Die Natur liefert nun beeindruckende Beispiele, wie durch raue Strukturen eine Oberfläche ultrahydrophob und damit selbstreinigend wird. Besonders bekannt wurde dabei der so genannte Lotuseffekt: Wassertropfen perlen von Lotusblättern vollständig ab und reißen vorhandene Schmutzpartikel rückstandsfrei mit (Abb. 2). REM-Aufnahmen der Blattoberfläche zeigen die ausgeprägten Strukturanordnungen (Abb. 3).

Es liegt damit zunächst nahe, solche und ähnlich regelmäßige Anordnungen aus der Pflanzen- und auch Tierwelt (z. B. Mottenauge) zum Vorbild für eine Übertragung auf technische Oberflächen heranzuziehen /2/. Beim Blick auf die Blattoberflächen weiterer Pflanzen, wie z. B. *Brassica oleracea* var. *Gongylodes* (Kohlrabi, Abb. 4), zeigt sich jedoch, dass Ultrahydrophobie auch auf völlig anderen, unregelmäßigen Strukturen basieren kann (Abb. 5).

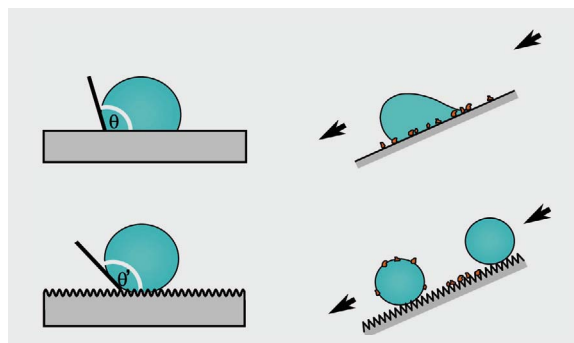


Abb. 1:
Prinzipschema Hydrophobie – Ultrahydrophobie.

Fig. 1:
Schematic picture hydrophobicity – ultra-hydrophobicity.

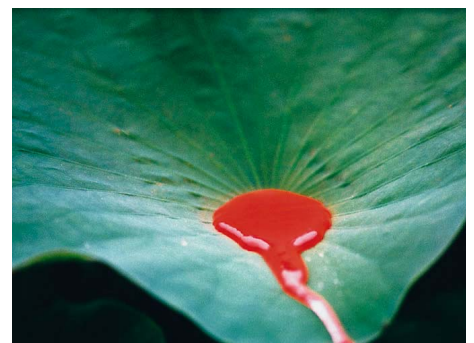


Abb. 2:
Lotusblatt. Wassertropfen auf der Blattoberfläche (www.dbu.de).

Fig. 2:
The lotus leaf. Water drops on leaf surface (www.dbu.de).

Lotus effect, kohlrabi leaf, motheye?

Nanostructure design for ultra-hydrophobic surfaces

Angela Duparré, Marcel Flemming, Gunther Notni

The example: nature

For several years smooth surfaces with appropriate molecular structures have been known to exhibit an “intrinsic hydrophobicity” with water contact angles of up to 120° , while ultra-hydrophobicity, e. g. considerably higher contact angles, can only be achieved through additional surface roughness /1/, (Fig. 1).

It is nature that provides impressive examples of how rough structures make a surface hydrophobic and hence self-cleaning. In particular, the so-called Lotus effect became popular: water drops entirely roll off the lotus leaf and drag along any dirt particles without leaving residues (Fig. 2). The REM images in Fig. 3 display the pronounced structural features.

Consequently, the search for a technological realization of ultra-hydrophobic surfaces has initially focused on similar, regular structures which are known to exist in the flora and fauna (e. g. motheye). However examination of the surfaces of other plant leaves, such as *Brassica oleracea* var. *Gongylodes* (kohlrabi, Fig. 4), reveals that ultra-hydrophobicity also occurs on completely different and irregular structures (Fig. 5).

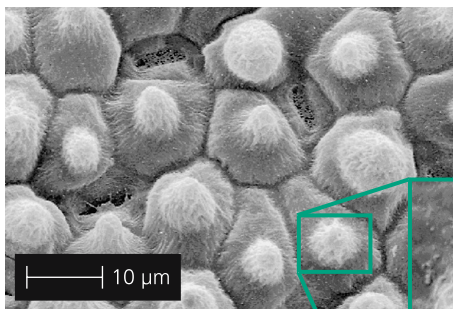


Abb. 3:
REM Aufnahmen der
Oberflächenstruktur des Lotusblatts.

Fig. 3:
REM images of the surface
structure of a Lotus leaf.

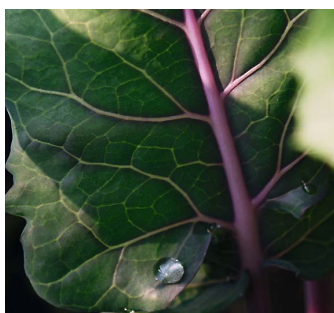
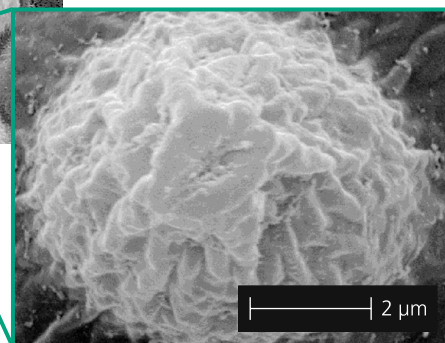


Abb. 4:
Kohlrabiblatt mit Wassertropfen.

Fig. 4:
Kohlrabi leaf with water drops.

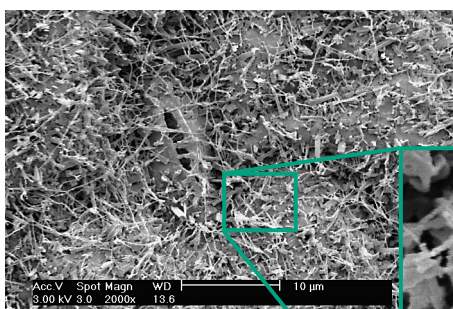
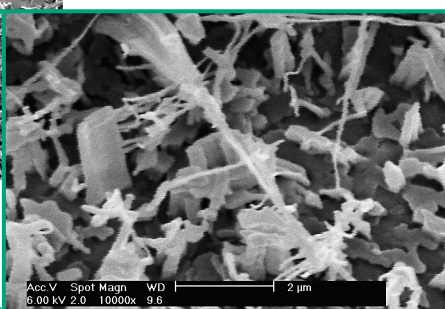


Abb. 5:
REM-Aufnahmen der
Oberflächenstruktur des Kohlrabiblatts.

Fig. 5:
REM images of the surface structure of
a kohlrabi leaf.



Designkriterien für technische Lösungen

Für effiziente technische Realisierungen stellte sich damit die Frage nach allgemeingültigen, quantitativ beschreibbaren Bedingungen an die Topografie, damit eine Oberfläche ultrahydrophob wird. Bei optischen Anwendungen kommt hinzu, dass – außer den angestrebten Benetzungseigenschaften – sichergestellt werden muss, dass infolge der Aufrauung entstehende Streulichtverluste nicht zu einer Minderung der optischen Qualität führen.

Am Fraunhofer IOF wurden deshalb Design-Algorithmen entwickelt, die auf der Basis von entsprechenden Topografiekriterien unmittelbar anwendungsbezogene Strukturparameter als Input für die technologische Umsetzung liefern /3/. Eine wesentliche Grundlage hierfür bildet die Erkenntnis /4/, dass sich über die Beschreibung der

Oberflächentopografie durch PSD-Funktionen (PSD – Power Spectral Density) Strukturparameter gewinnen lassen, die direkt mit dem Kontaktwinkel korrelieren. Neben dieser positiven Eigenschaft besitzen die PSDs außerdem den Vorteil der direkten Verknüpfung mit den optischen Verlusten durch Lichtstreuung /5/. Dadurch kann das Design für optimale Benetzung und optische Qualität in einer vereinheitlichten Prozedur erfolgen.

Die Design-Prozeduren sind nicht nur für einfache Grenzflächen, sondern gleichermaßen für Oberflächen mit Beschichtungen ausgelegt. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die für den Ultrahydrophobieffekt erforderlichen Topografien durch eine erhöhte statistische Nanorauheit der Schicht bzw. Schichtsysteme erreicht werden können. Dies eröffnet vielversprechende Möglichkeiten, die Rauheitsstrukturen mit üblichen Beschichtungsprozessen zu erzeugen und gleichzeitig durch die

Nanodimensionen die optischen Verluste kontrolliert niedrig zu halten. Ein Beispiel dafür sind gesputterte Oxidschichten für Architekturverglasungen. Dafür wurde im Designprozess ein Parameterfeld von Nanostrukturen erstellt, die den Kriterien für den Selbstreinigungseffekt bei gleichzeitig minimierten optischen Verlusten genügen und in gängigen Sputterprozessen erzeugbar sind. Die Grenze tolerierbarer optischer Verluste war hierbei durch die Applikation Architekturglas bestimmt.

Ultrahydrophobe Oberflächen mit optischer Qualität

Diese Grenze ändert sich je nach der optischen Anwendung und kann bis hin zu den hohen Anforderungen bei Präzisionsoptiken entsprechend einkalkuliert werden. Ergebnisse der zusammen mit einem industriellen Partner /6/ erzeugten Nanostrukturen von gesputterten ZrO_2 - und Al_2O_3 -Schichten auf Glassubstraten sind in den AFM-Aufnahmen der Abbildungen 6 und 7 zu sehen. Hier wird, wie bereits an den Beispielen aus der Natur gezeigt, deutlich, dass es sich um ganz unterschiedliche Strukturen handelt. Beide erzeugen aber gleichermaßen Ultrahydrophobie mit sehr hohen Kontaktwinkeln bis 174° . Sowohl in der Vorgabe durch das Design als auch aus den gemessenen PSDs der realisierten Schichten waren Strukturparameter ermittelt worden, die hohe Kontaktwinkel versprochen. Gleichzeitig lagen die optischen Streuverluste mit 0,04 % deutlich unter dem Grenzwert.

Abb. 8 zeigt kugelförmige Wassertropfen auf einem Glaswafer, der mit einer solchen rauen Al_2O_3 -Schicht sowie einer molekularen Hydrophobierungsschicht versehen wurde. Bei geringster Neigung des Wafers perlen die Tropfen vollständig ab.

Abb. 6:
Nanostruktur der
Oberfläche einer
gesputterten
 ZrO_2 -Schicht.

Fig. 6:
Surface nanostructure
of a sputtered
 ZrO_2 coating.

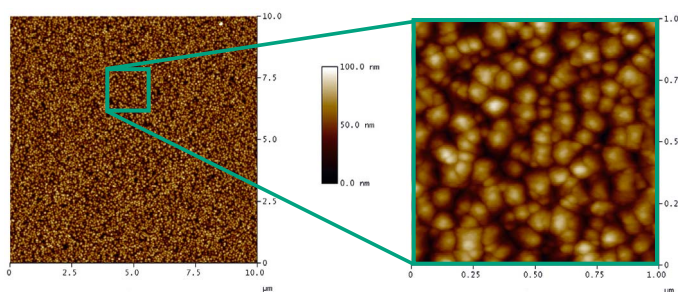
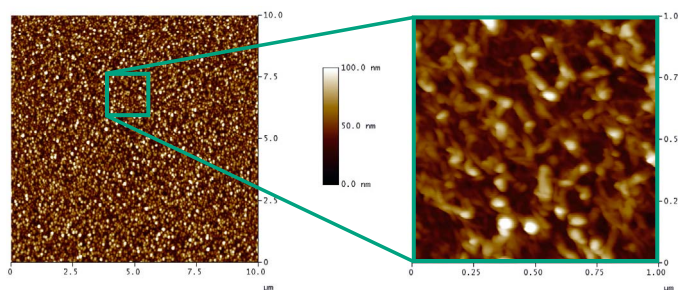


Abb. 7:
Nanostruktur der
Oberfläche einer
gesputterten
 Al_2O_3 -Schicht.

Fig. 7:
Surface nanostructure
of a sputtered
 Al_2O_3 coating.



Design criteria for technological realization

Therefore, to develop efficient technological processes, general and quantitative criteria had to be found for topographies which make a surface ultra-hydrophobic. In addition to the desired wetting properties there is another requirement in the case of optical applications: the light scattering losses induced by the enhanced surface roughness must not reduce the optical quality.

For this purpose, nanostructure-design algorithms were developed at the Fraunhofer IOF. Based on the topographic criteria mentioned above, these algorithms directly provide the application-focused structural parameters required for their technological realization /3/. The finding that describing the surface topography by PSD (Power Spectral Density) functions /4/ provides structural parameters which directly correlate with the contact angle was essential for this approach.

Another attractive property of the PSD functions is their close connection with the optical scattering losses /5/. This connection enables the design to be developed with a single procedure for both optimum wetting and optical quality. The design procedures are not only suitable for single interfaces but have also been well tailored for surfaces with multilayer coatings. So we found out that the topography needed for ultra-hydrophobicity can be achieved by enhanced nano-roughness of a thin film layer or a multilayer system.

This opens up the promising potential of generating these roughness structures by means of common coating technologies while – as a result of the nano-dimensions – keeping the optical losses at a controllably low level. Sputtered oxide coatings for architectural glass are one example.

For this application, we established a parameter set of nanostructures that meets the criteria for both the self cleaning effect and minimized optical losses and moreover can be produced by the usual sputtering processes. The tolerance limit for the optical losses in this case was determined by the architectural glass application.

Ultra-hydrophobic surfaces with optical quality

This limit varies according to the specific optical application and can be properly adjusted even for the high demands of precision optics. Results of the nanostructures of ZrO_2 and Al_2O_3 coatings on glass, which were obtained in

cooperation with an industrial partner /6/, are presented in the AFM images shown in figures 6 and 7. As was already demonstrated by the examples from nature, here again the significantly different types of structures are obvious. However, both generate ultra-hydrophobicity with high contact angles of up to 174° . This validated the fact that the design as well as the measured PSDs of the realized coatings had yielded structural parameters which predicted high contact angles. Moreover, the optical scatter losses of 0.04 % remained clearly beneath the scatter limit value.

Fig. 8 displays spherical water drops on a glass wafer coated with a rough Al_2O_3 layer plus a molecular hydrophobic top layer. If the wafer is just slightly tilted, the drops roll off instantly.

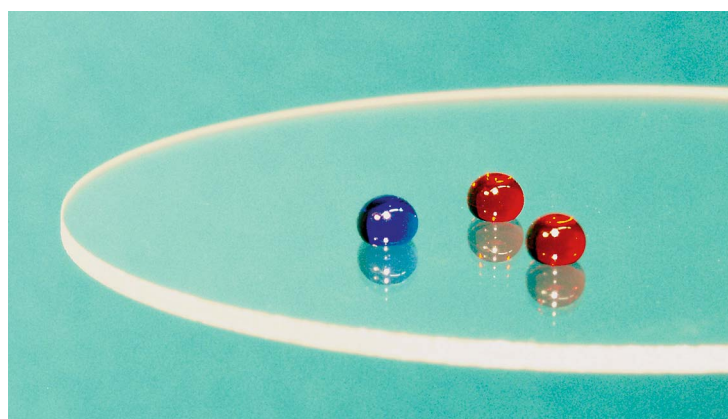


Abb. 8:
Ultrahydrophobie-Effekt auf beschichtetem Glaswafer.

Fig. 8:
Ultrahydrophobicity of the coated glass wafer.

Die Erzeugung der notwendigen Strukturen durch raue optische Schichten ermöglicht auch deren vorteilhafte Integration direkt in die Schichtenfolge für die jeweilige optische Funktion (AR-Beschichtung, Spiegelsysteme, etc.). Zudem lässt sich durch Einbringung einer zusätzlichen Speicherschicht für die hydrophobisierende Substanz erreichen, dass sich durch ständiges Nachdiffundieren die abriebgefährdete Oberflächenchemie selbst regeneriert /5/. Die PSD-Funktionen in Abb. 9, die aus der Topografiemessung der Oberflächen des Lotus- und Kohlrabi-blattes und der Al_2O_3 -Schicht bestimmt wurden, demonstrieren noch einmal den Spielraum von Lösungswegen in Natur und Technik für die Realisierung geeigneter Rauheitsstrukturen: Lotus und Kohlrabi bilden die für den Selbstreinigungseffekt relevanten Strukturkomponenten trotz ganz andersartiger Geometrien etwa im gleichen Ortsfrequenzbereich aus (Ortsfrequenz = inverse Ortswellenlänge = laterale Dimension des Strukturanteils). Für die Nanostrukturen der Al_2O_3 -Schicht dagegen liegt der relevante Bereich bei wesentlich höheren Ortsfrequenzen und damit außerhalb des streulichtwirksamen Gebietes. (Die für den Selbstreinigungseffekt jeweils relevanten Bereiche, im Bild gestrichelt, lassen sich aus den oben erwähnten Strukturparametern ermitteln.)

Neben der Realisierung von Nanostrukturen durch Beschichtung sind grundsätzlich alle Verfahren geeignet, die Oberflächen-Nanostrukturen generieren können. Ein Beispiel für eine Umsetzung einer Vorlage aus der Tierwelt, dem Mottenaugen, in die technische Nanowelt durch Plasmaätzen in PMMA-Substrate findet sich im Beitrag auf den Seiten 58–63 in diesem Jahresbericht. Weitere Technologien sind u. a. die Elektronenstrahlolithografie, verschiedene chemische Ätzprozesse, Poliertechniken, Prägetechniken etc.

Welche Technik für welche Anwendung am effizientesten ist, richtet sich nach den strukturellen Zielparametern und deren erlaubtem Spielraum, die im Designprozess ermittelt werden.

Fazit und Ausblick

- Der Effekt der Ultrahydrophobie kann durch eine Variationsbreite völlig unterschiedlicher Oberflächenstrukturen (Geometrie, Größe, Verteilung etc.) erzeugt werden.
- Spezielle regelmäßige Strukturen und einheitliche Strukturgrößen sind keine notwendige Bedingung.
- Stochastische Oberflächenrauheiten eignen sich ebenso wie geordnete Strukturen.
- Daraus folgt eine attraktive Vielfalt technologischer Realisierungsmöglichkeiten.
- Der Designprozess liefert die für den jeweiligen Anwendungszweck optimalen Strukturparameter und deren Toleranzbereich. Auf dieser

Basis lassen sich die geeignetsten Technologien auswählen und deren Zielparameter definieren und kontrollieren (Abb. 10).

- Die hier für Ultrahydrophobie beschriebene Methodik des funktionsbezogenen Designs von Nanostrukturen kann problemangepasst auf vielfältige andere Oberflächenfunktionen, wie z. B. Reibung, Verschleiß und Haftung, angewendet werden.

Literatur:

- /1/ Wolfram, E.; Faust, R.: „Wetting, Spreading and Adhesion“, Padday, J. F., ed. (Academic, London, 1978) 213.
- /2/ <http://www.botanik.uni-bonn.de/system/lotus/de/>
- /3/ Flemming, M.; Hultaker, A.; Reihs, K.; Duparré, A.: „Modelling and characterizing thin nanostructures for ultrahydrophobic surfaces with controlled optical scatter“, Proc. SPIE 5250 (2003) 56–63.
- /4/ Duparré, A.; Flemming, M.; Steinert, J.; Reihs, K.: „Optical coatings with enhanced roughness for ultrahydrophobic, low-scatter applications“, Appl. Optics 41 (2002) 3294–3298.
- /5/ Reihs, K.; Duparré, A.: „Optische Schichten mit ultrahydrophoben und streuarmlen Eigenschaften“, Photonik 4 (2002) 36–37.
- /6/ SuNyx GmbH, Köln, K. Reihs.

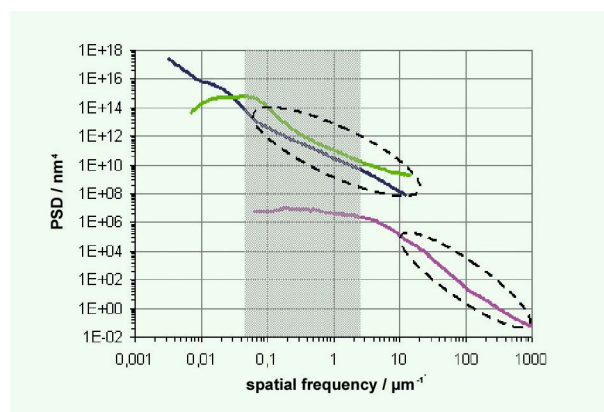


Abb. 9:
Quantitative Beschreibung der funktionsrelevanten Strukturanteile bei Lotusblatt (grün), Kohlrabi-Blatt (blau) und Al_2O_3 -Schicht (pink).

Fig. 9:
Quantitative description of the functionally relevant structure components of lotus leaf (green), kohlrabi leaf (blue) and Al_2O_3 layer (pink).

Furthermore, generation of the required structures through the use of rough optical layers enables the advantageous integration of such layers directly into the layer sequence for any desired optical function (e. g. AR coating, multilayer mirrors). Moreover, through an additional introduction of a storage layer containing the hydrophobic substance, self-regeneration of the otherwise degrading surface chemistry is achieved due to a continuous diffusion process /5/. The PSD functions in figure 9, resulting from topographical measurements of the surfaces of lotus and kohlrabi leaves and of the Al_2O_3 layer, once again illustrate the attractive leeway permissible in the realization of suitable roughness structures in nature and technology. Despite their totally different geometries, lotus and kohlrabi both exhibit the structural components relevant for the self cleaning effect within approximately the same spatial frequency range (spatial frequency = inverse spatial wavelength = lateral dimension of structure component). In contrast, the functional relevant roughness components of the Al_2O_3 film nanostructure largely occur at higher spatial frequencies and hence, out of the scatter-relevant region. (The regions relevant for the self cleaning effect, dashed areas in the figure, can be determined from the structural parameters.)

Besides the realization of nanostructures by coating processes, all technologies that generate surface nanostructures are suitable in principle. A transformation of an example from fauna, the motheye, into the technical nano-world using plasma etching is described in the article on page 58–63

of this annual report. Other technologies include electron beam lithography, chemical etching processes, polishing techniques and embossing techniques. The optimal process for a particular application depends on the target structure parameters and their acceptable variation range as these are determined by the design process.

Conclusions

- The ultrahydrophobicity effect can be achieved by a variety of entirely different surface structures (geometry, size, distribution etc.).
- Neither specific regular structures nor uniform structure sizes are necessary.
- Stochastic surface roughness is as suitable as ordered structures.
- This opens up an attractive variety of possibilities for technological realization.
- For each particular application, the design process provides the optimum structure parameters and their range of tolerance. On this basis, the most appropriate technologies can be selected and their target parameters can be defined and controlled (Fig. 10).
- The method for a function-focused design of nanostructures as described in this article can also be tailored to various other surface functions such as friction, wear and adhesion.

