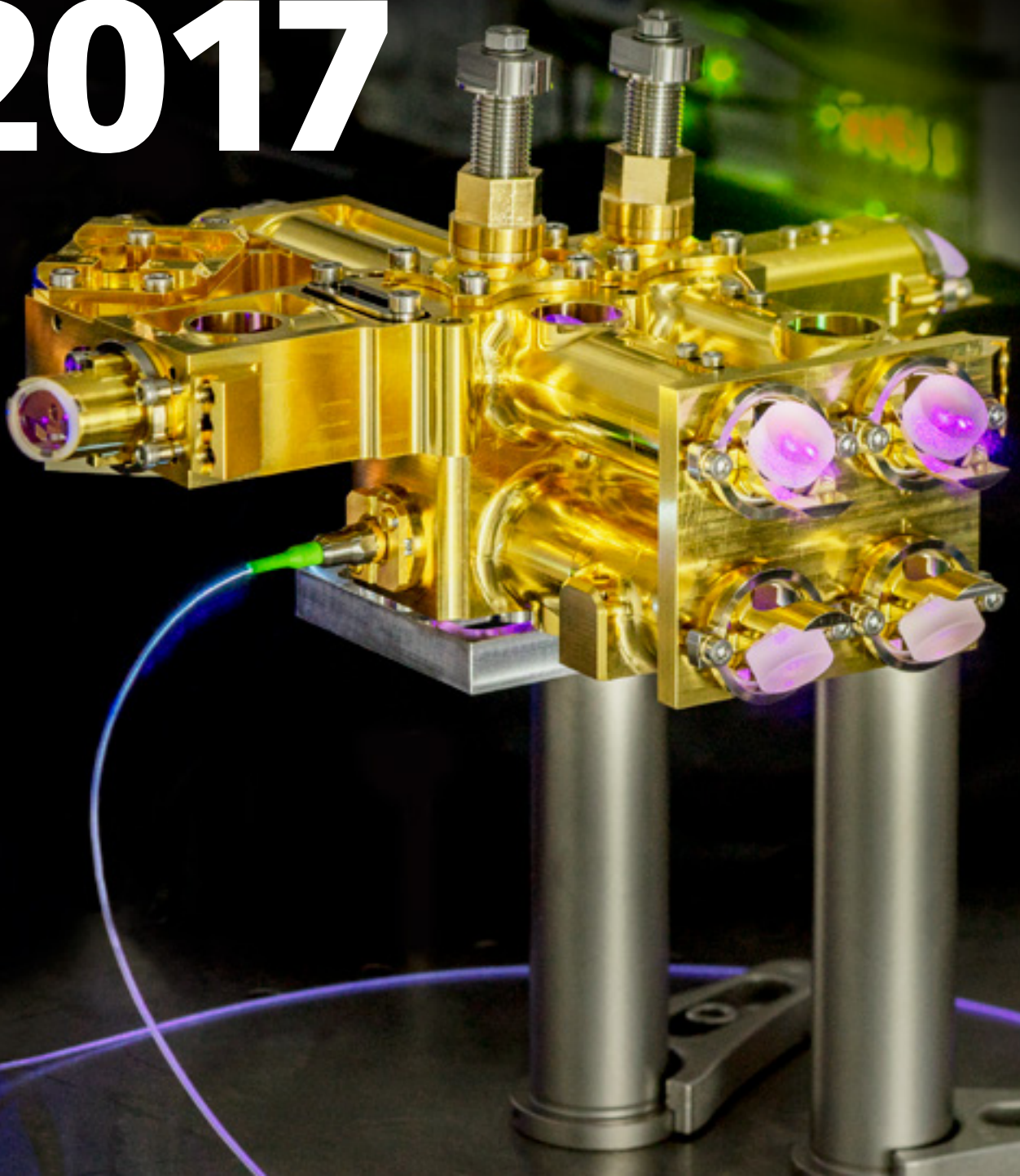


JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2017



A stylized sunburst graphic with a central white circle and several thin white lines radiating outwards, positioned behind the text.

we love photonics

COVER *Der Trend zur digitalen Vernetzung und zum schnellen Informationsaustausch schreitet weiter fort. Auch sicherheitstechnisch sensible Bereiche, wie vernetzte Fabriken oder die Steuerung von systemrelevanten Anlagen, wollen die Vorteile der schnellen Kommunikation für sich nutzen, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Ein sicherer Austausch von Informationen ist dafür die Grundvoraussetzung. Experten des Fraunhofer IOF haben eine verschränkte Photonenquelle zur sicheren Quantenkommunikation entwickelt. Durch die Erzeugung von Photonenpaare, die sich wie Zwillinge gleichen und deren Quantenzustände voneinander abhängig sind, kann eine physikalisch abhörsichere Kommunikation erreicht werden – weitere Informationen auf Seite 67. |*

The trend towards rapid, digital communication is continuing. Even security-sensitive areas such as production facilities want to benefit from the advantages of fast information exchange. Therefore, a secure communication is essential. Experts from the Fraunhofer IOF have developed an entangled photon source for safe quantum communication. By generating pairs of photons a physically tamper-proof communication can be achieved. From the source, an entangled photon is sent back to the transmitter and the other to the receiver. Interception or manipulation at one point would cause the state of both photons to change at the same time. This change indicates that a third party is attempting to obtain information illegally and enables an immediate response. Additional information on page 67.

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2017**

VORWORT

PREFACE

Das letzte Jahr war ein großes Jahr der Photonik. Mit der Verleihung des Physiknobelpreises für die Messung von Gravitationswellen wurde ein Schlaglicht auf die Photonik geworfen. Heutige Gravitationswelleninterferometer sind so genau, dass sie mit Hilfe von Licht die Strecke von der Erde bis zum Mond mit einer Genauigkeit von einem Protonendurchmesser detektieren können. Auch in der Physik des ganz Kleinen, der Welt der Quanten, kündigte sich im vergangenen Jahr ein Paradigmenwechsel an. Die Quantenmechanik ist eine der folgenreichsten Entdeckungen der Menschheit. Indes rückt ein radikal neues Quanten-Paradigma in den Fokus: Quantenobjekte werden einzeln gesteuert und genutzt. »Schrödingers Katze« wird vom Gedankenexperiment zur aufregenden und anwendbaren Realität. Quantenobjekte versprechen Veränderungen in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft.

Ich bin der festen Überzeugung, dass sich die Quantenphotonik als Enabler durchsetzen wird. Daher freue ich mich ganz besonders, dass wir im abgelaufenen Jahr eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit externen Partnern in diesem aufregenden Zweig der Photonik beginnen konnten. So konnte im Bereich der Quantenkommunikation die Entwicklung der ersten europäischen, weltraumtauglichen Quelle für verschränkte Photonenpaare realisiert werden. Die Aktivitäten werden ab 2018 durch eine Attract-Gruppe erweitert, um die Vision eines schnellen, optischen Quanteninternets Realität werden zu lassen.

Bei optischen Abbildungen stellt die Quantentechnologie aktuelle Auflösungsgrenzen infrage: Können mit Hilfe exotischer Quantenzustände optische Anwendungen entwickelt werden, die neue Maßstäbe in der Auflösung setzen und dabei Lichtintensitäten verwenden, die für lebende Strukturen unschädlich sind? Im Herbst des vergangenen Jahres startete hierzu das Fraunhofer-Leitprojekt QUILT. Es wird vom Fraunhofer IOF geführt und bündelt die Expertise fünf weiterer

The last year has been a great year for photonics. With the award of the Nobel Prize in Physics for the measurement of gravitational waves, a special highlight was put onto photonics. Present gravitational wave interferometers are so precise that with the aid of light, they can detect the distance from the earth to the moon with the precision of a proton diameter. In physics of the very small, the world of quanta, the last year also represented a paradigm shift. Quantum mechanics is one of the momentous discoveries of human kind. Meanwhile, a radically new quantum paradigm came to the fore: quantum objects are being operated and used separately. "Schrödinger's cat" is turning from a thought experiment into an exciting and applied reality. Quantum objects promise changes in science, economy, and society.

I am convinced that quantum photonics will prevail as an enabler. Hence, I am especially pleased about the series of research and development projects with external partners in this exciting branch of photonics that we were able to start within the last year. Thus, in the field of quantum communication, the development of the first European space qualified source for entangled photon pairs was realized. As of 2018, the activities will be extended by an attract group in order to realize the vision of a fast quantum optic internet.

In optical image processing, quantum technologies questions current resolution limits. One key question is, if it is possible to develop quantum-optical applications that set new standards of resolution and use wavelength or light intensities which do not harm living cells? For this purpose, the Fraunhofer leading project QUILT was launched last autumn. It is led by the Fraunhofer IOF and brings together the expertise of five other Fraunhofer institutes, one Max Planck institute as well as one institute of the Austrian Academy of Sciences. At the same time, the innovation center for quantum optics and sensor technology (InQuoSens) has been launched as a State initiative



Fraunhofer-Institute sowie eines Max-Planck-Instituts und eines Instituts der österreichischen Akademie der Wissenschaften. Zeitgleich startete das Innovationszentrum für Quantenoptik und -sensorik (InQuoSens) als Landesinitiative zur Entwicklung der Quantentechnologien, das in 2018 um eine Thüringer Forschergruppe (FOQOUS) erweitert werden wird.

Ich bin besonders stolz darauf, dass es uns im letzten Jahr gelungen ist, mit der »Max Planck School of Photonics« zur Förderung ausgewählt worden zu sein. Diese zielt darauf ab, eine globale Vorreiterstellung in der akademischen Nachwuchsförderung zu übernehmen. Hierzu ist es uns gelungen, ein Netzwerk zu formen, das in der Welt seinesgleichen sucht. Die Initiative wird zukünftig ca. 60 der besten Masterstudenten sowie mehr als 100 exzellenten Doktoranden ein akademisches »Zuhause« bieten.