References:

- /1/ Wolfram, E.; Faust, R.: „Wetting, Spreading and Adhesion“, Padday, J. F., ed. (Academic, London, 1978) 213.
- /2/ <http://www.botanik.uni-bonn.de/system/lotus/de/>
- /3/ Flemming, M.; Hultaker, A.; Reihs, K.; Duparré, A.: „Modelling and characterizing thin nanostructures for ultrahydrophobic surfaces with controlled optical scatter“, Proc. SPIE 5250 (2003) 56–63.
- /4/ Duparré, A.; Flemming, M.; Steinert, J.; Reihs, K.: „Optical coatings with enhanced roughness for ultrahydrophobic, low-scatter applications“, Appl. Optics 41 (2002) 3294–3298.
- /5/ Reihs, K.; Duparré, A.: „Optische Schichten mit ultrahydrophoben und streuarmer Eigenschaften“, Photonik 4 (2002) 36–37.
- /6/ SuNyx GmbH, Köln, K. Reihs.

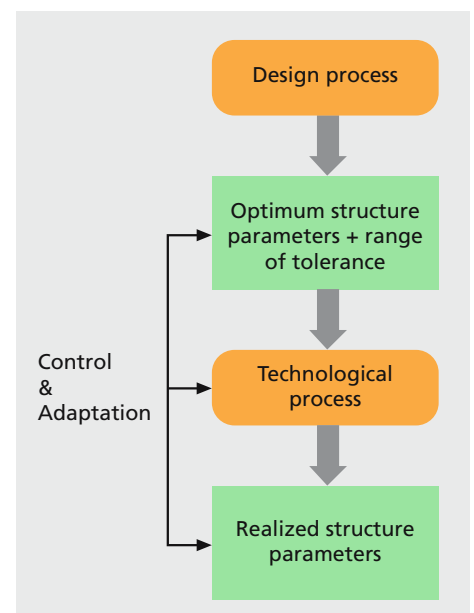


Abb. 10:
Vom Design zur technischen Realisierung.

Fig. 10:
From the design to the technological realization.

»NANO-motheye« Antireflexstrukturen für Acryl-Polymere

Ulrike Schulz, Antje Kaless, Peter Munzert, Norbert Kaiser



Ulrike Schulz



Antje Kaless



Peter Munzert



Norbert Kaiser

Einleitung

Transparente Kunststoffe nehmen einen wachsenden Stellenwert in der Optik und Optoelektronik ein und verdrängen dabei traditionelle Bauteile aus Glas. Vorteilhaft sind vor allem das geringe Gewicht, die hohe Bruchfestigkeit und die Möglichkeiten zur Formgebung der Thermoplaste (Abb. 1). Hochtransparentes Acrylglas Polymethylmethacrylat (PMMA) wird traditionell seit vielen Jahren verwendet und ist bis heute das wichtigste Polymermaterial für die Präzisionsoptik.

Die immer häufiger geforderte optische Funktionalisierung, hauptsächlich die Entspiegelung, wird traditionell durch das Aufbringen dünner Schichten erzielt. Eine Alternative bietet das Einbringen geeigneter Mikrostrukturen. Oberflächen mit einem effektiven Brechungsindex, der von der Substratseite zum umgebenden Medium (Luft) hin abnimmt, können durch stochastische oder periodische Oberflächenstrukturen erzielt werden. Periodische Subwellenlängen-Oberflächenstrukturen mit Antireflexeigenschaften wurden zuerst in der Natur auf den Augen nachtaktiver Motten entdeckt und werden in Anlehnung daran mit »Mottenaugenstruktur« bezeichnet /1/. Die ersten künstlichen Strukturen, die nach diesem Prinzip funktionieren, wurden nach Überlagerung kohärenter Laserstrahlen und der Aufnahme des Interferenzmusters in Photoresist erhalten /2/. Heute werden Masterstrukturen auf einer Fläche von bis zu

einem Quadratmeter lithographisch erzeugt, jedoch erfordert dieser Prozess einen hohen technologischen Aufwand /3/. Eine neue Methode zur Herstellung von Antireflexstrukturen stellt das vom Fraunhofer IOF Jena zum Patent angemeldete Plasmaverfahren dar /4/.

Erzeugung der »NANO-motheye«-Struktur

Niederdruck-Plasmabehandlungen sind weit verbreitet, um Polymeroberflächen vor dem Beschichtungsprozess zu aktivieren oder zu reinigen. Bei den dabei auf Polymeren stattfindenden Ätzprozessen wurde außerdem vielfach eine Änderung der Oberflächentopografie beobachtet /5/. Im speziellen Fall von Acryloberflächen führt nun eine Kombination des physikalischen Ionen-Ätzens und chemischer Abbaureaktionen zu der so genannten »NANO-motheye«-Antireflexstruktur.

Praktisch kann dafür eine Ionenquelle APS (Leybold-Optics) verwendet werden, die für die Herstellung optischer Interferenzschichten mittels ionengestütztem Aufdampfen vorgesehen ist (Abb. 2). Die Kombination von Argon und Sauerstoff im Plasma führt bei einer Behandlungszeit von mehreren hundert Sekunden auf der PMMA-Oberfläche zu ausgezeichneten Antireflexeigenschaften. Entscheidend für die sich einstellende Strukturgröße sind Ionenenergie, Ätzdauer sowie die Gaszusammensetzung.

"NANO-motheye" antireflection structures on acrylic polymers

Ulrike Schulz, Antje Kaless, Peter Munzert, Norbert Kaiser

Introduction

Highly transparent thermoplastic polymers hold an important position as materials for optics and optoelectronics nowadays, and glass is gradually being replaced with plastics. The advantages of plastics are significant weight reduction, high impact strength and moulding options (Fig. 1). Among plastics, polymethylmethacrylate (PMMA) is one of the most convenient and frequently used polymers in precision optics. Many components for optics and optoelectronics require high transmission.

Therefore there is an increasing need for antireflection coatings on plastics which are obtained traditionally by applying interference layers. Another possibility is the use of appropriate layers with decreasing effective index from substrate site to air. Such layers can be performed by porous sol-gel coatings or by stochastic and periodic surface structures. Periodic sub-wavelength surface structures with antireflection properties were first discovered in nature on the cornea of night-flying moths and because of that they are called "motheye structure" /1/. The first artificial motheys have been produced by the recording, in photoresist, of interference patterns at the intersection of two coherent laser beams /2/. Today, master structures on a surface area of about 1 m² can be produced in a complex holographic optical process /3/. This paper presents a new method to produce antireflective surface structures by applying an ion etching procedure onto PMMA /4/.

Generation of the "NANO-motheye"-structure

Low pressure plasma treatment is a convenient way to activate and clean polymer surfaces before coating. Additionally, several ion bombardment processes on polymers are known that initiate etching processes and change the surface topography /5/. Our investigations show that the application of special ion bombardment conditions leads to stochastic antireflective structures on acrylic surfaces, so-called "NANO-motheys". The Advanced Plasma Source (APS) of a Leybold box-coater APS904, which is intended for the production of optical interference layers by means of ion-assisted evaporation was used to perform the etching step (Fig. 2). The ion energy, the treatment time and the gas composition determine essentially the modification of topography as well as the optical properties. The combination of argon and oxygen in the plasma for a treatment time of several hundred seconds leads to excellent antireflective properties on PMMA surfaces.

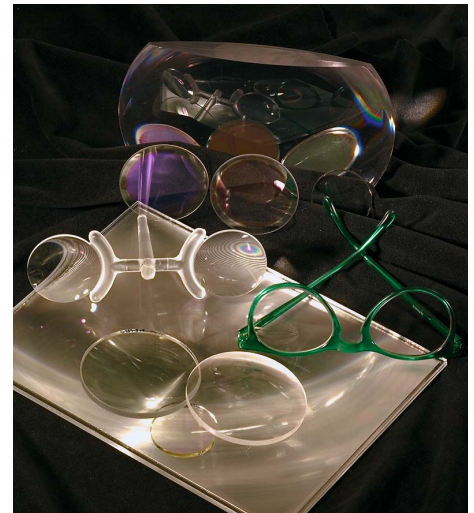


Abb. 1:
Kunststoffoptiken.

Fig. 1:
Optical components
made from plastics.



Abb. 2:
Plasma der Ionenquelle APS.

Fig. 2:
Plasma emission of Advanced
Ion Source (APS).

Abb. 3:
AFM-Aufnahmen ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$) von PMMA-Oberflächen in verschiedenen Stadien der Plasmabehandlung.

Fig. 3:
Atomic force microscopic images ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$) of PMMA at different states of plasma treatment.

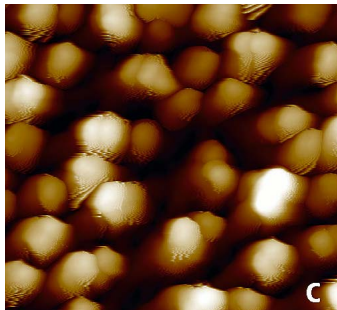
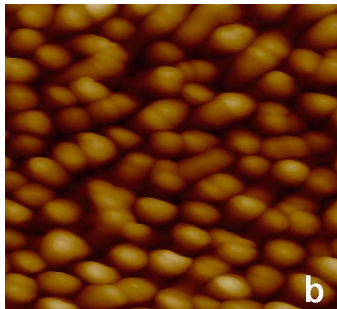
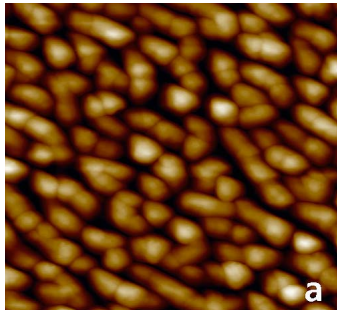


Abb. 3a: Höhenskala: 70 nm;
Zustand während des Ätzens.

Abb. 3b: Höhenskala: 300 nm;
optimale Topografie für die
Entspiegelung im sichtbaren
Spektralbereich.

Abb. 3c: Höhenskala: 400 nm;
Entspiegelung im NIR-Spektralbereich.

Fig. 3a: z-range: 70 nm;
intermediate state of etching.

Fig. 3b: z-range: 300 nm;
optimal topography for antireflection
of visible spectral range.

Fig. 3c: z-range: 400 nm;
antireflection of NIR spectral range.

Aus einer zunächst sehr feinkörnigen Struktur bilden sich mit fortschreiten der Ätzzeit größere Agglomerate, die unter optimalen Bedingungen eine sehr einheitliche Größe aufweisen und zufällig (stochastisch) verteilt sind (Abb. 3). Entscheidend für die sehr gute Entspiegelungswirkung ohne Streuverluste ist das Verhältnis von Durchmesser und Höhe der einzelnen Erhebungen, welches mindestens 1 : 2 betragen sollte (Abb. 4).

Optische Eigenschaften

Eine beidseitig behandelte PMMA-Scheibe erreicht eine mittlere Restreflexion von $\approx 1\%$ über einen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1 000 nm. Im sichtbaren spektralen Bereich von 420 nm bis 670 nm kann die Reflexion sogar auf Werte kleiner als 0,4 % verringert werden. Aufgrund der sehr geringen Streuverluste kann die Transmission eines beidseitig behandelten Bauteils in diesem Spektralbereich Werte zwischen 98 % und 99 % erreichen.

Abb. 5 zeigt die Winkelabhängigkeit der Transmission für eine beidseitig behandelte PMMA-Probe. Für schrägen Lichteinfall ist die Antireflexstruktur im Vergleich zu Interferenzschichten weniger empfindlich. Auch bei schrägem Lichteinfall bis 60° wird eine entspiegelnde Wirkung erreicht. Vorteilhaft gegenüber periodisch angeordneten Antireflexstrukturen ist dabei vor allem die Farbneutralität der stochastischen Struktur.

Verbesserte Eigenschaften durch zusätzliche Schichten

PMMA-Proben mit »NANO-mothee«-Strukturen zeigen gleichbleibende Eigenschaften auch nach verschiedenen Klimatests im Temperaturbereich zwischen -25°C und 70°C sowie bei hoher Luftfeuchte. Wie andere Antireflexstrukturen sind sie aber empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen. Eine Erhöhung der Oberflächenhärte wird durch eine an die Plasmabehandlung anschließende Beschichtung mit SiO_2 erreicht. Bis zu einer Schichtdicke von 80 nm ist damit sogar eine weitere Verbesserung der optischen Eigenschaften verbunden (Abb. 6).

From a first very fine-grained structure, larger agglomerates are formed with increasing treatment time. These features are almost uniform in size and are stochastically distributed over the surface (Fig. 3). The aspect ratio of diameter and height of the individual features, which should be at least 1:2, is crucial for the antireflection effect without scattering losses (Fig. 4).

Optical properties

By applying the plasma treatment to both sides of a PMMA sheet, the average reflection can be decreased to less than 1 % in a wavelength range from 400 nm to 1000 nm and to less than 0.4 % in the visible spectral range of 420 nm to 670 nm. Due to the low scattering losses, the transmission can reach values between 98 % and 99 % at the same time.

Figure 5 shows the angular dependence of the transmission of a double-sided, plasma-treated PMMA sample. The performance of the antireflective structure is much less sensitive to the

angle of light incidence than interference coatings. An antireflective effect has been obtained even at very high angles of light incidence. The stochastic "NANO-motheye" structure remains colourless at oblique light incidence. This behaviour is beneficial compared to periodic antireflection structures.

Improved properties by additional coatings

PMMA samples with "NANO-motheyes" demonstrate constant properties after temperature and moisture resistance tests between – 25 °C und 70 °C as well as at high humidity. As with other antireflection structures "NANO-motheyes" are sensitive to mechanical stress. Samples with increased surface hardness could be obtained by evaporating a SiO₂ layer after the plasma treatment. In addition, layers with a thickness of up to 80 nm improved the optical performance of the etched surface (Fig. 6).

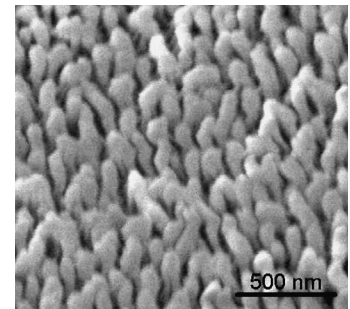


Abb. 4:
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer in PMMA geätzten »NANO-motheye«-Struktur.

Fig. 4:
Scanning electron micrograph of a "NANO-motheye"-structure on PMMA.

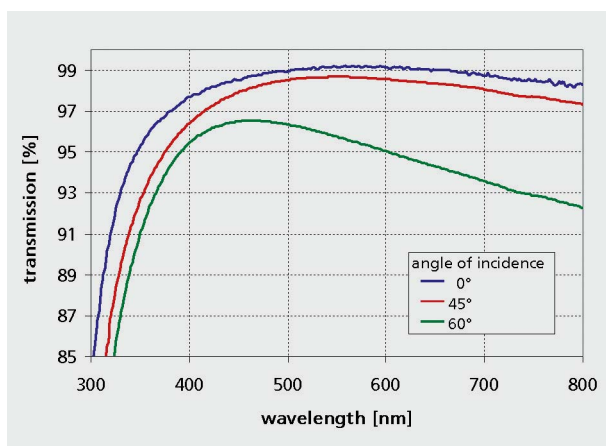


Abb. 5:
Transmission von PMMA (beidseitig plasmabehandelt) bei verschiedenen Lichteinfallswinkeln.

Fig. 5:
Transmission of a PMMA sample (plasma-treated on both sides) at different angles of light incidence.

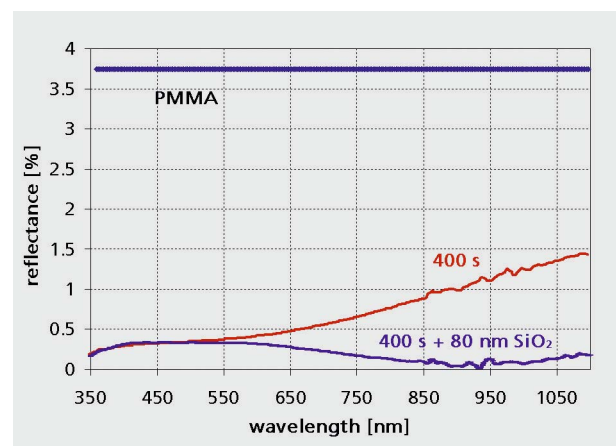


Abb. 6:
Reflexion von PMMA-Oberflächen mit »NANO-motheye«-Struktur mit und ohne zusätzliche SiO₂-Schutzschicht.

Fig. 6:
Reflection of PMMA surfaces with "NANO-motheye"-structure before and after over-coating with SiO₂ protective layer.

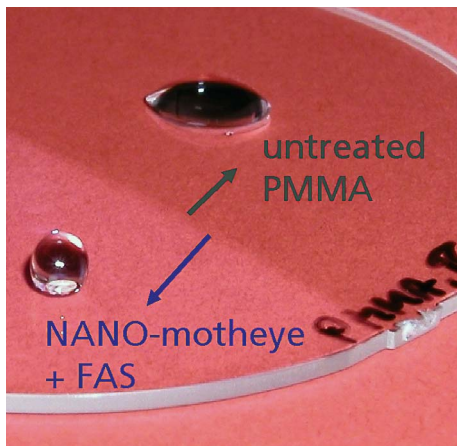


Abb. 7:
Wassertropfen auf einer fluormodifizierten
»NANO-motheye«-Struktur (links) und auf einer
unbehandelten PMMA-Probe (rechts).

Fig. 7:
Image of a water droplet on a fluorine modified
"NANO-motheye" (left) in comparison to the
wetting behaviour of untreated PMMA
(right).

Eine weitere interessante Modifizierung der Oberflächeneigenschaften wird durch Vakuumbeschichtung der ursprünglich hydrophilen »NANO-motheye«-Strukturen mit einer organischen Fluorverbindung erreicht. Wie auch bei vielen anderen Mikrostrukturen wirkt nun der so genannte Lotuseffekt, der durch einen Wasserkontaktwinkel von mehr als 150° gekennzeichnet ist /6/. Die »NANO-motheye«-Oberfläche zeigt den erwarteten Effekt der Superhydrophobie, ohne dass die entspiegelnde Wirkung beeinträchtigt wird (Abb. 7).

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem hier vorgestellten Ionen-Ätzprozess steht ein neuartiges Verfahren zur Erzeugung von Antireflexstrukturen auf Kunststoffen zur Verfügung. Vorteilhaft ist besonders die unabhängig von der Oberflächengeometrie erreichbare hohe Transmission, die das Verfahren interessant für die direkte Entspiegelung kompliziert geformter Optiken macht.

Im Mittelpunkt der Anwendungen steht aber, wie bei anderen AR-Strukturen auch, die kostengünstige Abformung und Vervielfältigung durch Heißprägen. Eine gemeinsame Patentanmeldung des Fraunhofer IOF mit der Firma Fresnel-Optics Apolda ist dafür die Grundlage /7/. Erste Experimente zum Prägen der Struktur wurden bereits erfolgreich durchgeführt (Abb. 8). Gegenstand weiterer Untersuchungen sind außerdem verschiedene metallische Übersichtungen der »NANO-motheye«-Struktur, mit denen zum Beispiel schwarze Oberflächen erzeugt werden können (Abb. 9).

Literatur:

- /1/ Bernhard, C. G.: „Strukturelle und funktionelle Adaptation in einem visuellen System“, *Endeavour* 26 (1967) 79–84.
- /2/ Wilson, S. J.; Hutley, M. C.: „The optical properties of "moth eye" antireflection surfaces“, *Optica Acta* 29 (1982) 993–1009.
- /3/ Gombert, A.; Glaubitt, W.; Rose, K.; Dreibholz, J.; Bläsi, B.; Heinzel, A.; Sporn, D.; Döll, W.; Wittwer, V.: „Subwavelength-structured antireflective surfaces on glass“, *Thin Solid Films* 351 (1999) 73–78.
- /4/ Munzert, P.; Uhlig, H.; Scheler, M.; Schulz, U.; Kaiser, N.: „Verfahren zur Reduzierung der Grenzflächenreflexion von Kunststoffsubstraten“, Offenlegungsschrift zur Deutschen Patentanmeldung DE 10241708 A1 (2002).
- /5/ Skurat, V.; Dorofeev, Y. L.: „The transformations of organic polymers during the illumination by 147.0 and 123.6 nm light“, *Angew. Makromol. Chem.* 216 (2003) 205–234.
- /6/ Nakajima, A.; Abe, K.; Hashimoto, K.; Watanabe, T.: „Preparation of hard super-hydrophobic films with visible light transmission“, *Thin Solid Films* 376 (2000) 140–143.
- /7/ Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.; Hofmann, W.; Bitzer, M.; Gebhardt, M.: „Verfahren und Werkzeug zur Herstellung transparenter optischer Elemente aus polymeren Werkstoffen“, Internationale Patentanmeldung PCT/DE20047000817 (2003).

Another interesting modification of the surface properties has been obtained by coating the originally hydrophilic "NANO-motheye"-structure with an organic fluorine compound. In combination with microstructures, such coatings are common for the achievement of the so-called Lotus effect that is characterized by a contact angle to water higher than 150° /6/. Following such treatment, the "NANO-motheye" surface shows the super-hydrophobicity estimated while retaining its excellent antireflective properties (Fig. 7).

Conclusions and outlook

A new procedure for the production of antireflection structures for plastics using the ion etching process is presented here. A special advantage of the "NANO-motheye" is the attainable high transmission which is independent from surface geometry. This makes the procedure interesting for complex curved or microstructured components, however the main application is cost-effective moulding and replication, for example by hot embossing. A patent application from the Fraunhofer IOF together with the company Fresnel-Optics GmbH Apolda is the foundation of it /7/. Initial experiments for embossing the structure have already been successfully accomplished (Fig. 8). Another topic for further research is the deposition of different metallic layers on top of the "NANO-motheye" structure to achieve "absorber" components, e. g. black surfaces as shown in figure 9.

References

- /1/ Bernhard, C. G.: „Strukturelle und funktionelle Adaptation in einem visuellen System“, *Endeavour* 26 (1967) 79–84.
- /2/ Wilson, S. J.; Hutley, M. C.: „The optical properties of "moth eye" antireflection surfaces“, *Optica Acta* 29 (1982) 993–1009.
- /3/ Gombert, A.; Glaubitt, W.; Rose, K.; Dreibholz, J.; Bläsi, B.; Heinzel, A.; Sporn, D.; Döll, W.; Wittwer, V.: „Subwavelength-structured antireflective surfaces on glass“, *Thin Solid Films* 351 (1999) 73–78.
- /4/ Munzert, P.; Uhlig, H.; Scheler, M.; Schulz, U.; Kaiser, N.: „Verfahren zur Reduzierung der Grenzflächenreflexion von Kunststoffsubstraten“, *Offenlegungsschrift zur Deutschen Patentanmeldung DE 10241708 A1* (2002).
- /5/ Skurat, V.; Dorofeev, Y. L.: „The transformations of organic polymers during the illumination by 147.0 and 123.6 nm light“, *Angew. Makromol. Chem.* 216 (2003) 205–234.
- /6/ Nakajima, A.; Abe, K.; Hashimoto, K.; Watanabe, T.: „Preparation of hard super-hydrophobic films with visible light transmission“, *Thin Solid Films* 376 (2000) 140–143.
- /7/ Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.; Hofmann, W.; Bitzer, M.; Gebhardt, M.: „Verfahren und Werkzeug zur Herstellung transparenter optischer Elemente aus polymeren Werkstoffen“, *Internationale Patentanmeldung PCT/DE20047000817* (2003).