Auch im Bereich der wissenschaftlichen Anwendungen wurde Neuland betreten. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der FSU und unserem Spin-Off »Active Fiber Systems GmbH« wurde das Herzstück des brillantesten Attosekundenlasersystems an die europäische »Extreme Light Infrastructure« ausgeliefert. Es wird Forschern aus aller Welt helfen, die Dynamik der Atome noch besser zu verstehen.

Die Feierlichkeiten zum 25-jährigen Bestehen des Fraunhofer IOF boten einen festlichen und würdigen Rahmen für die Eröffnung des Fasertechnologiezentrums. Mit diesem vervollständigenden wir die Prozesskette der Faserlaserentwicklung. Ich möchte mich an dieser Stelle insbesondere bei den Partnern aus Industrie, Gesellschaft, Politik und Wissenschaft bedanken, die dieses privat-öffentliche Partnerschaftsprojekt erst möglich gemacht haben.

Das vergangene Jahr brachte auch wichtige personelle Veränderungen. Der stellvertretende Institutsleiter Prof. Norbert Kaiser und der Leiter der Arbeitsgruppe »Microstructure Technology« am Institut für Angewandte Physik, Dr. Ernst-

für die Entwicklung von Quantentechnologien, die durch eine thüringische Forschungsgruppe (FOQOUS) im Jahr 2018 erweitert wurde.

Ich bin besonders stolz darauf, dass es uns im letzten Jahr gelungen ist, mit der »Max Planck School of Photonics« zur Förderung ausgewählt worden zu sein. Diese zielt darauf ab, eine globale Vorreiterstellung in der akademischen Nachwuchsförderung zu übernehmen. Hierzu ist es uns gelungen, ein Netzwerk zu formen, das in der Welt seinesgleichen sucht. Die Initiative wird zukünftig ca. 60 der besten Masterstudenten sowie mehr als 100 exzellenten Doktoranden ein akademisches »Zuhause« bieten.

In the field of applied sciences, new ground has also been broken. In collaboration with the Institute of Applied Physics of the FSU and our spin-off Active Fiber Systems GmbH, the centerpiece of the most brilliant attosecond laser system was delivered to the European "Extreme Light Infrastructure". It will help researchers around the world to better understand the dynamics of atoms.

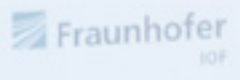
The celebrations for the Fraunhofer IOF's 25th anniversary offered a celebratory and worthy framework for the opening of the fiber technology center. With the opening of the fiber technology center, we complete the process chain of fiber lasers. At this point, I would like to thank the partners from industry, society, politics, and science who have made this public-private partnership possible.

The past year also brought personnel changes. The deputy institute director Prof. Norbert Kaiser and the long-time head of the working group "Microstructure Technology" at the Institute of Applied Physics, Dr. Ernst-Bernhard Kley, retired. With their work of many years, both of them had an ongoing impact on Jena as epicenter for the study of optics. Dr. Ramona Eberhardt, head of the department for precision engineering, and Prof. Stefan Nolte, head of the working group Ultrafast Optics, follow as deputy institute directors. Dr. Kley handed over the direction of his group to Dr. Uwe Zeitner, head of department

LÖSUNGEN MIT LICHT SOLUTIONS WITH LIGHT

Andreas Tünnermann

Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF
Friedrich-Schiller-University Jena Institute of Applied Physics



Bernhard Kley, traten in den wohlverdienten Ruhestand. Beide haben mit Ihren langjährigen Arbeiten das Profil des Optikstandortes Jena nachhaltig geprägt. Dr. Ramona Eberhardt, Abteilungsleiterin der Feinwerktechnik und Prof. Stefan Nolte, Arbeitsgruppenleiter Ultrafast Optics folgen als stellvertretende Institutsleiter. Dr. Kley übergab die Leitung seiner Gruppe an Dr. Uwe Zeitner, Abteilungsleiter für Mikrooptische Systeme. Ich freue mich, die Zusammenarbeit mit diesen geschätzten Kollegen noch weiter vertiefen zu können.

Es ist mir eine besondere Freude zu sehen, dass sich die Anstrengungen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nicht nur auf ihre exzellente Forschung beschränken. Dies wurde mir einmal mehr zur »Langen Nacht der Wissenschaften« deutlich, als Scharen neugieriger Besucher, trotz strömenden Regens, begeisternden Kollegen lauschten und tolle Demonstratoren bestaunten.

Entsprechend des Anspruchs der Fraunhofer-Gesellschaft, innovative Anwendungen auf Basis exzellenter Forschung zu entwickeln, kann ich mit Stolz verkünden, dass das Fraunhofer IOF jetzt zum vierten Mal in Folge das wissenschaftlich exzellenteste Fraunhofer-Institut ist und sich ebenso durch großen wirtschaftlichen Erfolg auszeichnet. Dies ist Ergebnis der Zusammenarbeit und des Umgangs miteinander – eine Institutskultur, die Leistungsbereitschaft mit sozialer Verantwortung paart und wesentlich geprägt ist durch gemeinsame Verantwortung füreinander und offene Kommunikation miteinander. Diese Kultur gilt es auch zukünftig zu bewahren und an neue Kollegen weiterzugeben.

Lassen Sie mich abschließend die Gelegenheit ergreifen, meinen Dank allen Partnerinstituten, Forschungsförderern, Stiftungen, Konzernen und Firmen, die auch im letzten Jahr auf die Innovationsfähigkeit des Fraunhofer IOFs gesetzt haben, auszusprechen. Ohne Ihr langfristiges Engagement, Offenheit, Kreativität und Vertrauen wäre Optikforschung auf Weltniveau kaum denkbar.

for microoptical systems. I am looking forward to intensifying the cooperation with these respected colleagues.

In addition, I am especially pleased to see that our employees' efforts are not only limited to their excellent research activities. This became clear once more during the "Lange Nacht der Wissenschaften", where crowds of impressed visitors listened to enthusiastic colleagues and marveled at great demonstrators despite the pouring rain.

According to the remark of the Fraunhofer-Gesellschaft to develop innovative applications based on excellent research, I can proudly announce that for the fourth time, the Fraunhofer IOF is the most scientifically excellent Fraunhofer institute and is also characterized by great economic success. This is the result of the collaboration and the interaction with each other – an institute's culture that connects commitment with social responsibility and is substantially featured by common responsibility and open communication with each other. In the future, this culture needs to be preserved and passed on to new colleagues.

In conclusion, let me take this opportunity to express my gratitude to all partner institutes, research funders, foundations, corporations, and firms, who in the last year, put their trust in the innovation capability of the IOF. Without your long-term engagement, openness, creativity, and trust, optics research on a global level would hardly have been imaginable.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Direktor des Fraunhofer IOF | Director of the Fraunhofer IOF

LEFT *Prof. Dr. Andreas Tünnermann spricht über die Perspektiven von ultraschnellen Faserlasern in der Industrie auf der LASER World of PHOTONICS. | Prof. Dr. Andreas Tünnermann talks about the industrial perspectives of ultrafast fiber lasers.*

INHALT

Das Institut im Profil	8
Ausgewählte Ergebnisse 2017	14
Optische Komponenten und Systeme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	16
DESI – Ein abbildendes Spektrometer zur Erdbeobachtung	18
Abbildende Gitter für kompakte Spektrometeranwendungen	20
Beugungsgitter mit maßgefertigten Spektraleigenschaften	22
Spiegel und Filter für die Suche nach neuen Planeten	24
Arrayprojektor zur Grafikdarstellung auf der Straße	26
Polymerfreies Fügen optischer Gläser und Komponenten	28
Asphären Prüf-CGH auf Basis von Effektiv-Indexstrukturen	30
Untersuchung von Design-Regeln für Mikroskopobjektive	32
Feinmechanische Komponenten und Systeme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	34
Additive Fertigung von ultraleichten Metallspiegeln	36
Aufbau und Verbindungstechnik für die ExoMars Mission	38
Funktionale Oberflächen und Schichten – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	40
3D-konforme Antireflexschichten mittels ALD	42
Entspiegelung AR-plas2 für Glas- und Kunststofflinsen	44
Black Germanium Antireflexstrukturen	46
Prozessoptimierung in der Optikfertigung durch Streulichtanalyse	48
Photonische Sensoren und Messsysteme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	50
Echtzeitscanner für die Roboter-Interaktion	52
Hochleistungs-3D-Sensornetzwerk zur Echtzeitrekonstruktion	54
Optische 3D-Vermessung von Glas & transparenten Kunststoffen	56
Monokulare 3D-Kameras	58
Kompakte multispektrale Array-Kamera	60
Kombinative Rauheits- und Funktionsanalyse dentaler Implantate	62
Lasertechnik – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	64
Verschränkte Photonenquelle für die Quantenkommunikation	66
Integrierte Quellen für verschränkte Photonenpaare	68
Wärmemessungen an der Modeninstabilitätsschwelle	70
Additive Fertigung mittels ultrakurzer Laserimpulse	72
Hoch-brillante Laser im mittleren Infrarot	74
Strategische Projekte des Fraunhofer IOF	76
Das Institut in Zahlen	94
Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces und die Fraunhofer-Gesellschaft	96
Namen, Daten, Ereignisse	102