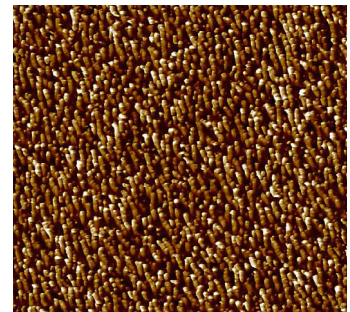


Abb. 8:
AFM-Aufnahme einer geprägten »NANO-motheye«-Struktur (10 μm x 10 μm x 400 nm).

Fig. 8:
Atomic force microscopic image of an embossed "NANO-motheye" structure (10 μm x 10 μm x 400 nm).

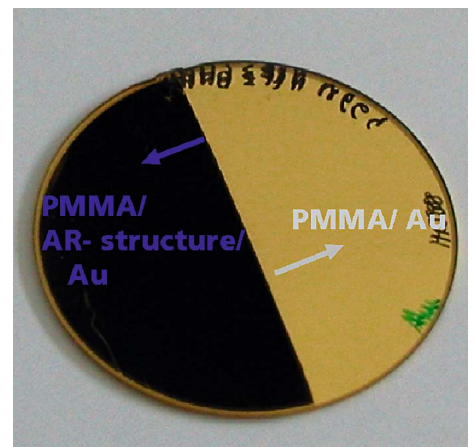


Abb. 9:
Rückseite einer aufgesputterten Goldschicht auf »NANO-motheye«-Struktur (links) und ohne »NANO-motheye«-Struktur (rechts).

Fig. 9:
Back side of a sputtered gold layer on "NANO-motheye" structure (left) and without "NANO-motheye" structure (right).

Präzise kontrollierte Schichten und Oberflächenstrukturen

Steffen Wilbrandt, Norbert Kaiser



Steffen Wilbrandt



Norbert Kaiser

In industriellen Beschichtungsanlagen für die Feinoptik erfolgt die Prozesskontrolle und -überwachung häufig durch Schwingquarze oder durch optische Messungen bei einer (einstellbaren) Wellenlänge /1/. Die dabei erreichbare Genauigkeit der optischen Dicke kann durch neue Methoden wie most-sensitiv-wavelength-monitoring zwar gesteigert werden, aber Abweichungen in den optischen Konstanten können nur für einzelne Wellenlängen kompensiert werden. Da die optischen Methoden für die Prozesskontrolle besser geeignet sind als Schwingquarzmessungen /2/, wurde ein Breitband-Monitoring-System für die in-situ Messung der optischen Performance entwickelt. Sein modularer Aufbau erlaubt sowohl Messungen am Testglas als auch am bewegten Substrat (Abb. 1) in einem frei wählbaren Spektralbereich (typisch 400 nm–900 nm), der nur durch die verwendeten optischen Komponenten begrenzt wird. Die flexible zeitliche Steuerung der Messungen durch eine selbst entwickelte, mikrokontrollergesteuerte Elektronik und die hohe Quanteneffizienz des eingesetzten Detektors (> 90 %) lassen sehr kurze Integrationszeiten zu.

Beim Einsatz des Systems in der Beschichtungsanlage Leybold Syrus Pro 1100 (Abb. 2) kann der Strahlengang des Prozessfotometers OMS4000 für die zusätzlichen Transmissions- oder Reflexionsmessungen am Testglas in einem breiten Spektralbereich genutzt werden. Mit bis zu 10 Messungen

pro Sekunde ist diese Konfiguration insbesondere für die Überwachung sehr dynamischer Prozesse (z. B. Oberflächenbehandlung von Kunststoffen durch Plasmaätzen /3/, Wachstum von Metallinselfilmen) geeignet. In vielen Fällen ist eine so hohe Zeitauflösung nicht erforderlich (z. B. Rugatefilter), so dass die Transmissionsmessung direkt an den Proben auf der rotierenden Kalotte (mehrere Proben unabhängig) durchgeführt werden kann. Die dafür entwickelte Optik wurde für eine möglichst geringe Störempfindlichkeit des Messsignals gegenüber Verkippung und Verschiebung der Probe optimiert und schirmt außerdem den Detektor vollständig von Fremdlichtquellen (Elektronenstrahlverdampfer, Plasma) ab.

Literatur:

- /1/ Sullivan, B.T.; Dobrowolski, J.A.: „Deposition error compensation for optical multilayer coatings: I. Theoretical description“, Appl. Opt. 31 (1992) 3821–3835.
- /2/ Mcleod, A.: „Monitoring of optical coatings“, Appl. Opt. 20 (1981) 82–89.
- /3/ Munzert, P.; Uhlig, H.; Scheler, M.; Schulz, U.; Kaiser, N.: „Verfahren zur Reduzierung der Grenzflächenreflexion von Kunststoffsubstraten“, Offenlegungsschrift zur Deutschen Patentanmeldung DE 10241708 A1 (2002).

Precise control of coatings and surface structures

Steffen Wilbrandt, Norbert Kaiser

Process controlling in industrial deposition systems for precise optics is commonly realized by quartz crystal monitoring or optical monitoring using a single (variable) wavelength /1/. Increased accuracy in optical thickness can be achieved using new methods, such as most-sensitive-wavelength-monitoring, however variations in optical constants can only be compensated for a particular wavelength. Since optical measurements are often preferable with regard to quartz monitoring for process controlling /2/, a broadband monitoring system for in-situ measurement of the optical performance was developed. Its modular design allows measurements at the witness glass as well as measurements at the rotating substrate (Fig. 1) within an arbitrary spectral range (typical 400 nm–900 nm) which is restricted

only by the optical components utilized. Flexible timing control of the measurement achieved by self-developed, micro-controller based electronics and high quantum efficiency of the selected detector ($> 90\%$) allows very short integration time (> 1.5 ms).

In the case of using our system in a Leybold Syrus Pro 1100 deposition system (Fig. 2), the optical path of the process photometer OMS4000 can additionally be used to measure transmittance or reflectance at the witness glass over a broad spectral range. With up to 10 measurements per second, this system is particularly well suited to monitoring highly dynamic processes (e. g. surface treatment of plastics by plasma etching /3/, fast growth of metal island films). In many cases such a high time resolution is not required so that transmittance measu-

rements may be performed directly on samples at the rotating substrate holder (several samples independently). The optics designed were optimized to achieve the lowest possible sensitivity of the measured signal against angle rearrangement and displacement of the sample. In addition the illumination optic completely shields the detector from background illumination originating from other sources (electron beam guns, plasma).

References:

- /1/ Sullivan, B.T.; Dobrowolski, J.A.: „Deposition error compensation for optical multilayer coatings: I. Theoretical description“, Appl. Opt. 31 (1992) 3821–3835.
- /2/ Mcleod, A.: „Monitoring of optical coatings“, Appl. Opt. 20 (1981) 82–89.
- /3/ Munzert, P.; Uhlig, H.; Scheler, M.; Schulz, U.; Kaiser, N.: „Verfahren zur Reduzierung der Grenzflächenreflexion von Kunststoffsubstraten“, Offenlegungsschrift zur Deutschen Patentanmeldung DE 10241708 A1 (2002).



Abb. 1:
Optische Konfiguration für in-situ
Breitbandmessungen.

Fig. 1:
Optical setup for in-situ broadband
measurements.

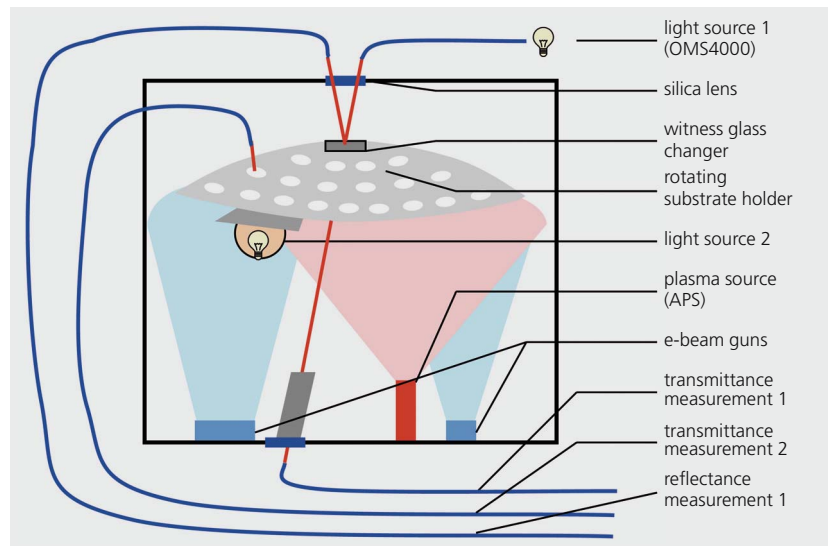


Abb. 2:
In-situ Breitbandmessung in der Leybold Syrus Pro 1100.

Fig. 2:
In-situ broadband measurement in the Leybold Syrus Pro 1100.

Streuverluste fluoridischer Substrate und Schichten bei 193 nm

Sven Schröder, Stefan Glied, Angela Duparré



Sven Schröder



Stefan Glied



Angela Duparré

Der anhaltende Trend in der optischen Lithographie zu immer kürzeren Lichtwellenlängen hat zur Folge, dass Verluste durch Streuung eine kritische Rolle einnehmen. Die aktuelle Roadmap fokussiert gegenwärtig darauf, bis zum Zeitpunkt der Anwendungsreife der EUV-Lithographie die Optimierung im DUV-Bereich bei 193 nm bis an ihre Grenzen voranzutreiben (ohne dass dabei die Wiederaufnahme von Aktivitäten bei 157 nm ausgeschlossen werden kann). Die Technologieentwicklung zieht enorme Herausforderungen an die Messtechnikentwicklung nach sich. Für die Streulichtanalyse bedeutet dies, dass sich optische Komponenten von superglaten Substraten bis hin zu Schichtsystemen mit ausgeprägten Nanostrukturen sowohl hochauflösend als auch effizient vermessen lassen und außerdem die Messungen direkt mit theoretischen Auswertetools verknüpfbar sein müssen.

Das am Fraunhofer IOF entwickelte Messsystem VULSTAR /1/ mit seinen Möglichkeiten zur totalen und winkelaufgelösten Bestimmung der Lichtstreuung, Transmission und Reflexion bei 193 nm und 157 nm ist weltweit das einzige System, das diese Anforderungen erfüllt. Extrem hohe Sensitivitäten von 10^{-6} (totale Streuung) und Dynamikbereiche von mehr als 10 Größenordnungen (winkelaufgelöste Streuung) garantieren hochgenaue Messungen. Gleichzeitig ermöglichen flexible und effiziente Messmodi sowie deren Verknüpfung mit Modellierungstechniken einen breiten Anwendungsspielraum. Ein Beispiel dafür sind die in einem Projekt mit Newport Corp. (Irvine, USA) durchgeführten Untersuchungen zur Optimierung von HR-Schichtsystemen für 193 nm mit unterschiedlichen Schichtdesigns und -materialien (Abb. 1 und 2) /2/.

Durch die gewonnenen Ergebnisse wurde der Projektpartner in die Lage versetzt, die weitere Technologieoptimierung mit dem am besten geeigneten System voranzutreiben.

Vergleiche mit modellierten Streukurven für dieses System (Abb. 3) auf der Basis von AFM-Daten (Abb. 4) lieferten zudem wichtige Hinweise auf die maßgeblichen Streulichtmechanismen und damit die Grundlage für weitere Optimierungsschritte.

Weitere Anwendungsbeispiele sind u. a. in /3/ zu finden.

Literatur:

- /1/ Glied, S.; Duparré, A.: „Light Scatter Technique for Application in Optics, Nanotechnology, and Engineering“, VDI-Berichte Nr. 1844 (2004), pp. 31–37.
- /2/ Rudisill, J. E.; Duparré, A.; Schröder, S.: „Determination of scattering losses in ArF⁺ excimer laser all-dielectric mirrors for 193 nm microlithography application“, in Laser-Induced Damage in Optical Materials, G. J. Exarhos; A. H. Guenther; N. Kaiser; K. L. Lewis; M. J. Soileau and Ch. J. Stolz, eds., Proc. SPIE 5647, (2004) in print.
- /3/ Hultåker, A.; Glied, S.; Gessner, H.; Duparré, A.: „Characterization of CaF₂ substrates for VUV fluoride coatings“, Proc. SPIE Vol. 5250 (2003), pp. 119–126.

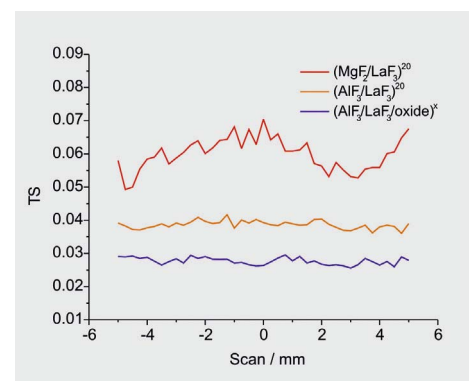


Abb. 1:
Totale Streulichtmessungen (TS) bei 193 nm an HR-Schichtsystemen mit den in der Bildlegende angegebenen Designs.

Fig. 1:
Total scattering (TS) at 193 nm on HR coatings with the designs given in the figure.

Scattering losses on fluoride substrates and coatings at 193 nm

Sven Schröder, Stefan Gliech, Angela Duparré

The persistent trend of optical lithography towards ever shorter wavelengths results in scattering losses playing a critical role. The current roadmap focuses on pushing the optimization in the DUV region at 193 nm until EUV lithography is ready for application (without actually excluding the possibility of resumption of activities at 157 nm). The technological progress involves enormous challenges for metrology. For light scattering analysis, this means that optical components from smooth substrates to multilayer systems with pronounced nanostructures need to be measured with high resolution and efficiency. Furthermore, the measurements must be directly connectable to theoretical analysis tools.

The measurement system VULSTAR /1/, developed at the Fraunhofer IOF, with its capacity to measure total and angle resolved scattering, transmittance and reflectance at 193 nm and 157 nm, is the only system worldwide that fulfills these demands. Extremely high sensitivities of 10^{-6} (total scattering) and dynamic ranges exceeding 10 orders of magnitude (angle resolved scattering) guarantee highly accurate measurements.

Flexible and efficient measurement modes together with their link to modeling techniques permit a wide field of applications. One example are recent investigations within a project with Newport Corp. (Irvine, USA), aimed at the optimization of HR coatings for 193 nm using different coating designs and materials (Fig. 1 and 2) /2/. The measurement results enabled our project partner to pursue the further technological optimization with the most appropriate system.

Moreover, comparison with modeled scattering curves for this system (Fig. 3) based on AFM data (Fig. 4) provided important indications of the dominant scattering mechanisms and therefore the basis for further optimization steps.

Additional examples of application can be found in /3/.

References:

- /1/ Gliech, S.; Duparré, A.: „Light Scatter Technique for Application in Optics, Nanotechnology, and Engineering“, VDI-Berichte Nr. 1844 (2004), pp. 31–37.
- /2/ Rudisill, J. E.; Duparré, A.; Schröder, S.: „Determination of scattering losses in ArF⁺ excimer laser all-dielectric mirrors for 193 nm microlithography application“, in Laser-Induced Damage in Optical Materials, G. J. Exarhos; A. H. Guenther; N. Kaiser; K. L. Lewis; M. J. Soileau and Ch. J. Stolz, eds., Proc. SPIE 5647, (2004) in print.
- /3/ Hultåker, A.; Gliech, S.; Gessner, H.; Duparré, A.: „Characterization of CaF₂ substrates for VUV fluoride coatings“, Proc. SPIE Vol. 5250 (2003), pp. 119–126.

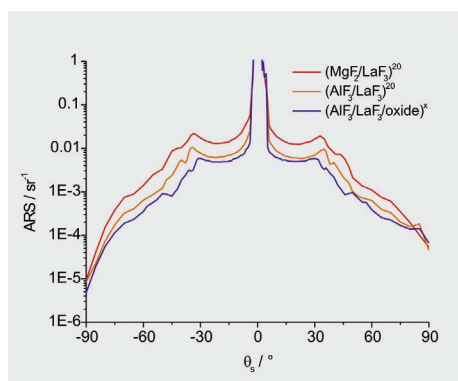


Abb. 2:
Winkelaufgelöste Streulichtmessungen (ARS) bei 193 nm an HR-Schichtsystemen.

Fig. 2:
Angle resolved scattering (ARS) at 193 nm on HR coatings.

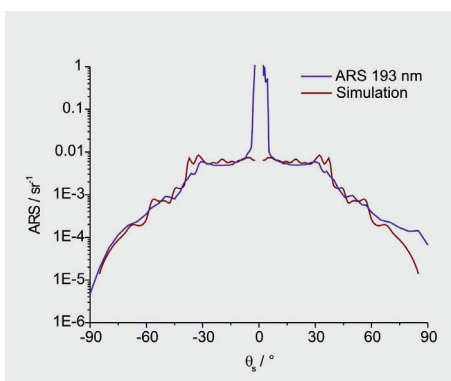


Abb. 3:
Vergleich der gemessenen und modellierten Streulichtkurven für das System (AlF₃/LaF₃/oxide)^x.

Fig. 3:
Comparison of measured and modeled scattering curves for the (AlF₃/LaF₃/oxide)^x system.

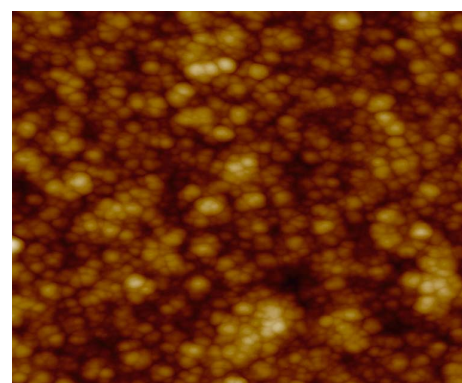


Abb. 4:
Oberflächentopographie des HR-Systems aus Abb. 3 (AFM-Messung, Scangebiet: 1 x 1 μm², Höhenskala 0 nm bis 30 nm).

Fig. 4:
Surface topography of the HR system in Fig. 3 (AFM measurement, scan size 1 x 1 μm², height scale 0 nm to 30 nm).

Entwicklung thermisch stabiler MoSi₂/Si- und Mo/C/Si/C-Schichtsysteme

Sergiy Yulin, Nicolas Benoit, Torsten Feigl, Norbert Kaiser



Sergiy Yulin



Nicolas Benoit



Torsten Feigl



Norbert Kaiser

Die Anwendung von Multilayeroptiken für die EUV-Lithographie erfordert nicht nur eine höchstmögliche Reflektivität, sondern auch eine anhaltende thermische und Strahlungsstabilität bei Arbeitstemperatur. Besonders gilt dies für den Kollektorspiegel des Beleuchtungssystems, da wegen seiner unmittelbaren Nähe zur EUV-Quelle ein vorzeitiger Reflektivitätsverlust erfolgen kann. So zeichnen sich herkömmliche Mo/Si-Schichtsysteme bei thermischer Beanspruchung ($T > 200\text{ °C}$) durch eine Instabilität der Schichtstruktur mit daraus resultierendem Verlust der Reflektivität sowie einer Verschiebung der Peak-Wellenlänge aus. Dies limitiert die Anwendung von Mo/Si-Systemen für Beschichtungen von EUVL-Kollektorspiegeln.

Mit dem Ziel einer deutlichen Verbesserung der thermischen Stabilität wurden zwei alternative Schichtsysteme auf Silizium-Basis entwickelt: MoSi₂/Si und Mo/C/Si/C. Die Schichtdesigns sowie die Beschichtungsparameter wurden für eine Maximalreflexion bei einer Wellenlänge um 13,5 nm sowie einer Arbeitstemperatur von 400 °C optimiert. Die Untersuchung der thermischen Stabilität erfolgte unter Hochvakuumbedingungen bis $T = 500\text{ °C}$ und 100 h.

Die untersuchten MoSi₂/Si-Systeme zeigen nur geringfügige thermisch induzierte Änderungen der Schichtstruktur. Die hauptsächlich auf Kristallisierungsprozesse der MoSi₂-Schicht zurückzuführenden Strukturveränderungen sind im untersuchten Temperaturbereich von 250 °C bis 500 °C zeitlich invariant (Abb. 1). Während sich nach einer 100-stündigen Temperatureinwirkung von $T = 500\text{ °C}$ die Peak-Wellenlänge um ca. 1,7 % verringert, konnte ein Reflektivitätsverlust von lediglich 1,0 % nachgewiesen werden.

Die optischen Eigenschaften von Mo/C/Si/C-Schichtsystemen sind bei Temperaturen bis $T = 300\text{ °C}$ stabil. Eine Verringerung der Peak-Wellenlänge von 2,1 % sowie ein Reflektivitätsverlust von nur 1,5 % wurden nach einer 100-stündigen Temperatureinwirkung von $T = 500\text{ °C}$ gemessen, wobei für Temperaturen $T > 400\text{ °C}$ eine zeitliche Abhängigkeit thermisch induzierter Strukturveränderungen zu beobachten ist (Abb. 2).

Die Kombination von thermischer Stabilität und optischen Eigenschaften von MoSi₂/Si- und Mo/C/Si/C-Schichtsystemen unterstreicht ihre potentielle Nutzung als Beschichtung von EUVL-Kollektorspiegeln.

Die Autoren danken Cymer Incorporation für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeiten.

Literatur:

- /1/ Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.: „High-temperature MoSi₂/Si and Mo/C/Si/C multilayer mirrors“, Poster: 3rd International EUVL Symposium, Nov 1–4, 2004, Myiazaki, Japan.

Development of high-temperature MoSi₂/Si and Mo/C/Si/C multilayer mirrors

Sergiy Yulin, Nicolas Benoit, Torsten Feigl, Norbert Kaiser

The application of multilayer optics in EUV Lithography requires not only the highest possible normal-incidence reflectivity but also a long-term thermal and radiation stability at operating temperatures. This requirement is most important in the case of the collector mirror of the illumination system close to the EUV source where a short-time decrease in reflectivity is most likely. A serious problem of Mo/Si multilayers is the instability of reflectivity and peak wavelength under high heat load. The instability of Mo/Si multilayers becomes especially critical at elevated temperatures of more than 200 °C, thus limiting the possible applications of Mo/Si multilayers for coating of the EUVL collector mirror.

The development of high-temperature multilayers was focused on two alternative Si-based systems: MoSi₂/Si and Mo/C/Si/C multilayer mirrors. The multilayer designs as well as the deposition parameters of both systems were optimized in terms of high peak reflectivity at a wavelength close to 13.5 nm and a working temperature of 400 °C. Annealing was carried out under vacuum at elevated temperatures of up to 500 °C for up to 100 hours.

Small thermally induced changes of the MoSi₂/Si multilayer properties were found but they were independent of the annealing time at all temperatures examined (Fig. 1). A wavelength shift of – 1.7 % and a reflectivity drop of 1.0 % have been found after annealing at 500 °C for 100 hours. The degradation of optical properties can be explained by crystallization processes of MoSi₂ layers.

The optical properties of Mo/C/Si/C did not change for temperatures of up to 300 °C. A wavelength shift of – 2.1 % and a reflectivity drop of 1.5 % were found after annealing at 500 °C for 100 hours. For temperatures above 400 °C a time-dependent degradation of the optical properties can be observed (Fig. 2).