CONTENT

Profile of the institute	8
Selected results 2017	14
Optical components and systems – Scientific results from the business field	16
DESIS – An imaging spectrometer for Earth observation	18
Imaging grating elements for compact spectrometers	20
Diffraction gratings with tailored spectral response	22
Mirrors and filters for the search for new planets	24
Arrayed projector for displaying graphics on the street	26
Polymer-free joining of optical glasses and components	28
Asphere-Test-CGH based on effective-index structures	30
Investigation of microscopic lenses	32
Precision engineering components and systems – Scientific results from the business field	34
Additive manufacturing of lightweight metal mirrors	36
Assembly and joining techniques for the ExoMars mission	38
Functional surfaces and layers – Scientific results from the business field	40
3D conformal antireflective coatings by ALD	42
Antireflection coating AR-plas2 for glass- and plastic lenses	44
Black Germanium antireflection structures	46
Light scattering analysis for the optimization of optical fabrication	48
Photonic sensors and measuring systems – Scientific results from the business field	50
Real-time scanner for robot interaction	52
High performance 3D sensor network for real-time reconstruction	54
Optical 3D measurement of glass and transparent plastics	56
Monocular 3D-cameras	58
Compact multispectral array-camera	60
Combined roughness and functional analysis of dental implants	62
Laser technology – Scientific results from the business field	64
Entangled photon source for quantum communication	66
Integrated sources for entangled photon pairs	68
Measuring thermal load in the presence of transversal mode instabilities	70
Additive manufacturing using ultrashort laser pulses	72
High-brightness mid-infrared laser	74
Strategic projects of the Fraunhofer IOF	76
The institute in figures	94
Fraunhofer Group Light & Surfaces and Fraunhofer-Gesellschaft	96
Names, dates, activities	102



DAS INSTITUT IM PROFIL

PROFILE OF THE INSTITUTE

Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative Lösungen mit Licht für die Zukunftsfelder Energie & Umwelt, Information & Kommunikation, Gesundheit, Produktion sowie Sicherheit & Mobilität. Dazu verknüpft es angewandte Forschung und Entwicklung mit exzellenter Grundlagenforschung zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zur Anwendung. Dabei wird die gesamte photonische Prozesskette abgebildet, vom Systemdesign bis zur Fertigung von Prototypen. Herausragende Ergebnisse der Grundlagenforschung sowie strategische Kooperationen mit Partnern aus der Industrie belegen die Forschungsstärke des Fraunhofer IOF. Die Arbeiten erfolgen sowohl im Rahmen öffentlich finanzierter Vorlaufforschung, als auch im direkten Auftrag der Wirtschaft.

Das Fraunhofer IOF steht in der Tradition der Jenaer Optikpioniere Carl Zeiss, Ernst Abbe und Otto Schott. Es ist regional verankert, pflegt vielfältige Kooperationen mit Unternehmen sowie Forschungs- und Bildungseinrichtungen am Standort und trägt als wissenschaftliches Zentrum der Optikregion Jena durch Innovationen, Personal- und Wissenstransfer sowie Ausgründungen zur regionalen Entwicklung bei. Gleichzeitig ist das Fraunhofer IOF national und international ausgerichtet und pflegt ein Netzwerk mit Partnern aus Europa, Nordamerika und Asien. Das Fraunhofer IOF misst sich an internationalen Standards, daher sind vertrauensvolle Zusammenarbeit und ein internationaler Austausch in Forschung und Entwicklung unabdinglich.

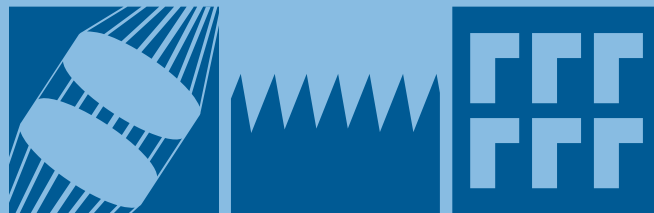
Das Institut ist in den fünf Geschäftsfeldern Optische Komponenten und Systeme, Feinmechanische Komponenten und Systeme, Funktionale Oberflächen und Schichten, Photonische Sensoren und Messsysteme sowie Lasertechnik tätig. Die enge Verzahnung der Geschäftsfelder erlaubt die Erarbeitung von Systemlösungen für unsere Kunden. Im Abschnitt der wissenschaftlichen Beiträge werden ausgewählte Forschungsinhalte der einzelnen Geschäftsfelder vorgestellt.

The Fraunhofer IOF develops innovative solutions with light for the future of energy & environment, information & communication, healthcare, production, and safety & mobility. It combines applied research and development with high quality fundamental research to control light – from its generation and manipulation to its actual use – covering the entire process chain from system design to the manufacture of prototypes. Outstanding basic research findings and strategic cooperation arrangements with various partners in industry demonstrate the research strengths of the Fraunhofer IOF. Its work is carried out as part of publicly-funded initial research initiatives as well as on the direct commission of industry.

The Fraunhofer IOF follows the tradition of the Jena-based optics pioneers Carl Zeiss, Ernst Abbe and Otto Schott. It has a regional focus, maintains diverse cooperation arrangements with both businesses as well as research and educational institutions at its location. As a scientific center of the Jena optics region it contributes to regional development with innovation, staff and knowledge transfer and spin-off ventures. At the same time, the Fraunhofer IOF is both national and international in its orientation and maintains a network of partners in Europe, North America and Asia. The Fraunhofer IOF adheres to international standards; close cooperation and international knowledge transfer in research and development are indispensable elements of this.

The institute works in the five business fields of Optical Components and Systems, Precision Engineering Components and Systems, Functional Surfaces and Layers, Photonic Sensors and Measuring Systems, and Laser Technology. The close links between the business fields make it possible to develop system solutions for customers. The business fields at the Fraunhofer IOF are separately presented and described in the section of scientific articles.

KOMPETENZEN COMPETENCES



Design und Simulation

Zentrale Kompetenz und Basis aller Entwicklungen am Fraunhofer IOF sind Optik- und Mechanikdesign sowie die Simulation und Analyse optischer und optomechanischer Systeme, einschließlich thermischer und thermo-optischer Effekte. Für die Bearbeitung der vielfältigen Anforderungen stehen umfangreiche Design- und Modellierungswerkzeuge zur Verfügung. Aufgabenspezifische Add-ons erlauben die Simulation und Optimierung von komplexen Systemen.

Mikro- und Nanostrukturierung

Die Erzeugung und Replikation optischer Mikro- und Nanostrukturen ist Grundlage für moderne komplexe optische Systeme. Die am Institut vorhandene technologische Basis erlaubt die Fertigung und Charakterisierung von High-End mikro- und nanooptischen Elementen höchster Auflösung auf bis zu 12"-Substraten.

Materialien der Optik und Photonik

Die Nanostrukturtechnik ermöglicht die Entwicklung von Materialien mit neuartigen optischen Eigenschaften, wie beispielsweise photonische Kristalle und Metamaterialien. Die Erforschung dieser Materialien erfolgt unter anderem im Zentrum für Innovationskompetenz »ultra optics®«.

Beschichtung und Oberflächenfunktionalisierung

Funktionale Beschichtungen und Oberflächen sind wesentliche Bestandteile optischer Systeme. Umfangreiche Kompetenzen bestehen im Design optischer Schichtsysteme, in der Entwicklung von Beschichtungs- und Strukturierungsverfahren für unterschiedliche Anwendungen und in der Charakterisierung von Oberflächen und Schichten.

Ultrapräzisionsbearbeitung

Das Fraunhofer IOF stellt mittels Ultrapräzisionsbearbeitung Metallspiegel, Gitter, kunststoffbasierte Linsen und Linsenarrays her. Eingesetzt werden Diamantwerkzeuge zur Bear-

Design and simulation

The core area of expertise and the basis of all development at Fraunhofer IOF is optical and mechanical design and the simulation and analysis of optical and optomechanical systems, including thermal and thermo-optical effects. Wide-ranging design and modelling tools, together with task-specific add-ons, enable the simulation and optimization of systems.

Micro- and nanostructuring

The generation and replication of optical micro- and nanostructures are basis for modern and complex optical systems. The technological equipment available at the institute enables the production and characterization of high-end micro- and nanooptical elements of highest resolution on substrates up to 12".

Optics and photonics materials

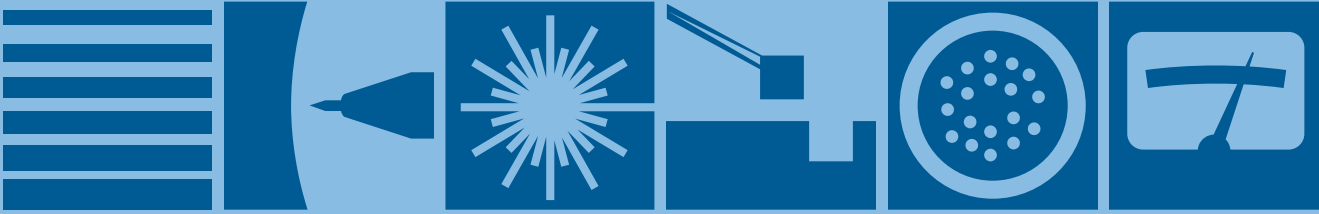
Nanostructure technology enables the development of new materials for optics and photonics, such as photonic crystals and metamaterials. The investigation of these materials is carried out at the Center for Innovation Competence "ultra optics®".

Coating and surface functionalization

Functional coatings and surfaces are essential elements of optical systems. We offer extensive expertise in the design of optical layer systems, in the development of coating and structuring processes for diverse applications, and in the characterization of surfaces and layers.

Diamond-based ultra-precision processing

The Fraunhofer IOF manufactures metal mirrors, gratings and plastic-based lenses and lens arrays using ultra-precision processing. For this purpose diamond tools are used to process metal, crystal and plastic optics for application in the wavelength range from 14 μm to 13.5 nm.



beitung von Metall-, Kristall- und Kunststoffoptiken für die Anwendung im Wellenlängenbereich von 14 μm bis 13,5 nm.

Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung

Ultrakurzpuls Laser mit Pulsdauern von wenigen Pikosekunden oder Femtosekunden besitzen hohes Einsatzpotenzial zur hochpräzisen Strukturierung verschiedener Materialien. Aufgrund der kurzen Energiedeposition, in einem Zeitbereich der unterhalb der thermischen Relaxationszeit liegt, lässt sich ein Abtrag praktisch ohne mechanische oder thermische Schädigung des Werkstücks erzielen.

Mikromontage und Systemintegration

Das Fraunhofer IOF besitzt umfangreiches Know-how in der Entwicklung von Technologien zur hybriden Integration unterschiedlicher Komponenten für den hochpräzisen Aufbau komplexer optomechanischer und optoelektronischer Mikro- und Makrosysteme. Dies umfasst Montagetechnologien (Positionieren, Justieren), Fügetechnologien (Kleben, Laserlöten, Plasmabonden, Laserspleißen, Justierdrehen) und Integration.

Laserentwicklung und nichtlineare Optik

Für die Entwicklung von Hochleistungs-Faserlasern mit beugungsbegrenzter Strahlqualität bestehen am Fraunhofer IOF Kompetenzen in Faserdesign, Optikdesign und Thermo-optik, in der Aufbau- und Verbindungstechnik für Faserlaser und in der Entwicklung effizienter Fasereinkoppler und Strahlführungssysteme.

Messverfahren und Charakterisierung

Das Fraunhofer IOF entwickelt optische Messverfahren und -systeme nach kundenspezifischen Anforderungen. Schwerpunkte sind die Charakterisierung optischer und nichtoptischer Oberflächen, Schichten, Komponenten und Systeme im Mikro- und Subnanometerbereich sowie die 3D-Formfassung.

Materials processing using ultrashort laser pulses

Ultrashort pulse lasers with pulse durations of a few picoseconds or femtoseconds show great potential for highly-precise structuring of a wide range of materials. Due to the short energy deposition in the time range below the thermal relaxation time, a material removal can be achieved with practically no mechanical or thermal damage.

Micro-assembly and system integration

The Fraunhofer IOF possesses extensive expertise in the development of technologies for the hybrid integration of diverse components with high precision for the setup of complex optomechanical and optoelectronic micro- and macrosystems. This encompasses assembly technologies (positioning, aligning), joining technologies (bonding, laser soldering, plasma bonding, laser splicing, alignment turning), and integration.

Laser development and non-linear optics

For the development of high-power fiber lasers with diffraction-limited beam quality, Fraunhofer IOF possesses expertise in fiber design, optics design and thermo-optics, in assembly and packaging technology for fiber lasers and in the development of efficient fiber couplers and beam guidance systems.




Measurement methods and characterization

The Fraunhofer IOF develops optical measurement methods and systems to customer requirements. Key areas include the characterization of optical and non-optical surfaces, layers, components and systems in the micrometer and subnanometer range and in 3D shape acquisition.

ORGANISATION ORGANIZATION







HEAD OF INSTITUTE

 Director Prof. Dr. Andreas Tünnermann	 Deputy director Dr. Ramona Eberhardt	 Deputy director Prof. Dr. Stefan Nolte
--	---	---









ADMINISTRATION

 Administration Elke Heuer	 Strategy, marketing, coordination Dr. Kevin Füchsel
---	--

BUSINESS FIELDS

 Optical components and systems Prof. Dr. Uwe Detlef Zeitner	 Precision engineering components and systems Dr. Ramona Eberhardt	 Functional optical surfaces and layers Prof. Dr. Norbert Kaiser	 Photonic sensors and measuring systems Prof. Dr. Gunther Notni
--	--	--	---

COMPETENCES

 Design and simulation Prof. Dr. Herbert Gross	 Micro and nano-structuring Prof. Dr. Uwe Detlef Zeitner	 Coating and surface functionalization Dr. Ulrike Schulz	 Micro-assembly and system integration Dr. Erik Beckert
 Diamond-based ultra-precision processing Dr. Stefan Risse	 Laser development and non-linear optics Prof. Dr. Jens Limpert	 Materials processing using ultrashort laser pulses Prof. Dr. Stefan Nolte	 Measurement methods and characterization Dr. Peter Kühmstedt

STRATEGIC PROJECTS

QUILT Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions Prof. Dr. Andreas Tünnermann	3Dsensation Innovation alliance Prof. Dr. Andreas Tünnermann	Max Planck School of Photonics Prof. Dr. Andreas Tünnermann
--	---	---

KURATORIUM ADVISORY COMMITTEE



Technical services
Wieland Stöckl



Laser technology
Prof. Dr. Stefan
Nolte



Optics and photonics
materials
Prof. Dr. Thomas
Pertsch

TOF – Tailored
optical fibers

Dr. Ramona
Eberhardt



VORSITZENDER | CHAIR

- Dr. Michael Mertin | JENOPTIK AG, Jena

MITGLIEDER | MEMBERS

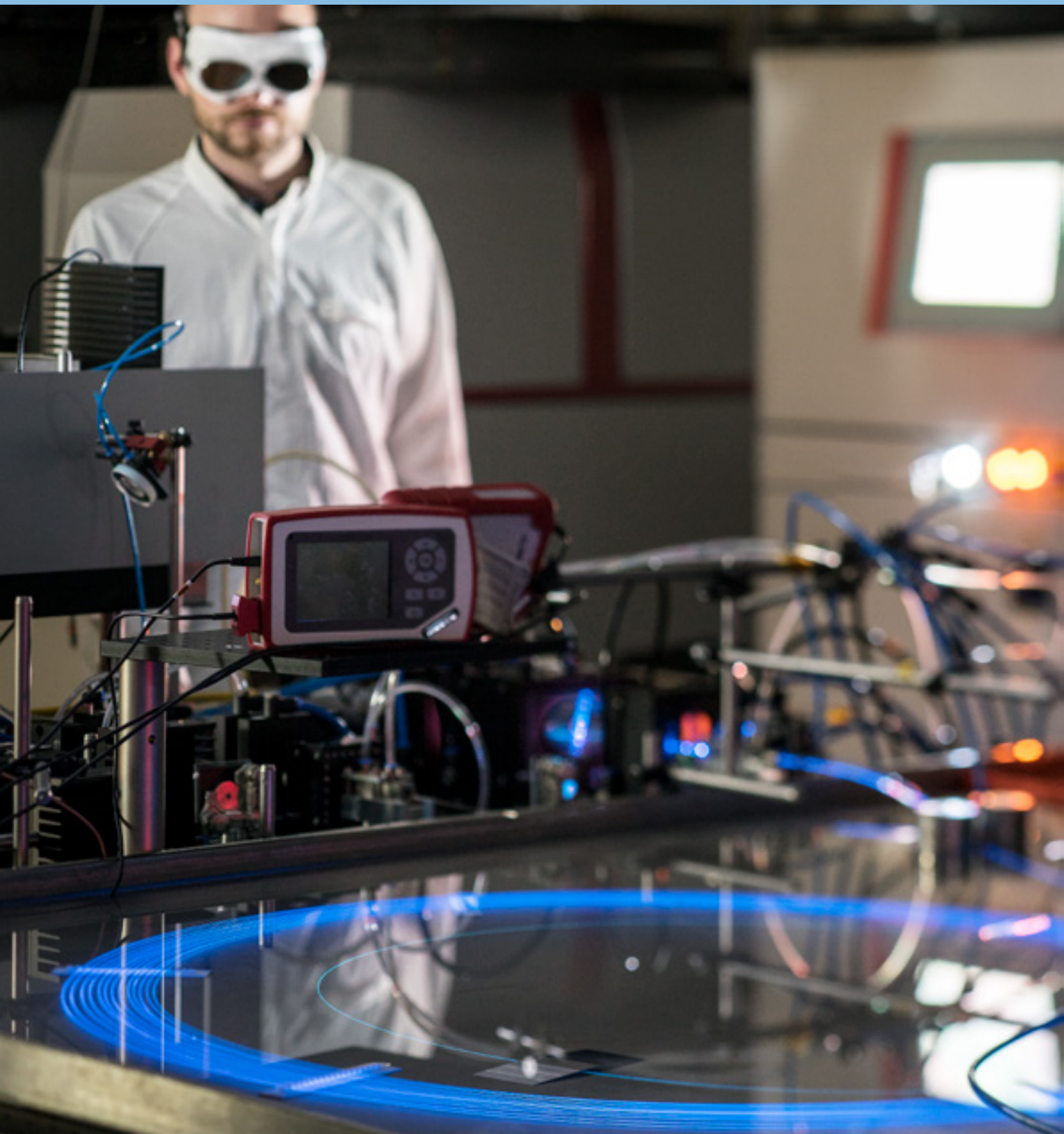
- Christian Amann | BMW Group, München
- Dr. Klaus Bartholmé | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena
- Petra Bogdanski | Mahr GmbH, Jena
- Dr. Hans Eggers | Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
- Robert Fetter | Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Erfurt
- Dr. Roland Langfeld | Schott AG, Mainz
- Manfred Lieke | Astrium GmbH Satellites, Friedrichshafen
- Prof. Dr. Roland Sauerbrey | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden
- Dr. Christian Schmitz | TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen
- Prof. Dr. Christian Spielmann | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Optik und Quantenelektronik, Jena
- Joachim Stühler | Carl Zeiss SMT GmbH, Oberkochen
- Thomas Thöniß | Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG, Göttingen
- Dr. Berit Wessler | OSRAM GmbH, München
- Dr. Werner Wilke | VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

EHRENMITGLIEDER | HONORARY MEMBERS

- Dr. Franz-Ferdinand von Falkenhausen
- Prof. Dr. Wolfgang Karthe

AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2017

SELECTED RESULTS 2017



Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative optische Systeme zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung bis hin zu dessen Anwendung. Das Leistungsangebot umfasst die gesamte photonische Prozesskette vom optomechanischen und optoelektronischen Systemdesign bis zur Herstellung von kundenspezifischen Lösungen und Prototypen. Dazu verknüpft es angewandte Forschung und Entwicklung mit exzellenter Grundlagenwissenschaft in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Das Fraunhofer IOF ist eine weltweit führende Forschungseinrichtung für Photonik und optische Systemtechnik mit globaler Strahlkraft. Seine Stellung stützt sich sowohl auf herausragende, öffentlich finanzierte Vorlaufforschung als auch auf direkte Auftragsforschung in Kollaboration mit strategischen Partnern aus Forschung und Industrie. Auf der Grundlage wissenschaftlicher und technologischer Exzellenz gestaltet es die zukünftigen Entwicklungen in Optik und Feinwerktechnik auf globaler Skala maßgeblich mit.