The combination of high thermal stability and good optical properties of MoSi₂/Si and Mo/C/Si/C multilayer mirrors underlines their potential for use in the coating of EUVL collector optics.

The authors gratefully acknowledge the financial support for this work from Cymer Incorporation.

References:

- /1/ Yulin, S.; Benoit, N.; Feigl, T.; Kaiser, N.: „High-temperature MoSi₂/Si and Mo/C/Si/C multilayer mirrors”, Poster: 3rd International EUVL Symposium, Nov 1–4, 2004, Myiazaki, Japan.

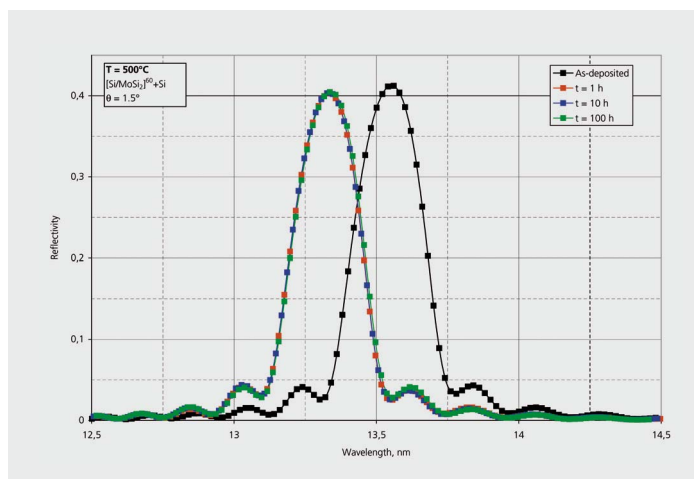


Abb. 1:
Gemessene MoSi₂/Si-Reflektivität,
Temperatur bei 500 °C für 1, 10 und 100 h.

Fig. 1:
Measured MoSi₂/Si reflectivity,
annealing at 500 °C for 1, 10 and 100 h.

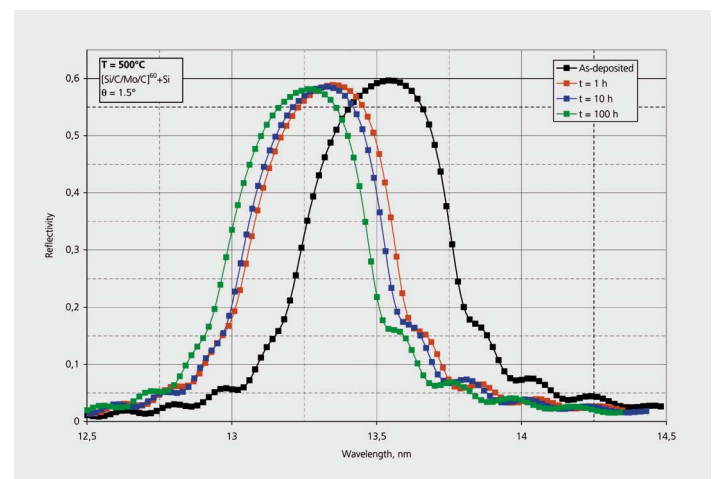


Abb. 2:
Gemessene Mo/C/Si/C-Reflektivität,
Temperatur bei 500 °C für 1, 10 und 100 h.

Fig. 2:
Measured Mo/C/Si/C reflectivity,
annealing at 500 °C for 1, 10 and 100 h.

Optische Simulation einer Strahlungsheizung

Martin Palme, Stefan Riehemann,
Alexander Horst¹, Dmitri Souptel¹, Günter Behr¹

¹ Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstofforschung, Dresden



Martin Palme



Stefan Riehemann



Alexander Horst



Dmitri Souptel



Günter Behr

Das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstofforschung (IFW) Dresden betreibt für die Kristallzüchtung eine Hochdruckzonenschmelzanlage mit Strahlungsheizung. Diese Anordnung basiert auf einer modifizierten Anlage russischer Produktion (Typ URN-22M des Moscow Power Engineering Institute) und besteht aus zwei elliptischen Spiegeln, die einen gemeinsamen Brennpunkt besitzen. In dem zweiten Brennpunkt des unteren Spiegels befindet sich eine 5000 W Osram XBO Lampe mit Hohlspiegelreflektor, im zweiten Brennpunkt des oberen Spiegels die Schmelzzone in einem Quarzglaszylinder /1/, /2/. Für eine Weiterentwicklung dieser Hochdruckzonenschmelzanlage war es notwendig, die bestehende Anordnung zu analysieren. Diese Analyse sollte mit den Mitteln des optischen Re-Designs und der optischen Simulation durchgeführt werden. Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung der räumlichen Verteilung der Strahlungsleistung im Bereich der Schmelze.

Auf der Grundlage von Messdaten zur Spiegelgeometrie und den mechanischen Konstruktionsdaten der Anlage wurde ein optisches Modell der Strahlungsheizung in der Software ZEMAX erstellt (siehe Abb. 1). Als Lichtquelle wurde eine 5000 W Osram XBO Lampe modelliert. Das leuchtende Plasma der Lampe wurde hierbei aus zwei Berei-

chen unterschiedlicher Strahlungsleistung zusammengesetzt (siehe Abb. 2, links), was sich als hinreichend genau zur Reproduktion der realen Strahldichteverteilung (siehe Abb. 2, rechts) erwies.

Um die resultierenden Verteilungen im Schnitt und auf der Oberfläche der Schmelzzone simultan zu erfassen, wurden bis zu 60 unterschiedliche Detektorflächen auf der Zylinderoberfläche der Schmelze definiert und während der Berechnung ausgewertet. Die Strahlungsverteilung auf der Zylinderoberfläche ist in Abb. 3 zu sehen. Deutlich sind Abschattungen durch die Zylinderaufhängungen zu erkennen. Es werden Maximalwerte der Bestrahlungsstärke von knapp 60 W/cm² erreicht. Mittels der beschriebenen Methoden konnten ebenfalls die Einflüsse der Justagetoleranzen der einzelnen Komponenten der Anlage auf die Verteilung und den Maximalwert der Strahlstärke ermittelt werden.

Literatur:

- /1/ Souptel, D.; Behr, G.; Balbashov, A.M.: „SrZrO₃ single crystal growth by floating zone technique with radiation heating“, J. Crystal Growth 236 (2002) 583–588.
- /2/ Souptel, D.; Behr, G.; Ivanenko, L.; Vinzelberg, H.; Schumann, J.: „Floating zone growth and characterization of semiconducting Ru₂Si₃ single crystals“, J. Crystal Growth 244 (2002) 296–304.

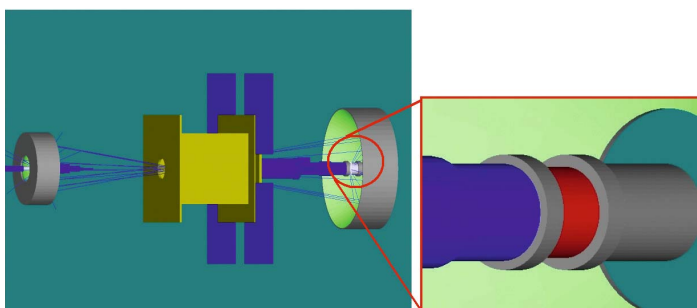


Abb. 1:
Optisches Modell der Hochdruckzonenschmelzanlage mit zwei elliptischen Spiegeln (hellgrüne Flächen), die einen gemeinsamen Brennpunkt besitzen. In dem zweiten Brennpunkt des linken Spiegels befindet sich die XBO Lampe mit Hohlspiegelreflektor, im zweiten Brennpunkt des rechten Spiegels die Schmelzzone in einem Quarzglaszylinder (roter Bereich im rechten Bild).

Fig. 1:
Optical Model of the high pressure floating zone installation with two elliptical mirrors (light green areas), which have a common focal point. In the second focal point of the left mirror the XBO lamp with a spherical reflector is placed, in the second focal point of the right mirror the melting zone is placed within a quartz cylinder (red area in the insertion).

Optical simulation of a radiation heating

Martin Palme, Stefan Riehemann,
Alexander Horst ¹, Dmitri Souptel ¹, Günter Behr ¹

¹ Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstofforschung, Dresden

The Leibniz Institute for Solid State and Materials Research (IFW) Dresden utilizes a high pressure floating zone installation for crystal growth. This installation is based on a modified system of Russian origin (Type URN-2ZM of the Moscow Power Engineering Institute). It consists of two elliptical mirrors, which have one common focal point. A 5000 W Osram XBO lamp with a spherical reflector is placed at the second focal point of the lower mirror, and at the second focal point of the upper mirror the melting zone is located within a quartz cylinder /1/, /2/. For further development of this high pressure floating zone installation it was necessary to perform a detailed analysis of its present status. This was performed by optical re-design and simulation. The goal of these investi-

gations was to estimate the spatial distribution of the radiant flux on the surface of the melting zone. Based on measurements of the mirror geometry and on mechanical construction drawings, an optical model of the radiation heating was established in the optical design software, ZEMAX (see Fig. 1). A 5000 W Osram XBO lamp, which served as a light source, was modeled. The radiating plasma of this lamp was formed out of two areas with different radiant flux (see Fig. 2, left). In this way, a realistic reproduction of the lamps far field radiance distribution was achieved (see Fig. 2, right).

To determine the resulting radiance distributions on the surface of and perpendicular to the melting zone simultaneously, up to 60 different detector areas were defined and

evaluated. The resulting distribution on the surface of the melting zone can be seen in Fig. 3. Shadowed areas caused by mechanical mountings are clearly identifiable. The irradiance reaches maximum values of about 60 W/cm². Using these methods the influence of mounting tolerances of all components on radiance distribution and the maximum value of irradiance were also clearly outlined.

References:

- /1/ Souptel, D.; Behr, G.; Balbashov, A.M.: „SrZrO₃ single crystal growth by floating zone technique with radiation heating“, J. Crystal Growth 236 (2002) 583–588.
- /2/ Souptel, D.; Behr, G.; Ivanenko, L.; Vinzelberg, H.; Schumann, J.: „Floating zone growth and characterization of semiconducting Ru₂Si₃ single crystals“, J. Crystal Growth 244 (2002) 296–304.

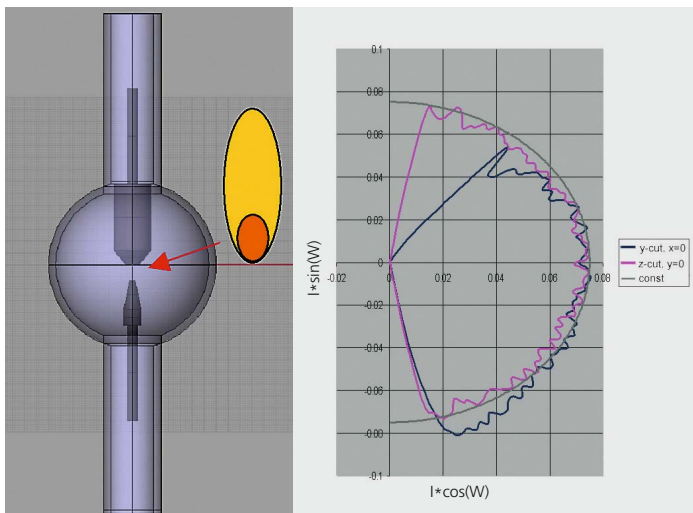


Abb. 2:
Optisches Modell der XBO Lampe auf Grundlage des mechanischen Aufbaus und einem 2-teiligen Plasma (links), rechts resultierende Strahldichtevertielung im Fernfeld (Indikatrix).

Fig. 2:
Optical Model of the XBO lamp based on its mechanical setup and a 2-split plasma (left), on the right hand the resulting radiant intensity distribution in the far field (indicatrix) is lined out.

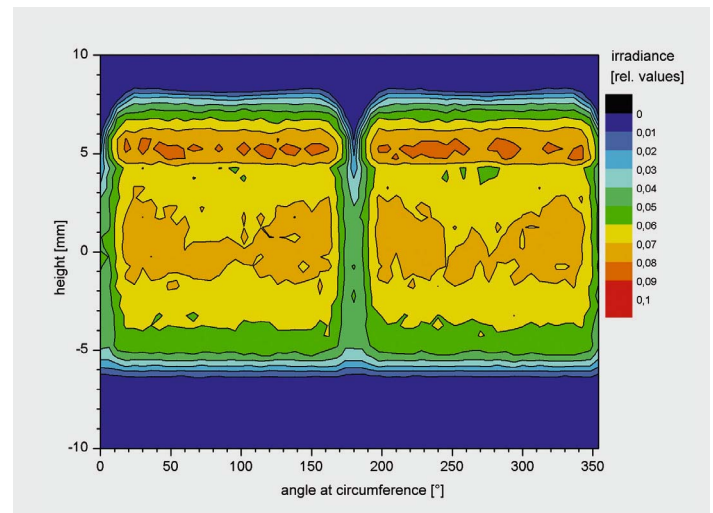


Abb. 3:
Resultierende Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Oberfläche der Schmelzzone.

Fig. 3:
Resulting irradiance distribution on the surface of the absorbing melting zone.

»Kolibri 1500« – Ein Gerätesystem zur 3-D-Vermessung komplexer Gussteile

Peter Kühmstedt, Matthias Heinze, Michael Himmelreich, Georg Notni, Peter Brakhage¹, Roland Geller¹, Gunther Notni

¹ IVB GmbH, Jena



Peter Kühmstedt



Matthias Heinze



Georg Notni



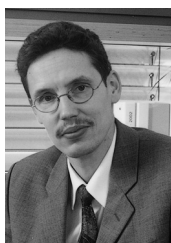
Roland Geller



Michael Himmelreich



Peter Brakhage



Gunther Notni

Die Vermessung von Bauteilen der Ur- und Umformtechnik (wie Guss-, Biege-, Walzteilen) stellt steigende Anforderungen an 3-D-Messsysteme. Dabei werden insbesondere die Vermessung komplexer Geometrien in großen Messfeldern und ein automatischer Messablauf gefordert. Die bisher verfügbaren Messsysteme konnten diese Anforderungen vor allem hinsichtlich der Messautomatisierung nicht erfüllen. Daraus resultierend wurde ein neues Systemdesign und die Umsetzung in ein Messgerät realisiert. Das Gerät basiert auf dem Prinzip der Phasogrammetrie unter Verwendung der Streifenprojektion als Messmethode /1/. Die wesentlichen Merkmale sind Selbstkalibrierung, Robustheit im Einsatz auch in der Fertigung und die Möglichkeit, vollautomatisch komplexe Geometrien zu erfassen.

Die hierfür erforderliche Erweiterung des Messfeldes konnte durch die Einführung der Methodik der virtuellen Passmarken anwenderfreundlich gelöst werden. Diese Methodik realisiert erstmals die Verknüpfung von Teilansichten ohne Verwendung von körperlichen Marken oder hochgenauen mechanischen Führungssystemen. Als technische Grundlage für eine Vergrößerung des Messfeldes wurde eine x-y-Verschiebeeinheit integriert, die den Einzelmessbereich von ca. 500 mm Durchmesser durch Aneinanderfügen auf ein Gesamtfeld von max. 1 500 mm x 1 000 mm erweitert. Die mit diesem Tisch verkoppelte so genannte Verknüpfungskamera realisiert auf rein optischem Weg virtuelle Passmarken auf der Objekt-oberfläche. Damit können die Daten für jede mit der Verschiebeeinheit gemessene Teilansicht in einem gemeinsamen Koordinatensystem berechnet werden. Die Messdaten selbst werden mit dem an einem Dreharm befindlichen Sensor-kopf aus Projektor und Kamera aufge-

nommen. Die Anzahl der Ansichten des Messobjektes ist nunmehr nur noch durch die Anzahl der Beleuchtungspositionen begrenzt. Insbesondere die technische Ausführung der Messzelle wurde durch unseren Industriepartner IVB GmbH realisiert.

Die Einsatzgebiete der neuen Methodik und Systemtechnik sind nicht auf die oben genannten Anwendungsfelder beschränkt. Dieses neue Messsystem wurde im Oktober 2004 bei einem großen Automobilhersteller in einem Werk zur Gussteilfertigung erfolgreich installiert. Mit den Messergebnissen wird hier eine Qualitätskontrolle (Soll-Ist-Vergleich gegen das CAD-Modell) durchgeführt. Mit dem neu entwickelten Messsystem »Kolibri 1500« ist man dem Ziel der automatisierten optischen 3-D-Vermessung ein wesentliches Stück näher gekommen und hilft neue Anwendungsfelder zu erschließen.

Literatur:

- /1/ Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.: „Systemkonfigurationen phasogrammetrischer 3D-Messsysteme – Anwendungsbeispiele“, Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Hrsg. Th. Luhmann, Wichmannverlag (2004) S. 30–37.



Abb. 1:
Messsystem »Kolibri 1500«.

Fig. 1:
Photograph of the measuring system
"Kolibri 1500".

“Kolibri 1500” – a device system for founding piece inspection

Peter Kühmstedt, Matthias Heinze, Michael Himmelreich, Georg Notni,
Peter Brakhage¹, Roland Geller¹, Gunther Notni

¹ IVB GmbH, Jena

The measurement of components made by founding techniques and reshape techniques (founding, bending, and rolling pieces) places ever increasing demands on the 3-D measuring systems. The measurement of complex geometries in large measuring fields and the automation of the measuring process are particularly necessary. So far the available measuring systems don't satisfy these requirements especially those concerning the automation of the measuring process. This situation led to the design of a new system and the subsequent realization of a new measuring device. The device is based on phasogrammetry by using the fringe projection technique as the measuring principle /1/. The essential features are self-calibration, robustness even in production processes, and the possibility to automatically register complex geometries.

The necessary extension of the measuring field was achieved in a user-friendly way by using the method of virtual landmarks. For the first time this method realizes the concatenation of the partial views without physical markers or high precision mechanical guiding systems. In order to achieve

the enlargement of the measuring field an x-y shifting unit was integrated, which concatenates partial regions with a diameter of 500 mm to result in a final, maximum area of 1,500 mm x 1,000 mm. The so-called connecting camera, which is fixed at the shifting unit, optically realizes virtual landmarks on the object's surface. Thus the data for all the individual partial views can be calculated in a common co-ordinate system. The measuring data are obtained by a sensor head consisting of a projector and a camera mounted on a rotating arm. The number of views of the measured object is only restricted by the number of illumination directions. The technical realization of the measuring unit was performed by our industrial partner IVB GmbH.

The fields of application for this new technique are not restricted to those mentioned above. In October 2004 the new measuring system was successfully installed in a large car producer's factory for casting-production. The measurements made by the system are used to perform a quality control (CAD model vs. actual value).

With the newly developed measuring system “Kolibri 1500” the ability to measure large objects by automatic phasogrammetry has been essentially improved and new fields of application can be investigated.

References:

- /1/ Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.: „Systemkonfigurationen phasogrammetrischer 3D-Messsysteme – Anwendungsbeispiele“, Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Hrsg. Th. Luhmann, Wichmannverlag (2004) S. 30–37.

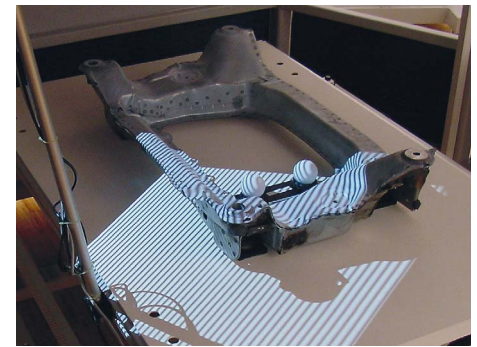


Abb. 2:
Messobjekt im System »Kolibri 1500«, ein Teilbereich wird mit einem Streifenmuster beleuchtet.

Fig. 2:
Measuring object in the system “Kolibri 1500”, a part of the measuring area is illuminated by a fringe pattern.

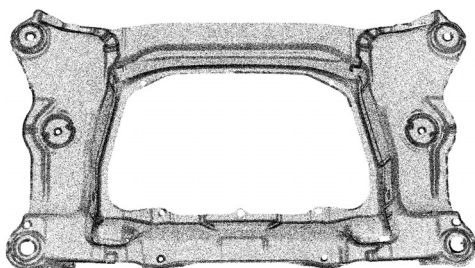


Abb. 3:
Punktwolke eines Integralträgers, Länge 850 mm, Breite 500 mm.

Fig. 3:
Point cloud of an integral support, length: 800 mm, width: 500 mm.

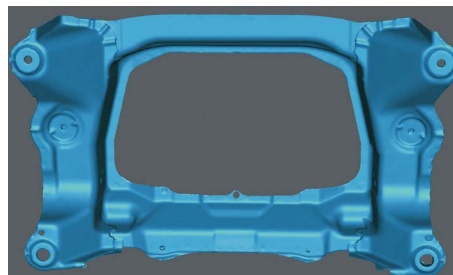


Abb. 4:
Aus der Punktwolke generiertes STL-Modell der Oberfläche.

Fig. 4:
STL model extracted from the point cloud.

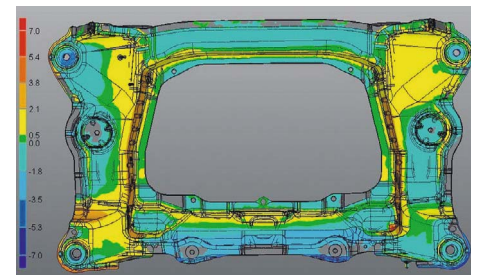


Abb. 5:
CAD-Vergleich zur Sollform, die Farbe kodiert die Abweichung.

Fig. 5:
CAD model shape vs. actual measured shape, the extent of deviation is color-coded.

Vom Mikrofluidik-Baukasten zur flexiblen Diagnostik-Plattform

Claudia Gärtner ¹, Holger Becker ²

¹ amt – Applikationszentrum Mikrotechnik Jena im Fraunhofer IOF

² microfluidic ChipShop GmbH, Jena



Claudia Gärtner



Holger Becker

Schneller, besser, günstiger – mit mikrofluidischen Systemen wird dies für Diagnostik, Biotechnologie und Analytik für viele Anwendungen erreichbar. Im Routinelabor – sei es in Industrie oder Wissenschaft – hat der lange angekündigte Siegeszug der Mikrofluidik noch nicht begonnen. Mit dem Mikrofluidik-Baukasten wird der Weg in die Anwendung verkürzt:

- Standardkomponenten sind verfügbar.
- Auf bestehenden Standards wird aufgebaut, d. h., eine Kompatibilität mit verfügbaren Laborgeräten ist gewährleistet.
- Ein Satz etablierter funktioneller fluidischer Elemente liegt für weitere Entwicklungen vor.

Drei entscheidende Festlegungen wurden getroffen:

- Als Handhabungsplattform dient ein Titerplattenrahmen. Damit ist die Kompatibilität zur gängigen Laborautomation gegeben.
- Das Objektträgerformat bzw. das Doppelte des Objektträgerformats ist die Größe für die Lab-on-a-Chip-Systeme.
- Fluidanschlüsse der Chips liegen zu jeweils 14 im Well-Abstand einer 384er Titerplatte auf den Längsseiten der Chips.