Einige herausragende Forschungsergebnisse des Jahres 2017 sind auf den folgenden Seiten dargestellt. Sie stehen stellvertretend für die exzellente, anwendungsorientierte Forschung des Fraunhofer IOF, die sich in fünf Geschäftsfelder unterteilt:

- Optische Komponenten und Systeme
- Feinmechanische Komponenten und Systeme
- Funktionale Oberflächen und Schichten
- Photonische Sensoren und Messsysteme
- Lasertechnik

Fraunhofer IOF develops innovative optical systems to control light from its creation to its application. Our service range covers the entire photonic process chain from optomechanical and optoelectronic system design to the manufacturing of customized solutions and prototypes. It combines applied research and development with scientifically excellent basic research in close cooperation with the Institute of Applied Physics at the Friedrich Schiller University Jena.

Fraunhofer IOF is a worldwide leading and pioneering research institute for photonics and optical system engineering with global appeal. Based on scientifically excellent activity in its core areas of expertise, it plays a leading role in future developments in optics and precision engineering. Outstanding results of basic research and strategic collaborations with industry partners demonstrate the research strength of Fraunhofer IOF. Its work is performed both in the context of publicly funded initial research projects as well as directly on behalf of industry.

The following pages present selected research results obtained last year. The examples show solutions in the following business areas:

- Optical components and systems
- Precision engineering components and systems
- Functional surfaces and layers
- Photonic sensors and measuring systems
- Laser technology

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



OPTISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME

OPTICAL COMPONENTS AND SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF entwickelt kundenspezifische optische und mikrooptische Komponenten und Systeme für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche. Alleinstellungsmerkmal ist dabei die Beherrschung der kompletten photonischen Prozesskette – vom Design über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung – sowie die Bereitstellung von sowohl klassischen Bearbeitungsverfahren als auch von Ultrapräzisionsfertigung, Grauton- und Elektronenstrahlolithografie sowie Drucktechniken und additiver Fertigung.

So werden unter anderem sphärische, asphärische und freiform-optische Komponenten und Systeme für Objektive, Teleskope und Spektrometer entwickelt. Ebenso werden refraktive und diffraktive Komponenten in Gläsern und Halbleitermaterialien bis hin zu ein- und doppelseitigen Mikrolinsenarrays hergestellt. Die Herstellung von Gittern, Faserlasern und faseroptischen Komponenten runden das Portfolio ab.

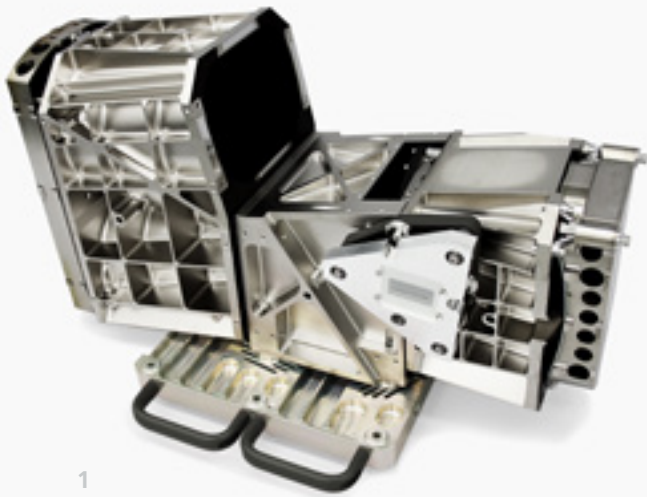
Die nachfolgenden Beiträge zeigen die in diesem Geschäftsfeld in 2017 abgeschlossenen Projekte. Bearbeitet wurden unter anderem Themen wie Beugungsgitter, Abbildende Gitter, Spiegel für Weltraumanwendungen, mikrooptische Projektionssysteme oder Prüf-CGH's für die Asphärentestung.

Fraunhofer IOF develops customer-specific optical and micro-optical components and systems for a variety of different applications. The unique focus here is the mastery of the complete photonic process chain – from design to production and characterization – as well as the provision of classical processing methods, ultra-precision manufacturing, greyscale and electron beam lithography, additive manufacturing, and printing technologies.

Using these expertise and tools, we develop spherical, aspherical, and free-form optical components and systems for objectives, telescopes, and spectrometers. In the same way, refractive and diffractive components in glasses and semiconductor materials are produced up to single and double-sided microlens arrays. The production of gratings, fiber lasers, and fiber-optic components complete the portfolio.

The projects completed in this business field in 2017 are shown in the following contributions. Amongst other things, topics such as diffraction and imaging gratings, mirrors for space applications, micro-optical projections systems, or CHG for aspherical testing were investigated.

LEFT *Oberflächenkorrektur eines Freiformspiegels für das DESIS-Instrument mittels Magneto-Rheologischem Finishing. | Surface finishing using Magnetorheological Finishing (MRF) on a free form mirror for the DESIS instrument.*



1



2

DESIS – EIN ABBILDENDES SPEKTROMETER ZUR ERDBEOBACHTUNG

DESIS – AN IMAGING SPECTROMETER FOR EARTH OBSERVATION

Das »DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer (DESIS)« /1/ ist ein neuartiges, hyperspektrales Instrument des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), das 2018 auf der MUSES (Multi-User-System for Earth Sensing)-Plattform /2/ der Internationalen Raumstation installiert werden soll. Das Instrument wird von der DLR entwickelt. Es soll Bilder der Erdoberfläche in 235 spektralen Kanälen im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1 μm mit einer Auflösung von 30 m liefern.

Im Rahmen der Entwicklung war das Fraunhofer IOF für den Entwurf und die Realisierung des gesamten optischen Systems verantwortlich. Das abbildende Spektrometer besteht aus zwei Hauptkomponenten, einem kompakten Drei-Spiegel-Teleskop (TMA), das die Erdoberfläche auf einen Spalt abbildet, und einem Offner-Spektrometer /3/, das den Spalt auf den Detektor abbildet und dabei mittels eines Reflexionsgitters für die Trennung der spektralen Kanäle sorgt.

Durch die Verwendung von Freiformflächen im Spektrometer /4/ konnte eine hohe spektrale Auflösung selbst bei einer Lichtstärke von $F/2.8$ erreicht werden. Konventionelle Offner-Spektrometer können Abbildungsfehler nur für eine Wellenlänge korrigieren, wodurch sich die Abbildungsqualität an den Rändern des Spektralbereiches deutlich verschlechtert.

In 2018, the new hyperspectral "DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer (DESIS)" /1/ of the DLR (German Aerospace Center) will be integrated into the Multi-User-System for Earth Sensing platform /2/ installed on the International Space Station. The instrument is developed under the responsibility of the DLR and will deliver images of the Earth in 235 spectral channels in the wavelength range from 400 nm to 1 μm . The resolution will be 30 m on the ground.

As a partner of the development team, the Fraunhofer IOF is responsible for the optical system of the imaging spectrometer. The optical system consists of two primary components: a compact Three-Mirror-Anastigmat (TMA) telescope, imaging the Earth's surface onto a slit, and an Offner-type spectrometer /3/, which re-images the slit onto the detector and performs the spectral separation using a reflective grating.

By using freeform surfaces in the spectrometer /4/, it is possible to reach high spectral resolution even with an optical system as fast as $F/2.8$. Conventional Offner-type spectrometers allow minimizing aberrations at a single wavelength only, while their performance drops considerably towards the edges of the spectral range. In contrast, the freeform mirror allows a good performance over the entire

1 *Komplettes optisches System des Spektrometers. | Integrated optical system of the DESIS instrument.*

2 *Metallspiegel für das DESIS-Instrument: Freiformspiegel für das Spektrometer (links) und Doppelspiegel für das Teleskop (rechts). | Metal mirrors for the DESIS instrument: Offner (left) and double (duolith) mirror for the telescope (right).*

Im Gegensatz dazu ermöglicht der Freiformspiegel eine hohe Abbildungsgüte über den gesamten Spektralbereich.

Das gesamte optische System wurde mittels Metallspiegeln realisiert. Die Spiegeloberflächen wurden durch Einkorn-Diamant-Bearbeitung und anschließender Nickelbeschichtung generiert. Die endgültige Form wurde durch Diamantbearbeitung, Oberflächenkorrektur mittels Magneto-Rheologischem Finishing (MRF) und Chemisch-Mechanischen Polierens (CMP) eingestellt /5/. Die erreichte Oberflächenqualität der einzelnen Spiegel lag im Bereich von 5 nm bis 40 nm rms.

Eine weitere Schlüsselkomponente für das Spektrometer ist ein Beugungsgitter auf einer gekrümmten Spiegeloberfläche. Dieses wurde ebenfalls am Fraunhofer IOF entwickelt und gefertigt /6/.

Die beiden Teilsysteme wurden separat integriert und unter interferometrischer Kontrolle justiert. Zum Schluss wurde das Gesamtsystem integriert und vermessen. Der verbleibende Wellenfrontfehler des Gesamtsystems liegt, je nach Position im Bildfeld, im Bereich von 60 nm bis 120 nm rms. Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit der für das Instrument geforderten Auflösung.

Literatur / References

- /1/ D. Krutz et al.: DESIS – DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer, Proc. PSIVT 2017.
- /2/ N. Humphrey: A View From Above: Imaging from the ISS, Teledyne DALSA 2014, <http://possibility.teledynedalsa.com>.
- /3/ A. Offner: New Concepts in Projection Mask Aligners, Opt. Eng., 14, 130, 1975.
- /4/ T. Peschel et al.: Design of an imaging spectrometer for earth observation using freeform mirrors, Proc. ICSO 2016.
- /5/ R. Steinkopf et al.: Metal mirrors with excellent figure and roughness, Proc. SPIE 7102, 71020C–71020C–12, 2008.
- /6/ See page 20.

spectral range to be achieved.

The entire optical system relies on metal-based mirrors, where the mirror surfaces are made by Single-Point-Diamond Turning (SPDT) and subsequent nickel plating. The final surface shape and roughness are realized by a second SPDT step, subsequent Magneto-Rheological Finishing (MRF), and a post-polishing process /5/. The mirrors achieved surface qualities in the range of 5 nm to 40 nm rms.

A further key component of the spectrometer is a diffraction grating on a curved mirror, which was also fabricated at Fraunhofer IOF /6/.

Both subsystems were integrated individually under interferometric control. Finally, they were joined and characterized. The remaining wavefront error of the entire instrument reached between 60 nm and 120 nm rms depending on the position in the optical field. These results were compliant with the required resolution of the instrument.



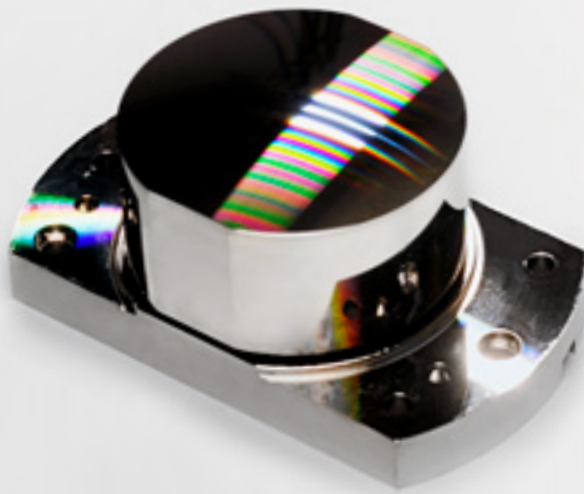
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

AUTHORS

Thomas Peschel
Christoph Damm
Matthias Beier
Robert Jende
Robert Leitel
Stefan Risse

CONTACT

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



ABBILDENDE GITTER FÜR KOMPAKTE SPEKTROMETERANWENDUNGEN IMAGING GRATING ELEMENTS FOR COMPACT SPECTROMETERS

Die Verwendung von Gittern mit abbildender Funktionalität ermöglicht die Realisierung von kompakten aberrationsarmen Spektrometern für hochauflösende Anwendungen. Insbesondere rein reflektive Aufbauten nach dem Offner-Konzept erlauben einen weiten Spektralbereich und werden bevorzugt im Bereich Luft- und Raumfahrt eingesetzt.

Im Fraunhofer IOF wurden Diamantdrehen und direktschreibende Fotolithographie als Strukturierungstechnologien für hoch-effiziente Gitter im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich auf konvexen Substraten qualifiziert. Im Rahmen der Entwicklung eines spektral auflösenden satellitengestützten Sensorsystems (DESI - DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer) entstanden binäre Gitter mit einer Periode von 13,35 μm und einer Tiefe von 137 nm auf der konvexen Oberfläche eines Aluminium/NiP Substrats mit einem Krümmungsradius von 121,8 mm.

Das lineare Gitter wird bei dem Zerspanverfahren mittels monokristalliner Diamantwerkzeuge in einem Off-Axis Drehprozess direkt in die Metalloberfläche eingeschnitten. Aufgrund der ultra-präzisen Bearbeitung ist kein Polierschritt auf der strukturierten Fläche erforderlich. Die röntgenamorphe Oberfläche der NiP Schicht ermöglicht die Ausbildung extrem scharfer Gitterflanken, die zu einer sehr kontrastreichen Abbildung führen.

The implementation of imaging grating elements in low-aberrant spectrometers enables compact, high-resolving optical analytical tools. In particular, all-reflective set-ups according to the Offner concept allow the exploitation of a wide spectral region and are preferentially used in aerospace industry.

At Fraunhofer IOF, the two structuring technologies single point diamond turning (SPDT) and direct-writing photolithography have been qualified to generate highly-efficient gratings for the visual and near-infrared spectral bands on convex shaped substrates. Within the scope of the development of a spectral resolving satellite remote sensing system (DESI - DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer), binary gratings featuring 13.35 micron period and 137 nm groove depth have been generated onto the convex shaped surface of an aluminum/NiP-substrate. Their radius of curvature was 121.8 mm.

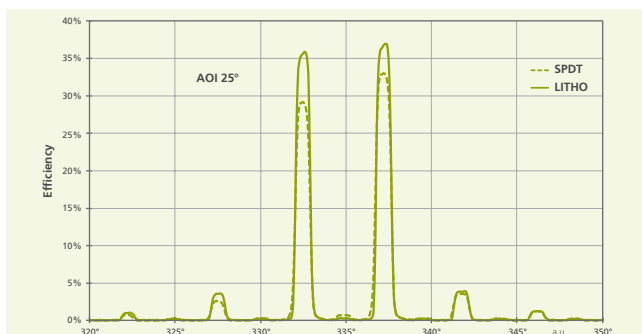
The linear grating is machined using a monocrystalline diamond tool, which cuts directly into the metal surface during an off-axis turning process. As a result of the ultra-precision machining method, a subsequent polishing is not required. The x-ray amorphous structure of the NiP layer allows the formation of sharp-edged grating structures and consequently results in high-contrast diffraction orders.

1 *Konvex-gekrümmtes Gittersubstrat für die DESIS-Mission. | Curved grating sample for DESIS space mission.*

Beim lithographischen Strukturierungsverfahren als alternative Technologie wird zunächst die Oberfläche poliert und anschließend mit Fotolack beschichtet. Die Grautonlithographie-Anlage »HighFive« ermöglicht eine Datenzerlegung des Gittermusters der gekrümmten Oberfläche in Terrassen gemäß dem Bereich der Schärfentiefe des verwendeten Objektivs, sowie eine Nachführung des Fokus während der Belichtung entsprechend der mathematischen Funktion der Oberfläche. Das anschließend entwickelte Oberflächenprofil im Fotolack wird durch reaktives Plasmaionensäzen in das Substrat übertragen.

Als Beschichtung dient eine qualifizierte geschützte Silberschicht, die durch Magnetron-Sputtern auf das strukturierte Substrat aufgebracht wurde. Die Beugungseffizienz für die 1. Ordnung unter einer Inzidenz von 25° erreicht bei der Wellenlänge $\lambda = 532$ nm einen Wert von 36,5 % mit einem TE:TM-Verhältnis von 1:1.

Die Aktivitäten werden innerhalb der vom Land Thüringen geförderten Forschergruppe »ADONiS« weitergeführt, um neuartige diffraktiv-optische Elemente auf nicht-planaren Substratoberflächen zu entwickeln und für weitere Anwendungsfelder zu erschließen.



2 *Beugungseffizienzmessung in TE- und TM-Polarisation für eine Inzidenz von 25° bei $\lambda = 532$ nm. | Diffraction efficiency measurement in s- and p-polarization for $\lambda = 532$ nm and 25° angle of incidence.*

As alternative technology, the surface has been polished and coated with a photoresist prior to the patterning by direct-writing lithography. The grayscale lithography tool "High Five" is able to dissect the data of the grating pattern of the curved surface into terraces according to the depth of focus of the applied projection optics, and tracks the focus during the resist exposure with respect to the mathematical description of the underlying surface. The grating profile is formed by development and subsequently transferred by reactive ion etching into the substrate.

In both cases, a qualified protected silver coating, which has been deposited onto the patterned substrates by magnetron sputtering, acts as a reflector. The first order diffraction efficiency at 25° angle of incidence is 36.5 % and the TE:TM ratio is 1:1 for a wavelength $\lambda = 532$ nm.

The activities in this field are continued within the government-funded (federal state of Thuringia) research group "ADONiS" in order to develop novel diffractive optical elements on non-planar substrate surfaces and open them for new areas of application.



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

AUTHORS

Ralf Steinkopf

Robert Jende

Robert Leitel

Philipp Schleicher

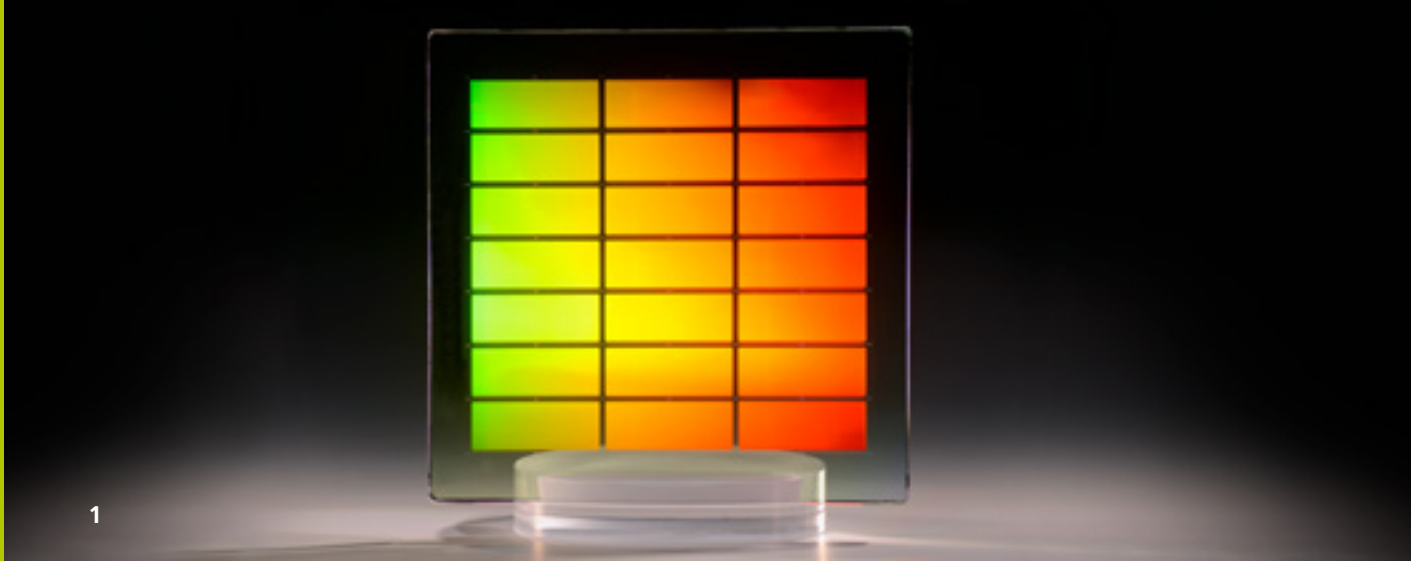
Mark Schürmann

CONTACT

Dr. Robert Leitel

Phone +49 3641 807-375

robert.leitel@iof.fraunhofer.de



BEUGUNGSGITTER MIT MASSGEFERTIGTEN SPEKTRALEIGENSCHAFTEN

DIFFRACTION GRATINGS WITH TAILORED SPECTRAL RESPONSE

Die Methode der Hyperspektralen Abbildung vereint spektroskopische sowie abbildende optische Techniken mit dem Ziel, möglichst viele Informationen einer beobachteten Szenerie oder eines Objekts zu gewinnen. Die gesamte spektrale Bandbreite reicht typischerweise über mindestens eine Oktave, wobei das Spektrum in Hunderte schmalbandige Einzelkanäle zerlegt wird. Die aufgenommenen Rohdaten werden weiterverarbeitet und dienen letztendlich der Charakterisierung und Identifizierung chemischer Elemente, Verbindungen sowie Materialien, welche einer konkreten Position innerhalb der Szene zugeordnet werden können.