Die mikrofluidischen Strukturen auf dem Chip bestimmen die Funktionalität – ganz gleich, wie viele der insgesamt 28 Fluideingänge genutzt werden und ob z. B. als Fluidanschlüsse lediglich Durchgangsbohrungen oder integrierte Oliven oder Luer-Anschlüsse zum direkten Aufstecken von Schläuchen oder Spritzen genutzt werden (Abb. 1, Abb. 2). Das heißt, mit einem Spritzgusswerkzeug lassen sich nur durch Austausch der Mikrostruktur verschiedenste Chipfunktionen realisieren.

Wichtiger Nebeneffekt der Standardisierung ist daher durch die Vereinheitlichung der Formate eine signifikante Kostensenkung und eine schnellere Fertigung mikrofluidischer Polymerchips.

Damit ist das Potential des Mikrofluidik-Baukastens noch nicht umfassend dargestellt: Die innerhalb des Baukastens etablierten Einzelfunktionen wie Ventile, Fluidverteiler, Trennstrecken etc. können ohne weiteren Entwicklungsaufwand kombiniert und zu komplexen Lab-on-a-Chip-Systemen integriert werden. Denn nur Systeme mit zahlreichen mikrofluidischen Elementen und integrierter fluidischer Anschlusstechnik können den Preisvorgaben der Diagnostik-Industrie standhalten und einen der attraktivsten Märkte für die Mikrofluidik erschließen. Abb. 3 stellt eine Diagnostik-Plattform mit Verteilern, Ventilen, Reaktionsgefäßen und Entlüftungsöffnungen dar, die z. B. für die Analyse von Blut konzipiert wurde.

Mit solchen Lab-on-a-Chip-Plattformen wird künftig der lange angekündigte Markt »Mikrofluidik« als erstes erschlossen: Simple und doch hochfunktionelle Plastikchips zu günstigen Preisen für die Diagnostik.

From Microfluidic Toolbox to a flexible Diagnostic Platform

Claudia Gärtner ¹, Holger Becker ²

¹ amt – Application Center for Microtechnology Jena at the Fraunhofer IOF

² microfluidic ChipShop GmbH, Jena

Faster, better, cheaper: for many applications in the diagnostic area, biotechnology or analytical sciences this will become true – with microfluidic systems. However in both industrial and academic daily laboratory life, the promised revolution in microfluidics has not really started. With the microfluidic toolbox the introduction of this technology to the laboratory routine will occur sooner because:

- Standard chips are available.
- Existing standards are used to ensure compatibility with existing laboratory equipment.
- A set of established fluidic functional elements exists for further development of components.

Three important decisions were made:

- Compatibility with existing laboratory equipment is paramount and therefore the titerplate frame was chosen as the handling platform.

- The slide format and double slide format was defined as the size of lab-on-a-chip systems.
- There are 14 fluidic interfaces on each long side of the chip with the same well spacing as a 384 well plate.

The functionality of the chip is defined by the microstructures – regardless of how many fluidic ports (28 in total) are used, whether simple through holes are the fluidic interfaces or whether integrated tube fittings or Luer fittings are used for the direct connection with tubes or syringes (Fig. 1, Fig. 2). Therefore, with one injection molding tool – just by alteration of the microstructure – different chip types can be realized. An extremely important by-product of the standardisation is the creation of standard formats which leads not only to significant cost-reduction but also to a faster fabrication of the polymer based microfluidic chips.

This is not the end of the potential of the microfluidic toolbox: within the toolbox individual functions such as valves, fluidic networks, separation channels etc. can be combined with each other to form complex lab-on-a-chip systems without further development. Only systems with several microfluidic functions and integrated fluidic interfaces can compete with the price range within the diagnostic market, which is without any doubt one of the most attractive markets for microfluidic systems. In Fig. 3 a diagnostic platform with integrated valves, fluid distribution, reaction chambers and air vents is shown, e.g. for the analysis of blood.

With such lab-on-a-chip platforms the long ago announced “microfluidics” market will be opened; simple but multifunctional plastic chips at relatively low cost for the diagnostic market.



Abb. 1:
Mikrofluidikchips im Standardformat.

Fig. 1:
Microfluidic chips in standard format.

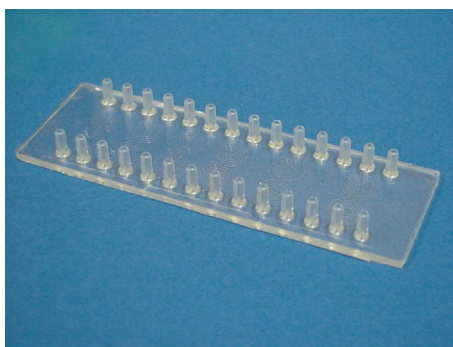


Abb. 2:
Mikrofluidikchip im Standardformat mit integrierten Oliven als Fluidanschlüsse.

Fig. 2:
Microfluidic chip in standard format with integrated tube fittings.



Abb. 3:
Mikrofluidik-Plattform als »simpler Plastikchip« für die Diagnostik.

Fig. 3:
Microfluidic platform as “simple plastic chip” for diagnostic applications.

1. Internationale Gäste 1. International Guests

Dr. Tatjana Amotchkina,
Dr. Alexander Tikhonravov,
Dr. Michail Trubetskov
Moscow State University, Moscow, Russia

Dr. Tzvetanka Krumova Babeva,
Dr. Gencho Danev
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Dr. Bruno Berge
Varioptic, Lyon, France

Luis Brissot
ATMEL, Grenoble, France

Takeji Deguchi, Ken Kawamata
Olympus Optical Co., Ltd., Tokyo, Japan

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

Kevin Hathaway, Rick Knox
Display Engineering Inc., Saratoga, CA, USA

Dr. Koki Hirano
Hitachi Cable, Ltd., Ibaraki-ken, Japan

Dr. Wolfgang Holota
EADS Astrium, München, Germany

Johann-Martijn ten Hove
University Twente, Twente, Netherlands

Dr. Jean Luc Jaffard
StMicroelectronics, Grenoble, France

Vesna Janicki
Institut Ruder Boskovic, Zagreb, Croatia

President Michael Janish,
Vice President Jeffrey W. Roblee
Precitech, Inc., Keen, New Hampshire, USA

Dr. Igor Kohesznikow
Crystallography Institute, Moscow, Russia

Prof. Angus Macleod
Thin Film Center Inc., Tucson, Arizona, USA

Jean-Louis Massieu
Intermec, Labège, France

Prof. Dr. Francesco Michelotti
Università degli Studi di Roma „La Sapienza“,
Roma, Italy

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

Prof. Hans K. Pulker
Universität Innsbruck, Innsbruck, Austria

Elizabeth Carmel Rowe
Durham University, Durham, Great Britain

Prof. Dr. Petr G. Sennikov
Russia Academy of Sciences, Nizhny Novgorod,
Russia

Ekaterina Pshenay-Severin
University St. Petersburg, St. Petersburg, Russia

Dr. Koichi Suzuki
SurfTech Transnational, Yokohama, Japan

Mümin Utku Tekmen
Hacettepe University, Istanbul, Turkey

Dr. Takahito Uga,
Dr. Daiki Minegishi,
Dr. Iquo Katoh
RICOH, Yokohama, Japan

Dr. Reinhard Völkel
SUSS Microoptics, Neuchâtel, Switzerland

Dr. Pete Vukusic
Exeter University, Exeter, Great Britain

Dr. Zhanshan Wang
Tongji University, Shanghai, China

2. Kooperation mit Instituten anderer Länder 2. Co-operation with Institutes in other Countries

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

France:
University St. Etienne, Prof. Oliver Parriaux

Ireland:
Trinity College Dublin, Prof. Werner Blau

Israel:
Technion, Haifa, Prof. Abraham Marmur

Italy:
ENEA Rome, Dr. Angela Piegari

Sincrotrone Trieste, Dr. Richard Walker

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

Netherlands:
University Twente, Prof. Alfred Driessen

Poland:
Institute of Optoelectronics, MUT,
Dr. Henryk Fiedorowicz

Portugal:
University Aveiro, Prof. Nikolai Sobolew

Russia:
Lebedev Institute Moscow, Dr. Igor Kozhevnikov

Moscow State University,
Prof. Alexander Tikhonravov

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

CSEM Zurich, Dr. Mike Gale

Ukraine:
National Technical University
„Kharkov Polytechnic Institute“,
Prof. Valery V. Kondratenko

USA:
Naval Air Warfare Center, China Lake, Dr. Jean M.
Bennett

3. Mitgliedschaften

3. Memberships

3.1 Persönliche Mitgliedschaften Personal Memberships

Dr. Andreas Bräuer

- Mitglied des AMA-Fachausschusses für Optische Sensorik
Member of the AMA advisory board for Optical Sensing
- Gutachter (Referee): Applied Optics, Optical Engineering, Optics Letters
- Fachausschuss 4.2 Mikrooptik der GMMA
Expert committee 4.2 Microoptics of GMMA-association

Dr. Angela Duparré

- Topical Editor: Applied Optics, Optical Thin Films
- Assessor Board Member of the Australian Research Council
- Program Committee Member „10th Topical Meeting on Optical Interference Coatings“, June 2004, Tucson, Arizona, USA
- Chair International Conference „Advanced Characterization techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies“, SPIE Symposium 2005, San Diego, USA
- Chair International Conference „Optical Fabrication, Testing and Metrology“, SPIE Symposium 2005, Jena, Germany
- Program Committee Member Conference „Advances in Optical Thin Films“, SPIE Symposium 2005, Jena, Germany
- DIN-Normenausschuss NAFuO, AA O18 AK2, „Optische Komponenten und Werkstoffe“
- ISO-Committee Member
ISO/TC 172/SC 9/WG 6
- Mitglied des Komitees „Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik“
des VDI/VDE/GMA 3.40
Member of the committee on „Metrology in Micro- and Nanotechnologies“ of the association of German Engineers, VDI/VDE/GMA 3.40

Dr. Ramona Eberhardt

- DIN-Normenausschuss NAFuO, AA F3, „Fertigungsmittel für Mikrosysteme“
- Mitglied im Wissenschaftlich-Technischen Rat der Fraunhofer-Gesellschaft, ab 5/04
Member of the Scientific-Technical Advisory Committee of the Fraunhofer-Gesellschaft

Dr. Torsten Feigl

- Gutachter (Referee):
Applied Optics, physica status solidi
- Program Committee „Optical Constants of Materials for UV to X-Ray Wavelength“, SPIE Annual Meeting 2004

Dr. Claudia Gärtner

- Mitglied im Arbeitskreis
„Mikrosysteme für die Biotechnologie“
Member of the working group
„Microsystems for Biotechnology“
- Mitglied im DECHEMA Arbeitsausschuss
„Mikroverfahrenstechnik“
Member of DECHEMA working committee
„Micro Process Engineering“

Dr. Volker Guyenot

- Mitglied im Wissenschaftlich-Technischen Rat der Fraunhofer-Gesellschaft, bis 5/04
Member of the Scientific-Technical Advisory Committee of the Fraunhofer-Gesellschaft
- Mitglied der Hauptkommission des Wissenschaftlich-Technischen Rats der Fraunhofer-Gesellschaft, bis 5/04
Member of the Board of the Scientific-Technical Advisory Committee of the Fraunhofer-Gesellschaft
- Kurator im Businessplan-Wettbewerb des Landes Thüringen
Curator of the committee of business competition of Thuringia
- Gutachter der Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen STIFT
Referee of Foundation for Technology, Innovation and Research Thuringia STIFT
- Vorstandsmitglied in
„OphthalmolInnovation Thüringen e.V.“
Member of the Board of
„OphthalmolInnovation Thüringen e.V.“

Dr. Norbert Kaiser

- Member of Program Committee
„5th International Conference on Coatings on Glas“, Saarbrücken, Germany
- Co-Chair of the „International Symposium on Laser Induced Damage in Optical Materials“, Boulder, USA
- General-Chair „10th Topical Meeting on Optical Interference Coatings“, Tucson, Arizona, USA
- Vorsitzender des Fachausschusses „Dünne Schichten für die Optik und Optoelektronik“ der Europäischen Forschungsgesellschaft für Dünne Schichten
President of technical committee
„Thin Films for Optics and Optoelectronics“ of the European Society of Thin Films
- Chair of High Level Expert Meeting „Design and Technology of Optical Coatings“, Anzio, Italy

- Mitglied des Vorstandsrats der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Member of the Board of Directors Council of Deutsche Physikalische Gesellschaft
- Member of Technical Advisory Committee (TAC) of Optical Coating Session Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters SVC, Dallas, USA
- Chair of SPIE Optical System Design Conference – Optical Coatings, Jena 2005, Germany
- Feature editor of special issues of „Applied Optics“ on Thin Films (2004, 2005)

Dr. Gunther Notni

- Beirat (Editorial Board): „Zeitschrift für Angewandte Gewässerökologie“
- VDI/VDE-GMA Fachausschuss 3.32.
„Optische 3-D-Messtechnik“
VDI/VDE-GMA board 3.32.
„Optical 3D measurement“
- Fachverband Photonik und Präzisionstechnik SPECTARIS, Fachgruppe
„Industrielle Messtechnik und Sensorik“
SPECTARIS Association, board Metering solutions

Dr. Stefan Riehemann

- Gutachter (Referee): Applied Physics B, BioMed Central
- Persönliches Mitglied (Personal member of): DPG, SID

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

- Verbundkoordinator BMBF-Leitprojekt „MICROPHOT“
Joint Coordinator of the „MICROPHOT“ project of the German federal ministry of education and research
- Board Member European Physical Society – Quantum Electronics and Optics Division
- Member Scientific Advisory Board Optics Communication
- Aufsichtsrat Biocentiv Jena
Member of the board of directors of Biocentiv Jena
- Beirat VDI-Kompetenzfeld Optische Technologien
„VDI Field of Competence Optical Technologies“ advisory board member
- Program Committee Member MOC '04, Jena, Germany
- Program Committee Member ASSP 2004, Santa Fe, USA
- Program Committee Member Fiber Lasers: Technology, Systems and Applications; Photonics West 2004
- Gutachter (Referee): Optical Letters, Optical Community, Applied Physics B, Applied Optics
- Persönliches Mitglied (Personal member of): DPG, EPS, OSA, IEEE, WLT, VWT

Dr. Christoph Wächter

- Program Committee „Integrated Optics Devices VIII“, SPIE - The International Society for Optical Engineering
- Conference Chair „Integrated Optics Devices IX“, SPIE - The International Society for Optical Engineering
- Member Technical Committee Workshop „Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling“
- Arbeitskreis „Integrierte Optik“ (AKIO) Study group „Integrated Optics“

Dr. Uwe-Detlef Zeitner

- Gutachter (Referee): Applied Optics, Optics Letters

3.1 Mitgliedschaften des Fraunhofer IOF Memberships of the Fraunhofer IOF

Beutenberg Campus e. V. – BC
www.beutenberg.de

BioRegio e. V.
www.bioregio.com/jena.htm

**DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e. V.**
www.dechema.de

**Deutsche Gesellschaft
für angewandte Optik e. V. – DGaO**
www.dgao.de

**Europäische Forschungsgesellschaft
Dünne Schichten e. V. – EFDS**
www.efds.org

European Optical Society – EOS
www.europticalsociety.org

**European Photonics Industry
Consortium EPIC**
www.epic-assoc.com

Fachverband für Sensorik e. V. – AMA
www.ama-sensorik.de

**fanimat –
Funktionelle anorganisch-nichtmetallische
Materialien**
www.fanimat.de

**FasiMiT – Aus- und Weiterbildungsnetzwerk
zur Fachkräftesicherung in der
Mikrosystemtechnik in Thüringen**
www.fasimit.de

Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping
www.rapidprototyping.de

Fraunhofer-Allianz Vision
www.vision.fraunhofer.de

**Fraunhofer-Themenverbund
Nanotechnologie**
[www.fraunhofer.de/fhg/profile/alliances/
Nanotechnologie.jsp](http://www.fraunhofer.de/fhg/profile/alliances/Nanotechnologie.jsp)

**Fraunhofer-Verbund
Oberflächentechnik und Photonik VOP**
www.vop.fraunhofer.de

Industrieverband SPECTARIS
www.spectaris.de

**Kompetenzzentrum Ultrapräzise
Oberflächenbearbeitung e. V. – UPOB**
www.upob.de

Kooperationsverbund Präzision aus Jena
www.praezision-aus-jena.de

Mikrotechnik Thüringen e. V. – MTT
www.mikrotechnik-thueringen.de

**Netzwerk Mikrotechnologie in Formenbau
und Spritzgießtechnik**
www.micromold.net

OphthalmolInnovation e. V.
www.opthalmolInnovation.de

OptoNet e.V.
www.optonet-jena.de

**Wissenschaftliche Gesellschaft
Lasertechnik e. V. – WLT**
www.wlt.de

4. Besondere Ereignisse Special Events

5. IOF-Winterschule Optische Schichten
5th IOF Winter school Optical Coatings
19.–20. Februar 2004, Tabarz

Alumni-Treffen
23. April, Fraunhofer IOF, Jena

BioTechnologie-Tage des BMBF
25.–27. April 2004, Jena

**OptoNet-Workshop
„Ultrapräzisionsbearbeitung von
Freiformflächen und Mikrostrukturen“**
„Ultra Precision Manufacturing of Freeform
Optics and Microstructures“
11. Mai 2004, Fraunhofer IOF, Jena

**Workshop „Entwicklung und Montage
mikrooptischer Systeme“**
„Development and assembly
of microoptical systems“
12. Mai 2004, Fraunhofer IOF, Jena

10th MICROOPTICS CONFERENCE
1.–3. September 2004,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

**Workshop im Rahmen
des 3D-Display Innovationsforums**
24. September 2004, Fraunhofer IOF, Jena

**Workshop
„Design und Herstellung
optischer Schichten“**
„Design and preparation of optical coatings“
4.–8. Oktober 2004, Fraunhofer IOF, Jena

**OptoNet EFDS Workshop
„Optische Schichten“**
„Optical Coatings“
4. November 2004, Fraunhofer IOF, Jena

„Reise in den Nanokosmos“
Veranstaltung zum Jahr der Technik –
Tag der offenen Tür
5. November 2004, Beutenberg Campus, Jena

**VDI Seminar „Optische 3D-Messtechnik“
der Fraunhofer-Allianz Vision**
25.–26. November 2004, Fraunhofer IOF, Jena

5. Berichterstattung in den Medien Media Coverage

Im Jahr 2004 wurde in den deutschen Medien insgesamt 244 Mal über das Fraunhofer IOF berichtet, darunter waren 203 Artikel in Zeitungen und Zeitschriften, 44 Berichte in Rundfunk und Fernsehen. Im Jahresdurchschnitt erschienen pro Woche in der regionalen Presse 1,5 Beiträge, in Fachzeitschriften mehr als ein Beitrag. Das Thema mit der größten Medienresonanz war die „Ultradünne Kamera“.

In the German media there were 244 reports about Fraunhofer IOF in 2004. This includes 203 articles in newspapers and journals and 44 radio and television reports, respectively. In average per week 1.5 articles were printed in the regional press and more than one article in journals. The topic with the highest media resonance was the „Ultra-thin camera“.

Patentanmeldungen 2004 Patent Applications 2004

(A1)

Dannberg, P.; Wächter, C.;
Miyagawa, N. (Matsushita, Jp.);
Uichida, Y. (Matsushita, Jp.)
Optical Switch
Anmelde-Az.: PCT/JP2004/013019

(A2)

Damm, C.; Peschel, T.; Zeitner, U.-D.;
Feigl, T.; Henrik, B.
**Halterung für optische Elemente und
Verfahren zur Herstellung eines optischen
Systems mit einer solchen Halterung**
Anmelde-Az.: 10 2004 024 755.2

(A3)

Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.;
Völkel, R. (SUSS MicroOptics SA)
**Bilderfassungssystem und
dessen Verwendung**
Anmelde-Az.: 10 2004 003 013.8

(A4)

Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.;
Bitzer, M. (Fresnel Optics)
**Miniaturisiertes Objektiv für digitale Kameras
und Herstellung im Wafer-Maßstab**
Anmelde-Az.: 10 2004 036 469.9

(A5)

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.
**Thermisch stabiler Multilayer-Spiegel für den
EUV-Spektralbereich**
Anmelde-Az.: 10 2004 062 289.2

(A6)

Gatto, A.; Yang, M.; Heber, J.; Kaiser, N.
**Hochreflektiv beschichteter mikro-
mechanischer Spiegel, Verfahren zu dessen
Herstellung sowie dessen Verwendung**
Anmelde-Az.: 10 2004 030 803.9

(A7)

Guyenot, V.; Damm, C.; Müller, E.;
Figulla, H.-R. (FSU Klinikum Jena);
Ferrari, M. (FSU Klinikum Jena)
**Vorrichtung zur Implantation und
Befestigung von Herzklappenprothesen**
Anmelde-Az.: PCT/DE03/02669

(A8)

Heber, J.; Ihlemann, J. (LLG);
Schulz- Ruthenberg, M. (LLG)
Verfahren zur Herstellung optischer Bauteile
Anmelde-Az.: 10 2004 015 142.3

(A9)

Höfer, B.; Bensch, H. (Dräger Safety)
**Driftrohr für ein
Ionenmobilitätsspektrometer**
Anmelde-Az.: 103 47 656.3-54

(A10)

Kaiser, N.; Clausitzer, T.; Kley, E. B. (IAP)
**Diffraktive Elemente mit
Antireflex-Eigenschaften**
Anmelde-Az.: 10 2004 021 903.6

(A11)

Kaless, A.; Scheler, M.; Munzert, P.;
Schulz, U.; Kaiser, N.
**Verfahren zur Herstellung eines strahlungs-
absorbierendesn optischen Elements und
strahlungsabsorbierendes Element**
Anmelde-Az.: 10 2004 043 871.4

(A12)

Kalkowski, G.; Peschel, T.; Damm, C.;
Linke, H. (TU Ilmenau); Schulz, D. (TU Ilmenau);
Moszner, F. (SOLA.r); Moszner, R. (SOLA.r)
Thermischer Solarsektor
Anmelde-Az.: 10 2004 032 091.8

(A13)

Tünnermann, A.; Kley, E. B. (IAP); Kämpfe, T. (IAP)
**Dielektrische Pinhole zur
Ortsfrequenzfilterung von Laserstrahlen**
Anmelde-Az.: 10 2004 058 044.8

(A14)

Palme, M.; Riehemann, S.
Digitaler Projektor für die Perimetrie
Anmelde-Az.: 103 50 836.8

(A15)

Palme, M.; Riehemann, S.;
Lippmann, U.; Notni, G.
**Transmissiometer mit
mehreren spektralen Kanälen**
Anmelde-Az.: 10 2004 070 029.1

(A16)

Scheler, M.; Stöckl, W.; Uhlig, H.; Kaiser, N.
Rückflächenspiegel
Anmelde-Az.: 10 2004 034 369.1

(A17)

Schreiber, P.; Kudaev, S.;
Gorelik, V. (Sennheiser); Hibbing, M. (Sennheiser);
Michaelis, A. (Sennheiser); Niehoff, W. (Senn-
heiser); Büttgenbach, S. (IMT); Feldmann, M.
(IMT); Ihlemann, J. (LLG)
**Sensor bzw. Mikrofon
mit einem solchen Sensor**
Anmelde-Az.: 103 14 731.4

(A18)

Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
**Reflektierende Schichtenfolge mit einer
Deckschicht aus Silizium**
Anmelde-Az.: 103 60 539.8

(A19)

Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
**Reflektierende Schichtenfolge
mit Barrierschichten**
Anmelde-Az.: 103 0 540.1

(A20)

Zeitner, U.-D.; Büttner, A.
Laserresonator
Anmelde-Az.: 10 2004 047 493.1

Deutsche Patenterteilungen 2004 Patent Assignment (Germany)

(P1)

Damm, C.; Weber, C.; Peschel, T.;
Figulla, H.-R. (Klinikum FSU Jena);
Ferrari, M. (Klinikum FSU Jena);
**Vorrichtung zur Befestigung und
Verankerung von Herzklappenprothesen**
Veröffentlichungsnummer: DE 100 10 074

(P2)

Glöckner, S.; Göring, R.
**Schaltanordnung zum Schalten und
Einkoppeln eines Lichtbündels in
mindestens eine Ausgangsfaser**
Veröffentlichungsnummer: DE 197 06 053

(P3)

Guyenot, V.; Risse, S.; Peschel, T.
**Optisches Bauelement und Verfahren
zu dessen Herstellung**
Veröffentlichungsnummer: DE 197 26 644

(P4)

Kalkowski, G.; Damm, C.; Peschel, T.; Kunze, N.
(Philips GmbH); Müller, S. (Philips GmbH)
**Halterung für optische Elemente
sowie Verfahren zur Herstellung**
Veröffentlichungsnummer: DE 103 16 926

(P5)

Kalkowski, G.; Risse, S.;
Gebhardt, A.; Harnisch, G.
**Verfahren zur Ausrichtung eines
optischen Elementes in Bezug
zur Rotationsachse einer Welle**
Veröffentlichungsnummer: DE 100 08 228

(P6)

Kaiser, N.; Heber, J.; Triebel, W. (IPHT);
Mühlig, C. (IPHT)
**Optisches Element, Verfahren zu
seiner Herstellung und zur Bestimmung
seiner optischen Eigenschaften**
Veröffentlichungsnummer: DE 102 13 088

(P7)

Kirschner, V.; Schreiber, W.
**Verfahren zur Bestimmung der räumlichen
Koordinaten von Gegenständen und/oder
deren zeitlicher Änderung und Vorrichtung
zur Anwendung dieses Verfahrens**
Veröffentlichungsnummer: DE 196 37 682

(P8)

Notni, G.; Heinze, M.; Kühmstedt, P.
**Verfahren und Vorrichtung zur
Bestimmung der räumlichen Koordinaten
eines Gegenstandes**
Veröffentlichungsnummer: DE 102 19 054

(P9)

Schreiber, P.; Kudaev, S.; Weichhain, R. (LLG);
Ihlemann, J. (LLG); Hibbing, M. (Sennheiser);
Michaelis, A. (Sennheiser); Niehoff, W. (Senn-
heiser); Gorelik, V. (Sennheiser)
**Anordnung zur optischen Abstand-
bestimmung einer reflektierenden
Oberfläche**
Veröffentlichungsnummer: DE 103 23 336

Patenterteilungen Europa, USA 2004 Patent Assignment (EP, US)

(P10)

Göring, R.; Possner, T.; Schreiber, P.
**Optical arrangement for symmetrizing
the radiation of two-dimensional arrays
of laser diodes**
Veröffentlichungsnummer: US 6,683,727

(P11)

Bräuer, A.; Wolfgang, B.; Schreiber, P.;
Karth, W.; Wächter, C.
Schaltungsanordnung – Systeme de circuit
Veröffentlichungsnummer: EP 1 337 900

(P12)

Schreiber, W.; Notni, G.
**Vorrichtung zur Bestimmung der
räumlichen Koordinaten von Gegenständen –
Device for determining the spatial
co-ordinates of objects**
Veröffentlichungsnummer: EP 1 127 245

(P13)

Zeitner, U. D.; Güther, R.
**Laserresonatoren mit modenselektierenden
Phasenstrukturen –
Laser resonators comprising mode-selective
Phase structures**
Veröffentlichungsnummer: EP 1 295 371

Markenanmeldung 2004 Trade Mark Application

(AM 1)

NANO-motheye
Anmelde-Az.: 304 51 255.9/ 09

Markeneintragungen 2004 Trade Mark Registration

(M1)

Ultraoptik
Aktenzeichen: 304 50 991

(M2)

ultra optics
Aktenzeichen: 304 50 990

(M3)

nanonics
Aktenzeichen: 304 50 992

Gebrauchsmustererteilungen 2004 Utility Patents

(G1)

Feigl, T.; Kaiser, N.; Yulin, S.
**Thermisch stabiles Schichtsystem zur
Reflexion von Strahlung im extremen
ultravioletten Spektralbereich (EUV)**
Veröffentlichungsnummer: 200 23 408.0

(G2)

Schreiber, W.; Kirschner, V.
**Verfahren und Vorrichtung zur
Bestimmung der räumlichen Koordinaten
von Gegenständen**
Veröffentlichungsnummer: 196 37 682

Educational Activities

1. Vorlesungen Lectures

Dr. Ramona Eberhardt
Mikro- und Optikmontage
Fachhochschule Jena

Dr. Volker Guyenot
Mikro- und Optikmontage
Fachhochschule Jena

Dr. Dirk Michaelis
**Computational Physics –
Elektrodynamik mit Matlab**
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Norbert Kaiser
Beschichtungstechnik
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
Mikrostrukturierte Optik
Fachhochschule Jena

2. Diplomarbeiten Diploma Theses

Tina Bräutigam
**Untersuchung der Kratz- und Abriebfestig-
keit optischer Beschichtungen auf Kunststoff**
Fachhochschule Jena, 12/04

Marcel Dusi
**Entwicklung und Erprobung eines
plattformbasierten Aufbaukonzepts für eine
miniaturisierte Strahlkollimationsoptik**
Fachhochschule Jena, 01/04

Ulrike Fuchs
**Theoretische und experimentelle
Untersuchungen zur Propagation ultrakurzer
Laserpulse durch Fokussierungsoptiken**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 11/04

Corina Gräßler
**Laserlithographie auf gekrümmten Ober-
flächen für mikroskopische Anwendungen**
Fachhochschule Jena, 11/04

Lars Heidler
**Entwicklung einer Sensoreinheit für
die 3D-Vermessung von Oberflächen
mit OLED-Display**
Fachhochschule Jena, 10/04

Susanne Krauß
**Untersuchung zum Einfluß der Substrat-
vorbehandlung auf die optischen
Eigenschaften plasmagestützt
abgeschiedener Dünnschichtreflektoren**
Fachhochschule Jena, 12/04

Christian Kunath
**Charakterisierung von
Mikrospiegelarrays im DUV**
Technische Fachschule Wildau, 06/04

Robert Leitel
**Analytik an Gradientenschichten und
Rugate-Strukturen mit ex-situ und in-situ
Spektralphotometrie**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/04

Christoph Munkelt
**Analyse und Optimierung eines optisch-
phasogrammetrischen 3D-Messsystems**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 09/04

Andreas Patschger
**Theoretische und experimentelle
Untersuchungen an bipolaren,
elektrostatischen Halteelementen**
Fachhochschule Jena, 05/04

Carsten Paul
**Entwicklung und Erprobung eines
plattformbasierten Aufbaukonzepts
für miniaturisierte Strahlablenkung**
Fachhochschule Jena, 05/04

Juliane Ratteit
**Untersuchungen zur Defekterkennung an
Oberflächen mittels Streulichtmessverfahren**
Fachhochschule Jena, 12/04

Kristina Roder
**Experimentelle und modellmäßige Unter-
suchungen zu rastersonden-mikroskopischen
Methoden für die Nanometrologie**
Westfälische Hochschule (FH), 05/04

Anke Schegner
**Auswahl, Charakterisierung und Vergleich
von Messverfahren zur Detektion von
Justierstrukturen im sub-µm Bereich**
Fachhochschule Jena, 12/04

Heike Schmidt
**Charakterisierung von Konzentratoren
für high-brightness LEDs**
Fachhochschule Jena, 12/04

Sven Schröder
**Untersuchungen zur Kalibrierung
und Messung des Streulichts optischer
Komponenten bei 193 nm und 157 nm**
Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02/04

Arnold Sonntag
**Untersuchungen an Gaslagerbaugruppen
unter Normalatmosphäre und im Vakuum**
Fachhochschule Jena, 04/04

Melanie Wäcker
**Realisierung eines 3 Chip-Projektors für ein
objektives Perimeter**
Fachhochschule Jena, 02/04

3. Master in Business Administration

Dr. Torsten Feigl
**Start up optix technologies – A Critical Assess-
ment of a Fraunhofer Spin-off Idea**
University of Bradford, 12/04

Dr. Alexandre Gatto
**Resource-based management:
how to reconcile non-profit applied research
with business-like operation –
The Fraunhofer IOF case**
University of Bradford, 12/04

4. Dissertationen Dissertations

Dr.-Ing. Peter Munzert
**Entwicklung von Vakuumbeschichtungs-
prozessen für die Entspiegelung von
Polymethylmethacrylat**
Martin-Luther-Universität Halle, 11/04

5. Ausbildung und Betreuung Training and Supervision

Azubis, Schüler, Praktikanten/
Trainees, Pupils, Interns

Im Fraunhofer IOF wurden im Jahr 2004 ins-
gesamt 11 Schüler und 17 Praktikanten betreut.
Außerdem wurden 8 Jugendliche für einen Beruf
ausgebildet, 4 Physikalaboranten, 3 Industrie-
mechaniker und 1 Bürokauffrau.

In the year 2004 the Fraunhofer IOF supervised
11 pupils and 17 interns. 8 youths were trained
for a profession including 4 laboratory technicians
specialized in physics, 3 industrial mechanics and
1 clerk.

Fair Participations



1. Messebeteiligungen Fair Participations

Control 2004

Fraunhofer-Allianz Vision
Fraunhofer Network „Vision“
11.5.–14.5., Sinsheim, Germany

Analytica 2004

11.5.–14.5., München, Germany

Rapid Tech 2004

25.5.–26.5., Erfurt, Germany

OPTATEC 2004

22.6.–25.6., Frankfurt/M., Germany

Industrierausstellung zur

38. Jahrestagung der DGBMT
22.9.–24.9., Ilmenau, Germany

K 2004

20.10.–27.10., Düsseldorf, Germany

Nanotech 2004

16.11.–18.11., Montreux, Switzerland

Medica/ComPaMed 2004

24.11.–27.11., Düsseldorf, Germany

Euromold 2004

Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping
Fraunhofer Network for Rapid Prototyping
1.12.–4.12., Frankfurt/M., Germany

2. Ausstellungsthemen und Exponate Themes and exhibits

kolibri FLEX: Vermessung der 3D-Form komplexer Objekte

kolibri FLEX: 3D measurement of large objects

Kompakter 3D-Sensor mit OLED-Display

Compact 3D sensor with OLED-Display

Mikrofluidische Systeme für Anwendungen in den Life Sciences

Microfluidic systems for
Life Science Applications

Mikrofluidik-Baukasten

The Microfluidic Tool Box

In-situ Breitband-Monitoring

In-situ broadband monitoring

**Antireflexschichten auf PMMA,
hergestellt durch Ionenätzen**
Antireflection films on PMMA by ion etching

1:3-Mo/Si Schwarzschildobjektiv für EUV,
 $\lambda = 13,5 \text{ nm}$

1:3 Mo/Si Schwarzschild objective for EUV,
 $\lambda = 13,5 \text{ nm}$

Demonstratoren für Silberinselfilme
Demonstrators for silver island films

**Ultradünne Kamera basierend auf
künstlichen Facettenaugen**
Ultra-thin camera based on
artificial apposition compound eyes

LED-Strahlformung
LED beam shaping

Optisches Mikrofon
Optical microphone

Streulicht, Transmission, Reflexion
Light scattering, transmittance, reflectance

3-Chip-Domeprojektor
3-Chip-Domeprojector

**Spiegelbasierter Metrologietisch mit
elektrostatischem Waferchuck**
Mirror based metrology plate with
electrostatic wafer chuck

**Hybride mikrooptische Systeme
auf keramischen Substraten**
Hybrid microoptical systems on
ceramic substrates

**Ultrapräzise Mechanikkomponenten für
optische Systeme**
Ultra-precision machined components for
optical systems

Kratztest für AR-hard@Schichten
Scratch test for AR-hard@ films

**Interferenzschichten auf
Kunststoff und Glas**
Interference films on plastics and glass

Paralleles SPR Diagnostik System
Parallel SPR diagnostic system

Scientific Publications

Wissenschaftliche Publikationen Scientific Publications

Augustin, M.; Böttger, G.; Eich, M.; Etrich, C.; Fuchs, H.; Iliew, R.; Hübner, U.; Kessler, M.; Kley, E.-B.; Lederer, F.; Liguda, C.; Nolte, S.; Meyer, H.G.; Morgenroth, W.; Peschel, U.; Petrov, A.; Schelle, D.; Schmidt, M.; Tünnermann, A.; Wischmann, W.

Photonic crystal optical circuits in moderate index materials

In: Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication, and Characterization (2004) p. 289 ff, ISBN: 3-527-40432-5

Augustin, M.; Iliew, R.; Fuchs, H.-J.; Peschel, U.; Kley, E.-B.; Nolte, S.; Lederer, F.; Tünnermann, A.

Investigation of photonic crystals with a low in-plane index contrast

In: Japanese Journal of Applied Physics 43 (2004) 8 B p. 5805–5808, ISSN 0021-4922

Augustin, M.; Fuchs, H.-J.; Schelle, D.; Kley, E.-B.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Iliew, R.; Etrich, C.; Peschel, U.; Lederer, F.

High transmission and single-mode operation in low-index-contrast photonic crystal waveguide devices

In: Applied physics letters 84 (2004) 5 p. 663–665, ISSN 0003-6951

Banse, H.; Rabe, H.

Laserstrahllöten –

Technologie zum Aufbau optischer Systeme

In: Laser 18 (2004) 3 S. 16–19, ISSN 0938-9172

Bauer, N.; Notni, G.; Zacher, M.

Große und komplexe Teile zuverlässig erfassen

In: Kunststoff-Synthetika (2004) 7 S. 20, ISSN 0023-5598

Beckert, E.; Banse, H.; Schreiber, P.; Dusi, M.

Ein Substrat für Elektronik und Optik

In: Elektronik (2004) 25 S. 54, ISSN 0013-5658

Beckert, E.; Hoch, A.; Hofmann, A.

Greifer werden normgerecht

In: Mechatronik 112 (2004) 5 S. 46–48, ISSN 1619-0424

Brakhage, P.; Notni, G.; Kowarschik, R.

Image aberrations in optical three-dimensional measurement systems with fringe projection

In: Applied Optics – Optical Technology 43 (2004) 16 p. 3217–3223, ISSN 0003-6935

Danz, N.

Exact box-car lifetime measurement of dye fluorescence

In: Sensors & Actuators A 116 (2004) 2 p. 312–319, ISSN 0925-4005

Duparré, A.

Scattering from Surfaces and Thin Films

In: Encyclopedia of Modern Optics (2004) p. 314–321, ISBN 0-12-227600-0

Duparré, J.; Dannberg, P.

Mauroner, O.; Bräuer, A.

Mit den Augen einer Fliege

In: Design & Elektronik (2004) 9 S. 40–43, ISSN 0933-8667

Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.

Bräuer, A.; Tünnermann, A.

Artificial apposition compound eye – fabricated by micro-optics technology

In: Applied Optics – Optical Technology 43 (2004) 22 p. 4303–4310, ISSN 0003-6935

Duparré, J.; Radtke, D.; Dannberg, P.

Implementation of field lens arrays in beam-deflecting microlens array telescopes

In: Applied Optics – Optical Technology 43 (2004) 25 p. 4854–4861, ISSN 0003-6935

Ehrt, D.; Kittel, T.; Will, M.; Nolte, S.

Tünnermann, A.

Femtosecond-laser-writing in various glasses

In: Journal of Non-Crystalline Solids 345–346 (2004) p. 332–337, ISSN 0022-3093

Guyenot, V.

Laser – Optik – Präzision

In: LASER MAGAZIN 3 (2004) 4

Helm, R.; Mauroner, O.

Innovative Spin-offs aus der Forschung als neue Unternehmen.

Zum Stand der empirischen Forschung

In: Arbeits- und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der FSU Jena, Nr. 28 (2004), ISSN 1611-1311

Iliew, R.; Etrich, C.; Peschel, U.; Lederer, F.; Augustin, M.; Fuchs, H.-J.; Schelle, D.; Kley, E.-B.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

Diffractionless propagation of light in a low-index photonic-crystal film

In: Applied Physics Letters 85 (2004) 24 p. 5854–5856, ISSN 0003-6951

Kaless, A.; Schulz, U.; Weber, B.

Durch Ionen-Beschuss zum reflexfreien transparenten Kunststoff

In: K-Zeitung, Ausgabe 18, Messevorschau K-2004 (2004), ISSN 0177-0608

Kaiser, N.

Trends in Optical Coatings

In: Glass Coatings (2004) 2 p. 37

Kley, E.-B.; Wittig, L.-C.; Tünnermann, A.

Microstructure Technology for Optical Component Fabrication

In: Microoptics – From Technology to Applications, Springer Series in Optical Sciences 97 (2004) Ch. 1, ISBN 0-387-20980-8

Limpert, J.; Liem, A.; Reich, M.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.

Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier

In: Optics Express 12 (2004) 7 p. 1313–1319, ISSN 1094-4087

Limpert, J.; Liem, A.; Schreiber, T.; Röser, F.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.

Scaling Single-Mode Photonic Crystal Fiber Lasers to Kilowatts

In: Photonics Spectra 38 (2004) 5 p. 54–65, ISSN 0030-395X

März, R.; Burger, S.; Golka, S.; Forchel, A.; Hermann, C.; Jamois, C.; Michaelis, D.; Wandel, K.

Planar high Index-Contrast Photonic Crystals for Telecom Applications

In: Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication, and Characterization (2004) p. 308–329, ISBN 3-527-40432-5

Nolte, S.; Burghoff, J.; Tünnermann, A.

Fabrication of optical waveguides in dielectrics by femtosecond laser pulses

In: Microoptics – From Technology to Applications, Springer Series in Optical Sciences Vol. 97 (2004) p. 125–142, ISBN 0-387-20980-8

Pertsch, T.; Peschel, U.; Kobelke, J.; Schuster, K.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Bartelt, H.; Lederer, F.

Nonlinearity and disorder in fiber arrays

In: Physical Review Letters 93 (2004) p. 053901, ISSN 1079-7114

Pertsch, T.; Peschel, U.; Lederer, F.; Burghoff, J.; Will, M.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

Discrete diffraction in two-dimensional arrays of coupled waveguides in silica

In: Optics Letters 29 (2004) 5 p. 468–470, ISSN 0146-9592

Peschel, U.; Michaelis, D.; Bakonyi, Z.

Onishchukov, G.; Lederer, F.

Dynamics of Dissipative Temporal Solitons

In: Dissipative Solitons, Series: Lecture Notes in Physics, Vol. 661, p. 161–183, ISBN: 3-540-23373-3

Reitemeier, B.; Notni, G.; Heinze, M.; Schön, C.; Schmidt, A.; Fichtner, D.

Optical Modeling of Extraoral Defects

In: Journal of Prosthetic Dentistry 91 (2004) 1 S. 80–84, ISSN 0022-3913

Riehemann, S.; Wäcker, M.; Palme, M.

Harnisch, G.; Damm, C.; Lippmann, U.; Notni, G.

Projection system for objective, multifocal perimetry

In: Biomedizinische Technik, Band 49, Ergänzungsband 2 (2004) S. 828–829

Ruske, J.-P.; Tünnermann, A.; Fehn, T.
Schnellere Pulse – Neue Anwendungen integriert-optischer Bauelemente
In: Laser+Photonik (2004) 6 S. 34–36, ISSN 1610-3521

Schreiber, T.; Limpert, J.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Hansen, K. P.
High average power supercontinuum generation in photonic crystal fibers
In: Optics Communications 228 (2004) 1–3 p. 71–78, ISSN 0030-4018

Schulz, U.; Kaiser, N.
Optical coating on polymers
In: Manufacturers Forum 1 (2004) 10 p. 1012–14, ISSN 1614-1598, www.manufacturers-forum.de

Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.
Optische Schichten für transparente Kunststoffe
In: Vakuum in Forschung und Praxis 16 (2004) 4 S. 183–186, ISSN 0947-076X

Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.
Vakuumbeschichtung von Kunststoffen für optische Anwendungen
In: Galvanotechnik 95 (2004) 3 S. 726–730, ISSN 0016-4232

Siebenhaar, C.
Precise adjustment method using stroke impulse and friction
In: Precision Engineering 28 (2004) 2 p. 194–203, ISSN 0141-6359

Trompeter, H.; Peschel, U.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.
Tailoring Guided Modes in Waveguide Arrays
In: Optics Express 11 (2003) p. 3404–3411, ISSN 1094-4087

Tünnermann, A.
Optik im Blick
In: GIT: Labor-Fachzeitschrift (2004) S. 994, ISSN 0016-3538

Tünnermann, A.; Limpert, J.; Nolte, S.
Ultrashort Pulse Fiber Lasers and Amplifiers
In: Femtosecond technology for technical and medical applications (2004) p. 35–53, ISBN 3-540-20114-9

Tünnermann, A.; Limpert, J.; Nolte, S.
Ultrashort pulse fiber lasers and amplifiers
In: Topics in Applied Physics 96 (2004) p. 35–53, ISBN 3-540-20114-9

Ultanir, E.; Stegmann, G.I.; Michaelis, D.; Lange, C.H.; Lederer, F.
Dissipative Solitons in Semiconductor Optical Amplifiers
In: Dissipative Solitons, Series: Lecture Notes in Physics, Vol. 661, p. 37–55, ISBN 3-540-23373-3

Zeitner, U. D.; Kaufmann, S.
Das Mehrfarben-Senarmont-Verfahren in der Polarisationsmikroskopie
In: Praktische Metallographie 41 (2004) 2 S. 81–89, ISSN 0032-678X

Zeitner, U. D.; Kaufmann, S.
Schnelle Messungen mit dem Mehrfarben-Senarmont-Verfahren in der Polarisationsmikroskopie
In: Praktische Metallographie 41 (2004) 8 S. 409–417, ISSN 0032-678X

Zeitner, U. D.; Schreiber, P.; Karthe, W.
Modeling of Free-Space Microoptics
In: Microoptics: From Technology to Applications (2004) p. 43–55, ISBN 0-387-20980-8

Zellmer, H.; Tünnermann, A.
Diode-pumped solide-state lasers
In: Lasers and current optical techniques in biology, Comprehensive Series in Photochemical & Photobiological Sciences, ISBN 0-85404-321-7

Zellmer, H.; Nolte, S.; Tünnermann, A.
Kurzpulsfaserlaser: Neue Quellen für die Präzisions-Materialbearbeitung
In: Photonik 36 (2004) 6 S. 40–43, ISSN 1432-9778