Das korrekte Ausbalancieren der Sensitivität bzw. Empfindlichkeit aller Einzelkanäle stellt eine der wesentlichen Herausforderungen für den Entwurf von Hyperspektralinstrumenten dar. Von großem Wert ist es hierbei, die spektralen Eigenschaften spezieller Elemente (z. B. Beugungsgitter) im System gezielt anzupassen (zu designen), um eventuelle Unzulänglichkeiten anderer Komponenten (z. B. Detektor) auszugleichen.

Am Fraunhofer IOF wurde eine Kombination aus Design- und Technologieprozess entwickelt, der den Entwurf und die

Hyperspectral imaging is a technique of combining imaging and spectroscopy to survey a scene or target, and extract detailed information. The scene's spectral properties are obtained at hundreds to thousands of narrow wavelength bands within an entire spectral field of view, which typically spans over one octave or more. The collected and processed data serve the function of characterizing and identifying chemical compositions, materials, or liquids, which can then be referenced to a precise location in a scene.

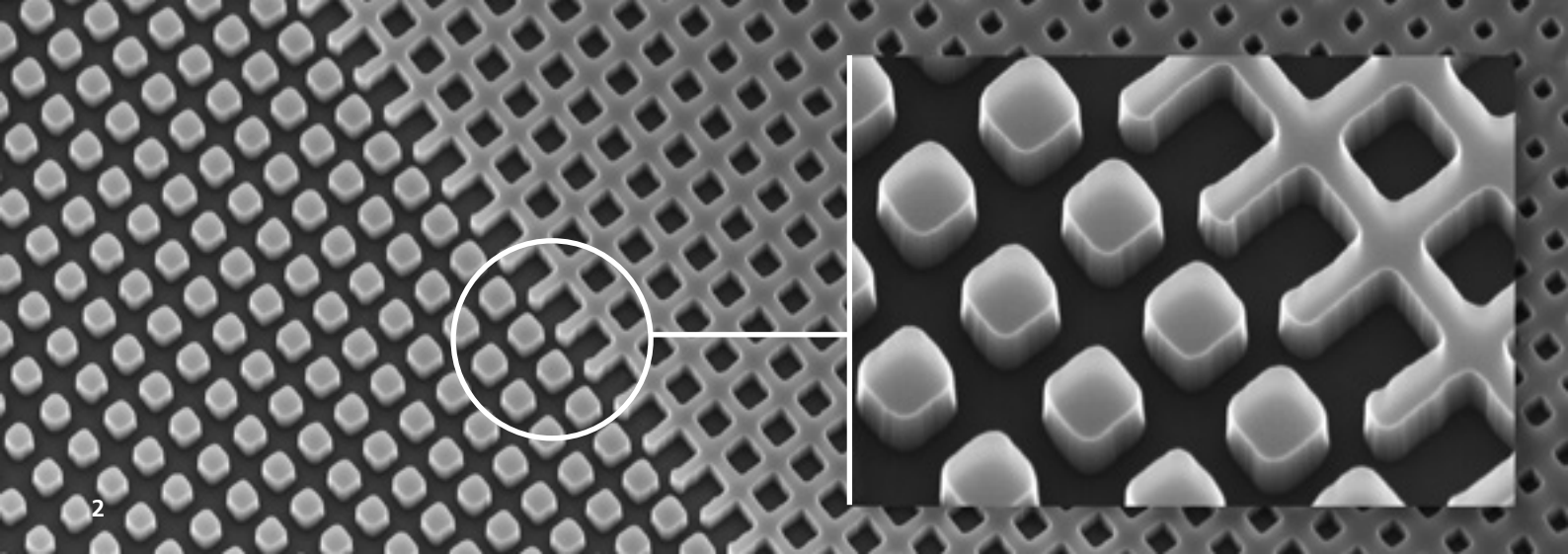
The correct balancing of the optical sensitivity throughout the entire spectral bandwidth is one of the major challenges of designing hyperspectral instruments and it comprises all parts of the system – from the detector and optical components and, of course, the dispersive element(s). Using gratings as dispersive elements is most often the method of choice as they allow compact and lightweight devices.

Here at Fraunhofer IOF, we have established a technology process that allows the design and manufacturing of diffraction gratings with purposefully tailored spectral response, high wavefront accuracy, and thermal stability. The tailoring of the

1 *Polarisationsunabhängige Transmissionsbeugungsgitter; Beugungseffizienz TE & TM > 97 %.* |

Polarization invariant transmission gratings; Diffraction efficiency TE & TM > 97 %.

2 *Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer Gitterstruktur, welche aus zwei elementaren Grundbausteinen variierender Größe zusammengesetzt ist.* | *SEM image of a grating structure with two different kinds of sub-wavelength entities, i.e. pillars and voids.*



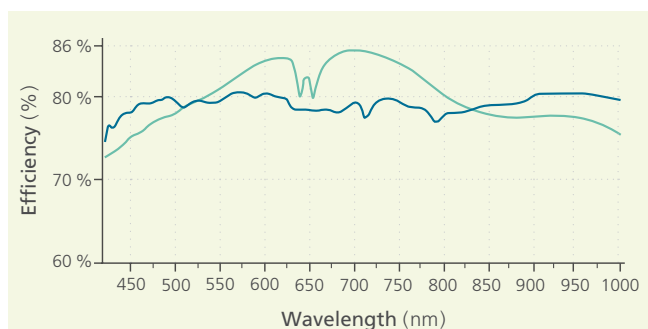
2

Herstellung von breitbandigen Beugungsgittern erlaubt, deren spektrale Eigenschaften gezielt angepasst werden können. Dadurch ist es möglich Beugungsgitter herzustellen, die z. B. nahezu keine spektrale Abhängigkeit zeigen, oder welche gerade einzelne Bereiche des Spektrums gezielt betonen (Abb. 2).

Diese Funktionalität wird erreicht, indem die Gitterstruktur durch mehrere (10 - 100) unterschiedliche Bausteine zusammengesetzt wird, deren Größe im Subwellenbereich liegt. Die erforderliche Genauigkeit des Strukturierungsprozesses (Größe und Positionierung) wird durch den Einsatz von Elektronenstrahlolithographie garantiert.

spectral response can be used to flatten the grating's spectral sensitivity (broad and uniform) or to emphasize particular subsets of the spectrum (Fig. 2).

In order to do so, the grating structure (within a single period) is composed of several tenth binary entities with lateral sizes in the sub-wavelength domain. The patterning process is performed by electron beam lithography such that the particular sizing and placement of all individual entities can be controlled to a very large extent.



3 *Zwei Gitterstrukturen mit unterschiedlichen Spektraleigenschaften. Das erste Gitter (blau) zeigt eine nahezu konstante Beugungseffizienz, wohingegen das zweite Element (türkis) ein Effizienzmaximum bei 700 nm gezielt generiert. | Two grating patterns with different spectral characteristics. First grating (blue) provides an almost constant spectral response and second grating (cyan) has an efficiency peak at a wavelength of 700 nm but a larger gradient at the spectral limits.*

AUTHORS

Frank Burmeister
 Thomas Käsebier
 Uwe Zeitner
 Thomas Flügel-Paul

CONTACT

Dr. Thomas Flügel-Paul
 Phone +49 3641 807-434
 thomas.fluegel-paul@iof.fraunhofer.de



SPIEGEL UND FILTER FÜR DIE SUCHE NACH NEUEN PLANETEN

MIRRORS AND FILTERS FOR THE SEARCH FOR NEW PLANETS

CRILES+ (CRYogenic InfaRed Echelle Spectrograph upgrade) wird im Jahr 2018 am Very Large Telescope (VLT) in Betrieb genommen. Diese wissenschaftliche Instrumentierung ermöglicht die Erforschung von Exoplaneten-Kandidaten, die kalte Sterne umkreisen. Die atmosphärische Charakterisierung von Transitplaneten und die Erforschung des Ursprungs und der Entwicklung von stellaren Magnetfeldern sind weitere Forschungsschwerpunkte. Nach dem Upgrade ist dieses Instrument ein kreuzdispenser Spektrograph, der die Beobachtungseffizienz um den Faktor 10 erhöht.