Vorträge, Poster, Konferenzbände Lectures, Posters; Proceedings

Augustin, M.; Iliew, R.; Fuchs, H.; Peschel, U.; Kley, E.-B.; Nolte, S.; Lederer, F.; Tünnermann, A.
Highly efficient waveguide bends in low-plane index contrast photonic crystals
Lecture: Photonics West, 24.–29.1.2004, San Jose, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 5360 (2004) p. 156–164, ISBN 0-8194-5268-8

Benoit, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
Radiation stability of Mo/Si multilayer mirrors for EUV lithography
Lecture: 7th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures, 7.–11.3.2004, Sapporo, Japan

Benoit, N.; Yulin, S.; Feigl, T.; Kaiser, N.
Radiation stability of EUV Mo/Si multilayer mirrors
Poster: The 8th International Conference on Surface X-Ray and Neutron Scattering, 28.6.–2.7.2004, Bad Honnef, Germany

Bräuer, A.
Advances in microoptical systems and technologies
Invited Lecture: Samsung (SAIT), October 2004, Korea

Bräuer, A.
Digitale Informationsaufnahme und -wiedergabe mit mikrooptischen Systemen
Vortrag: OPTATEC, 22.–25.6.2004, Frankfurt/M., Deutschland

Bräuer, A.
Microoptical systems for visualisation and sensing
Lecture: Korean Institute of Machinery and Materials, KIMM, April 2004, Korea

Bräuer, A.
Microoptical systems with nanometer-precision optical elements
Lecture: NanoFair, 2004 in Karlsruhe, 23.–24.11.2004, Karlsruhe, Germany

Bräuer, A.
Mikrooptische Systeme – Neue Chancen für Visualisierungstechnik und Sensorik
Vortrag: Zeiss-Kolloquium, 15.06.2004 Jena, Deutschland

Bräuer, A.
Tendenzen bei der Entwicklung mikrooptischer Systeme
Vortrag: OptoNet Workshop Microoptics, 12.5.2004, Jena, Deutschland

Bräuer, A.
Recent developments in microoptical technologies
Lecture: Samsung Electronics, April 2004, Korea

Bräuer, A.
Recent developments in microoptical technologies and systems
Lecture: Korean Polytechnical University (KPU), April 2004, Korea

Bräuer, A.
Trends in the combination of microoptical and mesooptical systems
Lecture: LG Electronics, April 2004, Korea

Bräuer, A.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Zeitner, U. D.; Kudaev, S.; Duparré, J.
Recent advances in micro-optical systems
Invited Lecture: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM, Presentation number C-1, ISBN 3-8274-1603-5

Bräuer, A.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Tünnermann, A.
Small microoptical imaging systems
Lecture: 4th International Symposium on Modern Optics and its Applications (ISMOA 2004), 9.–13.8.2004, Bandung, Indonesia

Bräuer, A.; Streppel, U.; Duparré, J.; Schreiber, P.; Dannberg, P.
Flat illumination and camera systems for 2D and 3D sensing
Poster: Photonics in the Automobile, 29.11.–1.12.2004, Geneva, Switzerland

Bräuer-Burchardt, C.
A Simple New Method for Precise Lens Distortion Correction of Low Cost Camera System
Poster: Pattern Recognition: 26th DAGM Symposium, 30.8.–1.9.2004, Tübingen, Germany
In: Proceedings Pattern Recognition: 26th DAGM Symposium, Tübingen, Germany, August 30–September 1, 2004, p. 570–577, ISBN 3-540-22945-0

Buß, W.; Schreiber, P.; Brode, W.; Heymel, A.; Müller, E.; Barnitzek, Th.; Seifert, D.; Völger, K. W.
Qualification of Glass-Ceramics (LTCC) for Optical and Opto-Electronic Applications
In: Proceedings O.M.P. 2004 p. 119–122

Buß, W.; Schreiber, P.; Brode, W.; Heymel, A.; Müller, E.; Barnitzek, Th.; Seifert, D.; Völger, K. W.
Qualification of Glass-Ceramics (LTCC) for Optical and Opto-Electronic Applications
Vortrag: Begleitender Kongress der O.M.P. Fachmesse, 25.–11.5.2004, Nürnberg, Germany

Buß, W.; Schreiber, P.; Brode, W.; Heymel, A.; Müller, E.; Barnitzek, T.; Bechtold, F.; Seifert, D.; Völger, K.-W.; Pawlowski, B.; Kaschlik, K.
Qualifikation von Glaskeramik (LTCC) für Optische und Optoelektronische Anwendungen
Vortrag: Deutsche IMAPS-Konferenz 2004, 11.–12.10.2004, München, Deutschland

Büttner, A.; Zeitner, U. D.
Intracavity Beamshaping in Waveguide Lasers
In: SPIE Proceedings Vol. 5182 (2003) p. 168–175, ISBN 0-8194-5055-3

Büttner, A.; Kowarschik, R.; Schelle, D.; Kley, E.-B.; Zeitner, U. D.
Design and experimental realisation of monolithic high-brightness diffractive broad area lasers
Poster: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM Presentation number L-43, ISBN 3-8274-1603-5

Dannberg, P.
UV-abgeformte mikrooptische Module
Vortrag: OPTATEC, 22.–25.6.2004, Frankfurt/M., Germany

Duparré, A.
Charakterisierungsverfahren für Mikro- und Nanostrukturen von Oberflächen und Schichten
Eingeladener Vortrag: Institutseminar Fraunhofer IWS, 5.4.2004, Dresden, Deutschland

Duparré, A.
Mess- und Modellierungsmethoden für die Optikcharakterisierung im DUV / VUV
Vortrag: 7. Arbeitstreffen des AK DUV/VUV-Optik, 28.9.2004, Fraunhofer IPMS, Dresden, Deutschland

Duparré, A.
Nano-scale roughness analysis of functional surfaces
Invited Lecture: High Level Expert Meeting of the Competence Center Ultraprecision Surface Figuring (CC UPOB): Production Metrology for Precision Surfaces, 8.–9.11.2004, PTB Braunschweig, Germany

Duparré, A.
Nanostruktur-Design für ultrahydrophobe Oberflächen
Eingeladener Vortrag: VDI/VDE/GMA Meeting, 2.12.2004 Frankfurt/M., Deutschland

Duparré, A.
Oberflächencharakterisierung im Nanometerbereich
Eingeladener Vortrag: Kolloquium Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V., 15.1.2004, Leipzig, Deutschland

Duparré, A.; Ristau, D.
2004 Topical Meeting on Optical Interference Coatings: Measurement Problem
Invited Lecture: OIC – Optical Interference Coatings, 27.6.–2.7.2004, Tucson, Arizona, USA
In: Proceedings Optical Interference Coatings on CD-ROM, (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004) Presentation number WD1

Duparré, J.
Künstliches Facettenauge
Vortrag: OptoNet Workshop Microoptics, 12.5.2004, Jena, Deutschland

Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Nussbaum, P.; Heitger, F.; Tünnermann, A.
Ultra-Thin Camera Based on Artificial Apposition Compound Eyes
Lecture: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM, Presentation number E-2, ISBN 3-8274-1603-5

Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.
Micro-optically fabricated artificial apposition compound eye
Lecture: Electronic Imaging 2004 – Science and Technology, 18.–22.1.2004, San Jose, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 5301 (2004) p. 25–33, ISBN 0-8194-5204-1

Duparré, J.; Schreiber, P.; Dannberg, P.; Scharf, T.; Pelli, P.; Völkel, R.; Hertzog, H.-P.; Bräuer, A.
Artificial compound eyes – different concepts and their application to ultra flat image acquisition sensors
Lecture: Photonics West 2004, 27.–29.1.2004, San Jose, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 5346 (2004) p. 89–100, ISBN 0-8194-5254-8

Duparré, J.; Schreiber, P.; Völkel, R.
Theoretical analysis of an artificial superposition compound eye for application in ultraflat digital image acquisition devices
In: SPIE Proceedings Vol. 5249 (2004) p. 408–418, ISBN 0-8194-5133-9

Eberhardt, R.; Banse, H.; Beckert, E.
Aufbautechniken für mikrooptische Systeme
Vortrag: Optonet Workshop Mikrooptics, 12.05.04, Jena, Deutschland

Eberhardt, R.; Beckert, E.; Banse, H.
Aufbau- und Verbindungstechniken mikrooptischer Systeme
Eingeladener Vortrag: Oberseminar Ferdinand-Braun-Institut, 12.03.04, Berlin, Deutschland

Eberhardt, R.
Aufbau- und Verbindungstechniken für mikrooptische Systeme
Vortrag: OPTATEC, 22.–25.6.2004, Frankfurt/M., Deutschland

Eberhardt, R.; Beckert, H.; Damm, C.; Schreiber, P.
Packaging of Opto-Mechatronic Systems on Miniaturized Ceramic Platforms
Lecture: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM, Presentation number C-5, ISBN 3-8274-1603-5

Elfström, H.; Clausnitzer, T.; Walter, S.; Kaiser, N.; Kley, E.-B.
High efficiency beam splitters with antireflection coating
Poster: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM, Presentation number F-5, ISBN 3-8274-1603-5

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Kaiser, N.
EUV/Soft X-ray optics – trends and challenges
Lecture: ESF-Workshop „Needs & opportunities for Future Light Sources“, 10.–12.10.2004, Propriano, Corsica, France

Feigl, T.; Yulin, S.; Stöckl, W.; Kaiser, N.
Large area sputtering system for EVVL optics
In: Proceedings 2nd EVVL Symposium, 30.9.–2.10.2003 on CD-ROM, Antwerp, Belgium

Feigl, T.; Yulin, S.; Stöckl, W.; Kaiser, N.
Magnetron sputtered multilayer optics
Poster: 7th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures, 7.–11.3.2004, Sapporo, Japan

Feigl, T.; Yulin, S.; Benoit, N.; Stöckl, W.; Kaiser, N.
Magnetron sputtered EUV multilayer optics
Poster: The 8th International Conference on Surface X-Ray and Neutron Scattering, 28.6.–2.7.2004, Bad Honnef, Germany

Feigl, T.
Optics for the XUV spectral region
Lecture: OPTATEC, 22.–25.6.2004, Frankfurt/M., Germany

Feigl, T.
Nanotechnologien in der Optik – Trends und Herausforderungen
Vortrag: Nano-Workshop, 28.9.2004, Jena, Deutschland

Flemming, M.; Duparré, A.
Thin film nanostructures for ultra-hydrophobic transparent surfaces
Lecture and Poster: Photonics Research Ontario Student Forum, 27.9.2004, Ottawa, Canada

Flemming, M.; Hultaker, A.; Reihs, K.; Duparré, A.
Modeling and characterizing thin film nanostructures for ultrahydrophobic surfaces with controlled optical scatter
In: SPIE Proceedings Vol. 5250 (2003) p. 56–63, ISBN 0-8194-5134-7

Flemming, M.; Roder, K.; Duparré, A.
Design and characterization of ultra-hydrophobic coatings
Lecture and Poster: OIC – Optical Interference Coatings, 27.6.–2.7.2004, Tucson, Arizona, USA
In: Optical Interference Coatings on CD-ROM, (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004) Presentation number WE5

Gärtner, C.
Microfluidics: Technology and Application
Lecture: Short Course Photonics West 28.1.2004, San Jose, USA

Gärtner, C.; Becker, H.; Rötting, O.
Fluidic Interfaces from nano to macro - Bridging the gap
Lecture: Workshop MacroNano – Peripherals and Complex Systems for Electronics and Biosensors, 29.–30.9.2003, Ilmenau, Germany

Gärtner, C.; Anton, B.; Becker, H.; Rötting, O.
The microfluidic tool box – concepts and devices for a modular approach to microfluidics
Lecture: Heiligenstädter Kolloquium, 27.–29.9.2004, Heiligenstadt, Germany

Gärtner, C.; Becker, H.; Anton, B.; Rötting, O.
Microfluidic toolbox: tools and standardization solutions for microfluidic devices for life sciences applications
In: SPIE Proceedings Vol. 5345 (2004) p. 159–162, ISBN 0-8194-5253-X

Gatto, A.; Kaiser, N.
Towards resistant VUV coatings for free electron laser down to 150 nm
Lecture: Optical Interference Coatings, 27.6.–2.7.2004, Tucson, USA
In: Optical Interference Coatings on CD-ROM, (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004) Presentation number WF9

Gatto, A.; Yang, M.; Kaiser, N.
Coatings for the next generation micro mechanical mirrors
Lecture: Optical Interference Coatings, 27.6.–2.7.2004, Tucson, USA
In: Optical Interference Coatings on CD-ROM, (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004) Presentation number TUF8

Gebhardt, A.
Diamantendrehen mikrooptischer Strukturen
Vortrag: OptoNet Workshop Microoptics, 12.5.2004, Jena, Deutschland

Gebhardt, A.; Steinkopf, R.
Diamond turning of cylindrical structures for microoptics
Poster: 4th EUSPEN International Conference, 30.5.–3.6.2004, Glasgow, UK
In: EUSPEN conference proceedings, 4th international conference of the European society for precision engineering and nanotechnology (2004) p. 197–198, ISBN 1861941080

Gliech, S.; Duparré, A.
Light scatter technique for application in optics, nanotechnology and engineering
Lecture: International Symposium „Photonics in Measurement“ 23.–24.6.2004, Frankfurt/M., Germany
In: Photonics in measurement: international symposium, Frankfurt/M., 23/24 June 2004 / VDI-Kompetenzfeld Optische Technologien p. 31–37, ISBN 3-18-091844-6

Gliech, S.; Schröder, S.; Duparré, A.
Hochauflösende Streulichnanalyse an optischen Komponenten im VUV bis IR
Vortrag: 105. DGaO Jahrestagung, 1.–5.6.2004, Bad Kreuznach, Deutschland

Gliech, S.; Gessner, H.; Hultaker, A.; Duparré, A.
157 nm and 193 nm scatter, R and T measurement technique
In: SPIE Proceedings Vol. 5250 (2003) p. 137–145, ISBN 0-8194-5134-7

Gliech, S.; Schröder, S.; Duparré, A.
High-sensitivity light scattering measurement of optical coating components
Lecture and Poster: Optical Interference Coatings, 27.6.–2.7.2004, Tucson, USA
In: Optical Interference Coatings on CD-ROM (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004), Presentation number WE2

Guyenot, V.
Nano: Von der Luftfahrt, Optik, Präzisionsmechanik und Herzklappen
Vortrag: Reise in den Nanokosmos, Veranstaltung zum Jahr der Technik, 5.11.2004, Jena, Deutschland

Guyenot, V.
Qualitätssicherung in F & E
Vortrag: DGQ-Arbeitskreis Region Jena, 26.4.2004, Jena, Deutschland

Guyenot, V.; Gebhardt, A.
Simulation, Design und ultrapräzise Fertigung opto-mechanischer Komponenten
Vortrag: OPTATEC, 22.–25.6.2004, Frankfurt/M., Deutschland

Harnisch G.; Peschel, T.; Thorwirth, G.; Rudolph, B.
High-precision assembly of micro-prisms
In: Proceedings 10th International Microoptics Conference MOC'04 on CD-ROM, Presentation number F-54

Heger, P.; Stenzel, O.; Kaiser, N.
Metal island films for optics
In: SPIE Proceedings Vol. 5250 (2004) p. 21–28, ISBN 0-8194-5134-7

Hultaker, A.; Gliech, S.; Gessner, H.; Duparré, A.
Characterization of CaF₂ substrates for VUV fluoride coatings
In: SPIE Proceedings Vol. 5250 (2004) p. 119–126, ISBN 0-8194-5134-7

Kaiser, N.
Coatings for 193 nm and 13.5 nm Trends and Challenges

Invited Lecture: Leybold Optics Precision Optics Symposium, 04.05.2004 Boston, USA;
06.05.2004 San Jose, USA;
10.05.2004 Taipei, Taiwan;
12.05.2004 Tokyo, Japan;
14.05.2004 Shanghai, China;
25.05.2004, Alzenau, Deutschland

Kaiser, N.
Optical components for the XUV
Invited Lecture: 326. WE-Heraeus-Seminar, Thema: XUV Technologies and Applications 7.6.–9.6.2004, Bad Honnef, Germany

Kaiser, N.
Optical coatings for the DUV-, VUV-, EUV-, and soft X-ray spectral region
Lecture: Instructor Short Course – SC225: OIC Topical Meeting, 27.6.–2.7.2004, Tucson, USA

Kaiser, N., Shimshock, R.
Coatings on Plastics
5th International Conference on Coatings on Glass ICCG, 4.–8.7.2004, Saarbrücken, Germany

Kaiser, N., Stenzel, O., Heger, P.
Plasmon boosted absorption in interference coatings
Invited Lecture: 6th Symposium of European Vacuum Coaters, 27.–29.9.2004, Anzio ,Italy

Kaiser, N.
Nanooptik
Invited Lecture: Otti Profiforum Nanotechnologie in der industriellen Anwendung Materialien, Oberflächen und Schichten, 4.–5.10.2004, Regensburg, Deutschland

Kaiser, N.
Optical coatings – recent developments at IOF Jena
Invited Lecture: Séminaire Couches Minces Optiques, 11.–12.10.2004 Marseille, France

Kaiser, N.
Einführung in die Optische Technologie
Eingeladener Vortrag: Otti Profiforum Moderne optische Technologien, 3.12.2003, Regensburg, Deutschland

Kaiser, N.
Optical coatings – trends
Invited Lecture: Mikkeli International Industrial Coating Seminar MIICS-2004, 18.–20.3.2004, Mikkeli, Finland

Kaiser, N.; Heger, P.
Optical coatings – trends
Lecture: OPTATEC Frankfurt/M., 22.–25.6.2004, Frankfurt/M., Germany

Kaiser, N.; Wilbrandt, S.; Stenzel, O.
In-situ broadband monitoring of optical coatings
Lecture and Poster: 5th International Conference on Coatings on Glass, 4.–8.7.2004, Saarbrücken, Germany
In: Advanced coatings on glass & plastics for large-area or high-volume products: Proceedings of the 5th International Conference on Coatings on Glass, ICCG 5, July 4–8, 2004, Germany, p. 429–433

Kaless, A.; Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Nano-motheye antireflection pattern by plasma treatment of polymers
Poster: Ninth International Conference on Plasma Surface Engineering, 13.–17.9.2004, Garmisch-Partenkirchen, Germany

Kaless, A.; Munzert, P.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Stochastische Antireflexstrukturen durch Plasmabehandlung von Polymeroberflächen
Poster: 11. Internationale Fachtagung Polymerwerkstoffe, 29.9.–1.10.2004, Halle, Deutschland

Kaufmann, S.; Zeitner, U. D.; Schache, H.; Kley, E.-B.
Basics for fast and false-color-free birefringence measurements
Poster: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM, Presentation number F-51, ISBN 3-8274-1603-5

Kühmstedt, P.
Mehrbild-3D-Messsysteme in Rapid Prototyping- und Qualitätssicherungs-Prozessketten
Vortrag: VDI-Wissensforum „Optische 3-D-Messtechnik“, 1.–2.7.2004, Aachen, Deutschland

Kühmstedt, P.; Brakhage, P.; Notni, G.
Optische 3D-Messtechnik in der Qualitätssicherung und im Rapid-Prototyping
Vortrag: 3D-Erfahrungsforum Werkzeug- und Formenbau, Rapid-Technologien, 13.–14.5.2004, Dresden, Deutschland

Kühmstedt, P.; Notni, G.
Mehrbild 3-D-Messsystem – Gerätefamilie „KOLIBRI“
Vortrag: 9. Fraunhofer IPA Anwenderforum, 13.10.2004, Stuttgart, Deutschland

Kühmstedt, P.; Notni, G.
Mehrbild-3D-Messsysteme in Rapid Prototyping- und Qualitätssicherungs-Prozessketten
Vortrag: VDI Wissensforum „Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion“, 25.–26.11.2004, Jena, Deutschland

Kühmstedt, P.; Gerber, J.; Notni, G.
Messprozesseignung von Streifenprojektionsmesssystemen
Vortrag: 105. DGAO Jahrestagung, 1.–5.6.2004, Bad Kreuznach, Deutschland

Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Notni, G.
Phasogrammetric optical 3D-Sensor for the measurement of large objects
Lecture: SPIE Photonics EUROPE, 26.–30.4.2004, Strasbourg, France
In: SPIE Proceedings, Vol. 5457 (2004) p. 56–64, ISBN 0-8194-5379-X

Lau, K.; Schulz, U.; Kaiser, N.
Hochbrechende Beschichtungsmaterialien für den UV-Schutz von Polycarbonat
Poster: Internationale Fachtagung Polymerwerkstoffe, 29.9.–1.10.2004 Halle/Saale, Deutschland

Lau, K.; Schulz, U.; Kaiser, N.; Fiz, M.; König, F.
SiO₂ coatings on polycarbonate evaporated from pure and alumina-containing silica granules
Lecture: 5th International Conference on Coatings on Glass ICCG 5, 4.–8.7.2004, Saarbrücken, Germany
In: Advanced coatings on glass & plastics for large-area or high-volume products: Proceedings of ICCG 5, p. 275–279

Lau, K.; Schulz, U.
Optical Coatings on Plastic
Lecture: OPTATEC, Frankfurt/M., 21.–25.6.2004, Frankfurt/M., Germany

Lederer, F.; Pertsch, T.; Peschel, U.; Kobelke, J.; Schuster, K.; Bartelt, H.; Nolte, S.; Tünnermann, A.
Localization and delocalization in disordered nonlinear fiber arrays
Invited Lecture: CLEO 2004, 16.–21.05.2004, San Francisco, USA

Leitel, A.; Trölsch, A.; Waldhäusl, R.; Schreiber, P.; Zeitner, U. D.
LED-Based Projection Displays with Micro-Structured Optical Elements
Poster: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM, Presentation number F-47, ISBN 3-8274-1603-5

Liem, A.; Limpert, J.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Peschel, T.; Guyenot, V.; Broeng, J.; Vienne, G.; Petersson, A.; Jakobsen, C.
Air-clad large-mode-area photonic crystal fibers: power scaling concepts up to the multi-kW range
Lecture: Photonics West, 24.–29.1.2004, San Jose, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 5335 (2004) p. 158–169, ISBN 0-8194-5243-2

Limpert, J.; Liem, A.; Schreiber, T.; Reich, M.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.

High performance ultrafast fiber laser systems

Lecture: Photonics West, 24.–29.1.2004, San Jose, USA

In: SPIE Proceedings Vol. 5335 (2004) p. 245–252, ISBN 0-8194-5243-2

März, R.; Burger, S.; Forchel, A.; Heidrich, H.; Hess, O.; Michaelis, D.; Wandel, K.; Wehrspohn, R.

High-contrast planar photonic crystals

In: SPIE Proceedings Vol. 5597 (2004) p. 68–81, ISBN 0-8194-5550-4

Mauroner, O.

Innovative Spin-offs aus der Forschung

Poster: Tag der Forschung 2004, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 16.11.2004, Jena, Deutschland

Mohaupt, M.; Eberhardt, R.; Beckert, E.; Banse, H.; Siebenhaar, C.; Guyenot, V.

Assembly of optical fibers

Lecture: Micro System Technologies, 7.10.2003, Munich, Germany

Munzert, P.; Schulz, U.

Beschichtung hochtemperaturbeständiger Polymere für die Optik „HT-Polymere“

Poster: 50 Jahre AiF, 19.4.2004, Berlin, Deutschland

Nolte, S.; Will, M.; Burghoff, J.; Wikszak, E.; Tünnermann, A.

3D microstructuring using ultrafast lasers – a new approach for integrated optics

Invited Lecture: OSA Annual Meeting 2004, 12.–13.10.2004, Rochester, USA

Nolte, S.; Will, M.; Burghoff, J.; Wikszak, E.; Tünnermann, A.

Direct writing of photonic devices inside glasses and crystals by femtosecond laser pulses

Invited Lecture: Glass & Optical Materials Division Fall 2004 Meeting/ XIVth International Symposium on Non-Oxide Glasses (ISNOG), 7.–12.11.2004, Cocoa Beach, USA

Nolte, S.; Burghoff, J.; Will, M.; Tünnermann, A.

Femtosecond writing of high quality waveguides inside phosphate glasses and crystalline media using a bifocal approach

Lecture: Photonics West, 24.–29.1.2004, San Jose, USA

In: SPIE Proceedings Vol. 5340 (2004) p. 164–171, ISBN 0-8194-5248-3

Nolte, S.; Will, M.; Burghoff, J.; Tünnermann, A.

Ultrafast Laser Processing – New Possibilities for Photonic Device Production

Invited Lecture: The 5th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM), 11.–14.5.2004, Nara, Japan

Nolte, S.; Will, M.; Burghoff, J.; Tünnermann, A.

Ultrafast laser processing:

New options for 3D photonic structures

Invited Lecture: 34th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE), 3.–8.1.2004, Snowbird, Utah, USA

Notni, G.

Das Prinzip der Phasogrammetrie – flexible automatisierte Erfassung komplexer Objektgeometrien

Eingeladener Vortrag: 19. Optik-Kolloquium, 18.2.2004, Institut für Technische Optik, Stuttgart, Deutschland

Notni, G.

Optische 3D- und Oberflächenvermessung für Qualitätssicherung und Rapid-Prototyping

Eingeladener Vortrag: Fachtagung „Photonik-Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts“, 23.9.2004, Stuttgart, Deutschland
In: Tagungsband Fachtagung „Photonik – Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts“, 23.9.2004, Stuttgart, Deutschland, S. 11–14

Notni, G.

Optische 3D-Datenerfassung und -verarbeitung – Messen im 3D-Bild

Vortrag: Seminar ZBS Ilmenau, 24.9.2004, Ilmenau, Deutschland

Notni, G.

Streifenprojektionstechniken

Vortrag: Seminararbeit VDI-Wissensforum „Optische 3-D-Messtechnik“, 1.–2.7.2004, Aachen, Deutschland

Notni, G.

Triangulationsbasierte Verfahren – Lichtschnitt- und Streifenprojektionstechniken

Vortrag: VDI Wissensforum: „Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion“, 25.–26.11.2004, Jena, Deutschland

Notni, G.; Kühmstedt, P.

Multi-view 3-D-Messtechniken mit Streifenprojektion

Vortrag: Friedrich-Schiller-Universität Jena, 14.7.2004, Jena, Deutschland

Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.

Acceptance test, reverification and measurement capability of self-calibrating multi-view fringe projection systems

Lecture: MEKO-Konferenz 8th Int. Symposium on „Measurement and Quality Control in Production ISMQ 2004“, 3.10.2004, Erlangen, Germany

Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.

Flexible phasogrammetrische 3D-Messsysteme zur Rundumvermessung

Vortrag: 105. DGaO Jahrestagung, 1.–5.6.2004, Bad Kreuznach, Deutschland

Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.

Systemkonfigurationen phasogrammetrischer 3D-Messsysteme – Anwendungsbeispiel –

Vortrag: 3. Oldenburger 3D-Tage, 28.1.2004, FH Oldenburg/IAPG, Deutschland
In: Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage, S. 30–37, ISBN 3-87907-407-0

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

OLED Based Fringe Projection System for Microshape Measurement

Lecture: International Symposium „Photonics in Measurement“, 23.–24.6.2004, Frankfurt/M., Germany

In: VDI-Berichte 1844 (2004) p. 349–356, ISBN 3-18-091844-6

Notni, G.; Riehemann, S.; Kühmstedt, P.; Heidler, L.; Wolf, N.

OLED microdisplays – a new key element for fringe projection setups

Lecture: SPIE conference „Interferometry XII: Applications“, 4.–5.8.2004, Denver/Colorado, USA
In: SPIE Proceedings, Vol. 5532 (2004) p.170–177, ISBN 0-8194-5470-2

Notni, G. H.; Kühmstedt, P.; Notni, G.

3D Face Scanning for Medical Applications

Lecture and Poster: Photonics Research Ontario Student Forum, 27.9.2004, Ottawa, Canada

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

Ultrakompakte Projektionsköpfe für die optische Messtechnik auf der Basis von OLED-Displays

Poster: 105. DGaO Jahrestagung, 1.–5.6.2004, Bad Kreuznach, Deutschland
In: Proceedings 105. DGaO Jahrestagung on CD-ROM

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

OLED based projection systems for optical metrology

Lecture: SID-ME Chapter Spring 2004 Meeting, 25.3.2004, Frankfurt/M., Germany

Riehemann, S.; Wäcker, M.; Palme, M.;

Harnisch, G.; Damm, C.; Lippmann, U.; Notni, G.

Realisierung eines Kuppelprojektionssystems

Poster: 105. DGaO Jahrestagung, 1.–5.6.2004, Bad Kreuznach, Deutschland
In: Proceedings 105. DGaO Jahrestagung on CD-ROM

Riehemann, S.; Wäcker, M.; Palme, M.;

Harnisch, G.; Damm, C.; Lippmann, U.; Notni, G.

Projection system for objective multifocal perimetry

Lecture: BMT 2004 – 38. Jahrestagung der DGBMT, 22.–24.9.2004, Ilmenau, Germany

Risse, S.
Doppelsphärische Luftlager aus Glas und Glaskeramik
Vortrag: Technische Akademie Esslingen, 11.–12.2.2004, Esslingen, Deutschland
In: Tagungsband Luftlagerungen – Grundlagen und Anwendungen Nr. 29894/68.642

Risse, S.
Investigation on self-acting air bearings made of glass-ceramic and manufacturing processes
Poster: 4th EUSPEN International Conference 30.5.–3.6.2004, Glasgow, UK
In: EUSPEN conference proceedings, 4th international conference of the European society for precision engineering and nanotechnology (2004) p. 203–204, ISBN 1861941080

Risse, S.; Peschel, T.
Von der Simulation zum Prototypen – Anwendung von low CTE-Materialien für die Präzisionsoptik, Lithographie und Feinmechanik
Vortrag: 7. OPTATEC, 22.–25.6.2004, Messegelände Frankfurt/M., Deutschland

Ristau, D.; Ehlers, H.; Kaiser, N.; Stenzel, O.; Gäbler, D.
Ion-assisted deposition processes: industrial network Intlon
In: SPIE Proceedings Vol. 5250 (2004) p. 646–655, ISBN 0-8194-5134-7

Schäfer, B.; Danz, N.; Harz, M.
Parallel SPR Diagnostic System
Lecture: Photonics West 24.–29.1.2004, San Jose, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 5327 (2004) p. 74–79, ISBN 0-8194-5235-1

Schallenberg, U.; Schulz, U.
Multicycle AR coatings: A Theoretical Approach
Lecture: Optical Systems Design, 30.9.–3.10.2003, St. Entienne, France

Schreiber, P.; Höfer, B.; Dannberg, P.; Zeitner, U. D.
Fiber-coupling of high-brightness laser diode bars
Lecture: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM, Presentation number C-7, ISBN 3-8274-1603-5

Schreiber, P.; Kudaev, S.; Gebhardt, A.; Dannberg, P.
Confocal optical microphone
Poster: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM, Presentation number F-49, ISBN 3-8274-1603-5

Schreiber, P.
Optische Mikrofone
Vortrag: OPTATEC, 22.–25.6.2004, Frankfurt/M., Deutschland

Schreiber, P.
Mikrooptische Abstandssensoren
Vortrag: Jenaer Technologietag 2004, 13. 9.2004, Jena, Deutschland

Schreiber, P.; Kudaev, S.; Gorelik, V.; Peissig, J.
Fiber-Coupled Optical Microphones
Lecture: Audio Engineering Society 116th Convention, 8.–11.5.2004, Berlin, Germany

Schreiber, P.
Mikrooptik Design
Vortrag: OptoNet Workshop Microoptics, 12.5.2004, Jena, Deutschland

Schulz, U.
AR-hard-coating with spectral bandwidth for plastic optics
Lecture: Mikkeli International Industrial Coating Seminar, 18.–20.3.2004, Mikkeli, Finland
In: Proceedings Mikkeli International Industrial Coating Seminar, 18.–20.3.2004, Mikkeli, Finland
www.miics.net

Schulz, U.; Kaless, A.; Kaiser, N.
Antireflection of Acrylic by low-pressure plasma treatment
Lecture: 6th Symposium of European Vacuum Coaters, 27.–29.9.2004, Anzio, Italy

Schulz, U.; Kaless, A.; Kaiser, N.
Nano-motheye antireflection pattern by ion bombardment of polymers
Lecture: 9th International Conference on Plasma Surface Engineering, 13.–17.9.2004 Garmisch Partenkirchen, Germany

Schulz, U.; Lau, K.; Bräutigam, T.; Kaiser, N.
Mechanische Eigenschaften von Antireflexschichten AR-hard auf Kunststoffen
Vortrag: 12. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, 14.–15.10.2004, Dresden, Deutschland
In: Tagungsband 12. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, 14.–15.10.2004, Dresden, S. 26–33

Schulz, U.
Plasma-ion assisted deposition of optical coatings on thermoplastic polymers
Lecture: Optical Interference Coatings, 27.6.–2.7.2004, Tucson, USA
In: Optical Interference Coatings on CD-ROM, (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004) Presentation number WA1

Schulz, U.; Kaiser, N.; Schallenberg, U.
AR-hard broadband antireflective coatings generated by a controlled needle-optimization technique
Lecture and Poster: Optical Interference Coatings, 27.6.–2.7.2004, Tucson, USA
In: Optical Interference Coatings on CD-ROM, (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004) Presentation number ThB2

Stenzel, O.
Resonant reflection and absorption in grating waveguide structures
Invited Lecture: Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies VIII, 26.1.2004, San Jose, USA
In: SPIE Proceedings Vol. 5355 (2004) p. 1–13, ISBN 0-8194-5263-7

Stenzel, O.
Understanding the optical properties of optical coating materials
Lecture: Short course: OIC, 27.6.2004, Tucson, Arizona, USA

Stenzel, O.; Kaiser, N.
Laterally heterogeneous optical films as design tools for reflectors and absorbers
In: SPIE Proceedings Vol. 5250 (2004) p. 46–55, ISBN 0-8194-5134-7

Stenzel, O.; Gäbler, D.; Kaiser, N.; Tikhonravov, A. V.; Trubetskov, M. K.; Kokarev, M. A.; Amotchikina, T. V.
Refractive indices of SiO₂ and Nb₂O₅ Mixture Films
Lecture: International conference „Applied Optics“, 18.–21.10. 2004, St.-Petersburg, Russia 2004
In: Proceedings Vol. III p. 34–38

Stenzel, O.; Wilbrandt, S.; Leitel, R.; Gäbler, D.; Kaiser, N.
Non-optical characterization of gradient index layers and rugate filters
Lecture and Poster: Optical Interference Coatings, 27.6.–2.7.2004, Tucson, USA
In: Optical Interference Coatings on CD-ROM, (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004) Presentation number WB2

Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.
Selbstorganisierte Filamentierung UV-sensitiver Polymere bei partiell-kohärenter Bestrahlung
Vortrag: 105. Jahrestagung der DgaO, 1.–5.6.2004, Bad Kreuznach, Deutschland

Tikhonravov, A. V.; Trubetskov, M. K.; Amotchkina, T. V.; Kokarev, M. A.; Kaiser, N.; Stenzel, O.; Wilbrandt, S.

General approach to the synthesis of rugate coatings

Lecture: International conference „Applied Optics“, 18.–21.10. 2004, St.-Petersburg, Russia

Triebel, P.; Weissbrodt, P.; Nolte, S.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.

Application of the rigorous treatment for the characterization of sub-micron structures on photomasks

In: SPIE Proceedings Vol. 5375 (2004) p. 1156–1163, ISBN 0-8194-5288-2

Trompeter, H.; Peschel, U.; Pertsch, T.; Lederer, F.; Streppel, U.; Michaelis, D.; Bräuer, A.

Tailoring defect modes in waveguide arrays

Lecture: CLEO 2004, 16.–21.5.2004, San Francisco, USA

Tünnermann, A.; Nolte, S.; Zellmer, H.

Fiber lasers and amplifiers: novel avenues to real-world applications of ultrashort lasers

Invited Lecture: The 5th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM), 11.–14.5.2004, Nara, Japan
In: SPIE Proceedings Vol. 5662 (2004) p. 488–495, ISBN 0-8194-5623-3

Tünnermann, A.; Limpert, J.; Nolte, S.; Zellmer, H.

High power femtosecond fiber CPA system: Design and applications

Invited Lecture: CLEO 2004, 16.–21.5.2004, San Francisco, USA

Tünnermann, A.; Schreiber, T.; Augustin, M.; Limpert, J.; Will, M.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Iliew, R.; Peschel, U.; Lederer, F.

Photonic crystals in ultrafast optics

In: Advances in Solid State Physics, Spring Meeting of the „Deutsche Physikalische Gesellschaft“ Regensburg, Germany, 44 (2004) p. 117, ISBN 3-540-21148-9

Uhlig, H.

Messungen der Transmission und Reflexion von optischen Schichten mit dem Lambda 900

Vortrag: Colloquium Optische Spektroskopie, 13.–14.9.2004, Berlin, Deutschland

Wächter, C.

Design tools and modelling techniques for integrated optics devices: requirements and applications

Invited in: Proceedings of SPIE Vol. 5451 (2004) p. 85–95, ISBN 0-8194-5374-9

Wächter, C.

Ring Resonators:

Materials, Technologies, Limits

In: AIP Proceedings of the 39th International School of Quantum Electronics „Microresonators as Building Blocks for VLSI Photonics“ (2004) p.167–168, ISBN 0-7354-0184-5

Wächter, C.;

Exploring the integrated optics software landscape

Invited Lecture: NATO Advanced Research Workshop „Frontiers in Planar Lightwave Circuit Technology“ 21.–25.9.2004, Ottawa, Canada

Wächter, C., Michaelis, D.

Analysis of fiber-chip coupling for general high index contrast waveguides

Invited Lecture: Photonics North, 21.–25.9.2004, Ottawa, Canada

Wilbrandt, S.; Leitel, R.; Gäbler, D.;

Stenzel, O.; Kaiser, N.

In-situ broadband monitoring and characterization of optical coatings

Lecture and Poster: Optical Interference Coatings, 27.6.–2.7.2004, Tucson, USA
In: Optical Interference Coatings on CD-ROM, (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004) Presentation number TUE6

Will, M.; Burghoff, J.; Limpert, J.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.

High speed fabrication of optical waveguides inside glasses using a high repetition-rate fiber CPA system

Lecture: Photonics West 24.–29.1.2004, San Jose, USA

In: SPIE Proceedings Vol. 5339 (2004) p.168, ISBN 0-8194-5247-5

Yang, M.; Gatto, A.; Kaiser, N.

Narrow bandpass filters for the VUV spectral region

In: Optical Interference Coatings on CD-ROM, (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004) Presentation number THE7

Yang, M.; Liu, J.; Chen, Q.; Zhang, B.

Uniformity analysis and design optimization of multi-layer thin film filter used in fiber optics communication system

In: SPIE Proceedings Vol. 5250 (2004) p. 691–696, ISBN 0-8194-5134-7

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

EUV/Soft X-Ray Multilayer Optics

Lecture: The SPIE's International Symposium Photonics Asia, 8.–12.11. 2004, Beijing, China

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

Development of EUV/Soft-X ray multilayer optics in IOF

Invited Lecture: 7th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures, 7.–11.3.2004, Sapporo, Japan

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

Enhanced reflectivity and stability of EUV multilayers

Invited Lecture: Workshop X-ray Optics-, 2.–6.5.2004, Nizhny Novgorod, Russia

Yulin, S.; Schäfers, F.; Feigl, T.; Kaiser, N.

High – performance Cr/Sc multilayers for the soft X-ray range

In: SPIE Proceedings Vol. 5193 (2004) p. 172–176, ISBN 0-8194-5066-9

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

Enhanced reflectivity and stability of Sc/Si multilayers

In: SPIE Proceedings Vol. 5193 (2004) p. 155–163, ISBN 0-8194-5066-9

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

High-temperature MoSi₂/Si and Mo/C/Si/C multilayer mirrors

Poster: 3rd International EUVL Symposium, 1.–4.11.2004, Miyazaki, Japan

Zeitner, U. D.

Laser-Mode Engineering by Generalized Resonator Concepts

Invited in: SPIE Proceedings Vol. 5182 (2003) p.161–167, ISBN 0-8194-5055-3

Zeitner, U.; Kaufmann, S.; Kley, E.-B.

Micro-optical sensor system for birefringence characterization of textile-fibers

In: SPIE Proceedings Vol. 5183 (2003) p. 79–84, ISBN 0-8194-5056-1

Zeitner, U. D.; Gräßler, C.

Laser-lithography for micro-optics on curved surfaces

Lecture: 10th International Microoptics Conference MOC'04, 1.–3.9.2004, Jena, Germany
In: Proceedings MOC'04 on CD-ROM, Presentation number E-8, ISBN 3-8274-1603-5

Der Weg zu uns

How to reach us

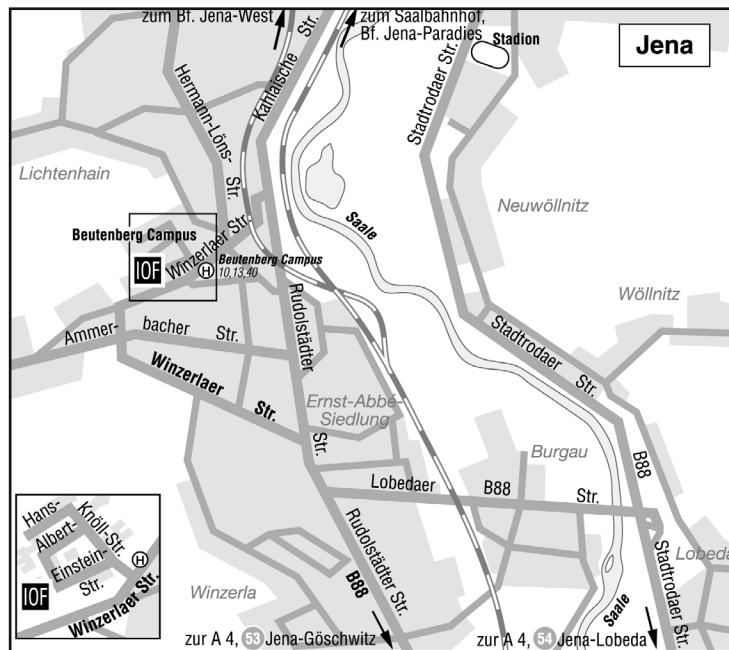
Der Weg zu uns

Bahn/Busverbindung

(ca. 20 Minuten inkl. Gehweg)

Ab Bahnhof Jena-Paradies (Nord-Süd-Verbindung) ca. 5 Minuten Fußweg in die Innenstadt. Von dort aus ab Teichgraben mit den Linien 10, 13 oder 40 in Richtung Burgau oder Winzerla. An der Haltestelle »Beutenberg Campus« aussteigen und der Ausschilderung folgen.

Ab Westbahnhof (Ost-West-Verbindung) ca. 1 Minute zur Haltestelle Magdelstieg, dann die gleiche Busverbindung nutzen.



Auto

Autobahn A 4 bis Abfahrt Jena-Göschwitz. Auf der Bundesstraße B 88 stadteinwärts, links in Richtung Winzerla, entlang der Winzerlaer Straße immer der Ausschilderung »Fachhochschule – Beutenberg Campus« folgen. Auf der linken Seite liegt dann sichtbar das Fraunhofer IOF. Benutzen Sie die Einfahrt Beutenberg Campus, von dort aus folgen Sie der Ausschilderung.

Flugzeug

Ab Flughafen Leipzig/Halle auf der Autobahn A 9 nach Süden bis zum Hermsdorfer Kreuz und dann auf die A4 Richtung Frankfurt wechseln; diese dann bei Jena-Göschwitz verlassen, weiter siehe Auto.

Oder ab Flughafen Erfurt auf der Autobahn A 4 Richtung Dresden bis Abfahrt Jena-Göschwitz.

How to reach us

By train

(app. 20 minutes with footpath)
Jena 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 Campus" und 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 westward (direction Frankfurt) and leave it at the exit Jena-Göschwitz, further see car.

Or starting from airport Erfurt on the A4 motorway direction Dresden to exit Jena Göschwitz.

**Herausgeber
Editor**

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Optik und Feinmechanik
Beutenberg Campus
Albert-Einstein-Straße 7
07745 Jena
Telefon: +49 (0) 36 41/8 07-0
Fax: +49 (0) 36 41/8 07-6 00
E-Mail: info@iof.fraunhofer.de
Internet: www.iof.fraunhofer.de

**Institutsleiter
Director**

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

**Strategie/Marketing/Kommunikation
Strategy/Marketing/Communication**

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

**Redaktion
Editorial staff**

Dr. Brigitte Weber
Sylvia Bathke

**Gestaltung und Druck
Graphic design and Print**

Schneider Media GmbH
Haarbergstraße 47
99097 Erfurt

**Abbildung Seite 1
Figure page 1**

Kompakte und hohle Konzentratoren
für Hochleistungs LEDs, hergestellt durch
Einkorn-Diamantdrehen.
Solid and hollow concentrators for
high-power LEDs manufactured
by single-point diamond turning.

**Bildnachweis
Picture sources**

Seite 6:
linke Spalte oben (1. und 2. Bild):
FSU Jena, IAP;
linke Spalte unten: Armin Maywald, Bremen;
oben, von links nach rechts:
Peter Vukusic in Optical Interference Coatings
(Eds: N. Kaiser, H. K. Pulker), Springer-Verlag
2003, ISBN 3-540-00364-9; Fraunhofer IOF; FSU
Jena, IAP; Fraunhofer IOF; FSU Jena, IAP

Seite 7:
oben, von links nach rechts:
Fraunhofer-Gesellschaft; FSU Jena, IAP;
<http://www.jugend-forscht.de>;
Berthold Leibinger Stiftung (2x)

Seite 8:
linke Spalte oben (1. und 2. Bild): Andreas Liem

Seite 10:
FSU Jena, IAP

Seite 18:
von links nach rechts: Fraunhofer FEP; Fraunhofer
ILT; Fraunhofer IOF

Seite 19:
von links nach rechts: Fraunhofer IPM; Fraunhofer
IST; Fraunhofer IWS

Seite 34:
Abb. 1: FSU Jena, IAP

Seite 37:
Abb. 4: FSU Jena, IAP

Seite 39:
Abb. 1: FSU Jena, IAP

Seite 52:
Abb. 2: www.dbu.de

Alle anderen Bilder
(all of the other pictures):
Fraunhofer IOF