Zur Aufrüstung dieses Instruments wurden die Spiegel für den Kreuzdispenser (cross-dispersion unit, CDU) durch Diamantdrehen und mehrere Polierschritte hergestellt. Die Betriebstemperatur des CDU beträgt 65 K. Das verwendete Material muss künstlich gealtert werden, um die Dimensionsstabilität der Spiegel bei kryogener Anwendungstemperatur zu realisieren. Die planen und sphärischen Spiegel bestehen aus einer mittels Rascherstarrung erzeugten Aluminiumlegierung RSA6061, der asphärische Kollimatorspiegel aus chemisch vernickeltem RSA6061. Nach dem Diamantdrehen wurden die Vorschubrillen durch magnetorheologisches Polieren entfernt, wodurch auch die Formabweichung reduziert wurde. Um die Mikrorauheit zu verringern, war ein weiterer Glättungsschritt notwendig. Hierbei wurden Mikrorauheiten von 2 nm RMS bis 5 nm RMS und die Oberflächenformabweichung unter $\lambda / 2$ peak-to-valley ($\lambda = 633$ nm) erreicht. Die Spiegel für den

CRILES+ (CRYogenic InfaRed Echelle Spectrograph upgrade) will be commissioned at the Very Large Telescope (VLT) in 2018. This scientific instrumentation will allow the confirmation of transit exoplanet candidates orbiting cool stars. The atmospheric characterization of transiting planets and the study of the origin and evolution of stellar magnetic fields are further research areas. After the upgrade, this instrument is a cross-dispersed spectrograph increasing the observing efficiency by a factor of 10.

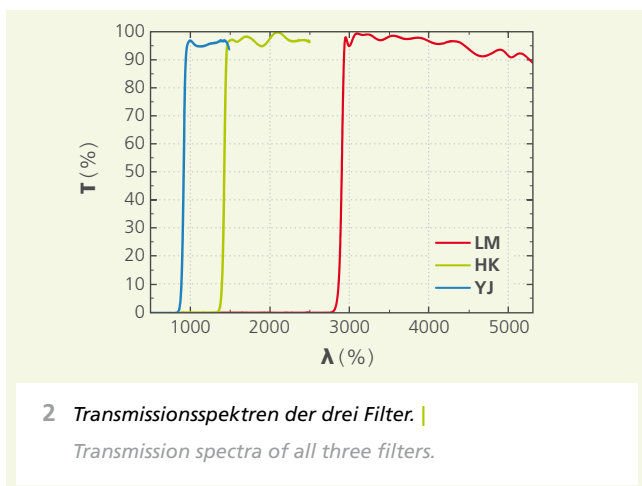
Upgrading this instrument, the mirrors for the cross-dispersion unit (CDU) were manufactured by diamond turning and several polishing steps. The operational temperature of the CDU is 65 K. The material used has to be artificially aged to improve the dimensional stability of the mirrors at cryogenic temperature. The flat and spherical mirrors are made of melt-spun aluminum alloy RSA6061, the aspherical collimator mirror is made of electroless nickel plated RSA6061. After diamond turning, the turning marks were removed by magnetorheological finishing, improving the shape deviation as well. A further smoothing step was necessary to reduce the micro-roughness. A micro-roughness of 2 nm RMS to 5 nm RMS and shape deviation lower than $\lambda / 2$ peak-to-valley ($\lambda = 633$ nm) were successfully achieved. The mirrors for the CDU were coated by sputtering a high-reflective gold layer. In a spectral range between 1 μm and 5 μm , the reflectivity of gold is higher than 98 %.

1 Thermalvakuumkammer und Kollimatorspiegel. | Thermal vacuum chamber and collimator mirror.

CDU wurden durch Sputtern mit hochreflektierenden Gold beschichtet. Die Reflektivität von Gold in einem Spektralbereich zwischen 1 μm und 5 μm beträgt $\geq 98\%$.

Weiterhin wurden drei optische Filter für die Y+J-, H+K- und L+M-Bänder (Bereiche in denen die Erdatmosphäre nicht absorbiert) hergestellt, die einen Wellenlängenbereich von 960 nm bis 5.300 nm abdecken. Zu diesem Zweck wurden Glassubstrate beidseitig durch Magnetronsputtern mit drei unterschiedlichen Interferenzschichtsystemen beschichtet. Die Blockung von Transmission sollte jeweils ab einer Wellenlänge von 500 nm bis zur Kante des jeweiligen Filters erfolgen. Die Filter einschließlich der aufgetragenen optischen Schichten werden für ihren Einsatz auf eine Temperatur von 65 K gekühlt und müssen diese extreme Temperatur sowie den Temperaturzyklus mehrfach überstehen, ohne dass es zur Materialermüdung kommt oder eine Veränderung der optischen Eigenschaften auftritt. Die Oberflächenformabweichung liegt unterhalb von 50 nm RMS. Die optische Dichte (OD) im Sperrbereich der YJ- und HK-Filter befindet sich oberhalb von 4,5. Für die LM-Filter wird eine OD höher 3,5 erreicht. Die im gesamten spektralen Bereich hohe Transmission von über 95 % und die geringe Abweichung der Kantenlage zeigen die hohe Genauigkeit der Beschichtung, die ohne die Möglichkeit eines optischen Monitorings ausgeführt wurde.

Furthermore, three optical filters for the Y+J-, H+K-, and L+M-bands (regions where the earth's atmosphere is not absorbing) have been produced, covering a wavelength range from 960 nm to 5,300 nm. For this purpose, glass substrates have been coated on both sides by magnetron sputtering with three different interference layer systems. The blocking of transmission had to be realized from a wavelength of 500 nm upward to the edge of the particular filter. The filters, and hence the optical coating, will be cooled to approximately 65 K in operating conditions and have to resist this temperature and the thermal cycling multiple times without fatigue or a change of the optical properties. The shape deviation of the filters is below 50 nm RMS. The optical density (OD) in the blocking range of the YJ- and HK-filters is above 4.5. The LM-filter still has an OD higher than 3.5. The transmissions of over 95 % nearly reached in the whole spectral range, as well as the small deviation of the filters edge, are a sign of the high precision of the coating process, which has been accomplished without the possibility of optical monitoring.



AUTHORS

Jan Kinast
Ralph Schlegel
Jean Louis Lizon¹
Roman Follert²

¹ European Southern Observatory ESO

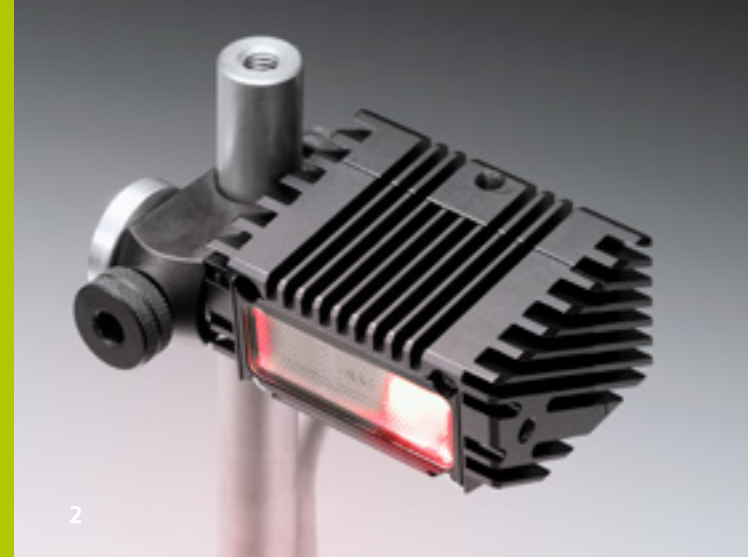
² Thüringer Landessternwarte

CONTACT

Dr. Jan Kinast
Phone +49 3641 807-364
jan.kinast@iof.fraunhofer.de



1



2

ARRAYPROJEKTOR ZUR GRAFIK- DARSTELLUNG AUF DER STRASSE ARRAYED PROJECTOR FOR DISPLAYING GRAPHICS ON THE STREET

Die fortschreitende Integration von automatisierten Bedienungsfunktionen und Assistenzsystemen erfordert eine stetige Verbesserung von Statusanzeigen und Bedienerführung. Während im Fahrzeuginnenraum dafür Bedienkonsolen mit Displays zu Verfügung stehen, stellt die Kommunikation mit Personen außerhalb des Autos ein ungelöstes Problem dar. Ein populärer Ansatz ist die Projektion von Informationen auf die Straße in unmittelbarer Umgebung des Fahrzeugs. Hierfür werden lichtstarke, kostengünstige und effiziente miniaturisierte Projektoren für eine geringe Zahl unterschiedlicher Bildinhalte benötigt. Der Einsatz herkömmlicher Picoprojektoren mit LED-beleuchteten DLP-Bildgebern scheitert an zu geringem projizierten Flux, zu großem Bauraumbedarf und zu hohen Kosten. Die erstmalig 2015 im BMW 7er eingesetzte Arrayprojektionstechnologie des Fraunhofer IOF /1/ ermöglichte die Realisierung stark miniaturisierter Projektoren zur grafisch gestalteten Beleuchtung im Einsteigebereich bei Nacht /2/. Durch den Einsatz moderner, monochromer Hochleistungs-LEDs, verbesserter Kollimatoren und weiterentwickelter Mikrolinsenarrays z. B. mit hochbrechenden Polymerlenslets konnte die Helligkeit der Projektion soweit gesteigert werden, dass auch unter Tageslichtbedingungen hinreichende Beleuchtungsstärken von über 3000 lux in einem Abstand von 45 cm vom Fahrzeug erreicht werden. Eine weitere Neuerung ist die

Increasing integration of automated functionalities and driver assistance systems in future cars requires continuous improvement of status indicators and user guidance. For in-car applications, consoles with displays are available but communication with persons outside the car remains a problem. A current popular approach is projection of symbols on the street in the vicinity of the car. This requires hi-flux, efficient, miniaturized, and cost-saving projectors displaying a limited number of different images. Use of common LED-illuminated pico projectors with DLP microimagers fails because the projected flux is too small, the size too large, and because of the cost. IOF's arrayed projector technology /1/, which was commercially applied for the first time in the BMW 7 in 2015, enables the realization of strongly miniaturized luminaires for structured illumination near the car entrance area at night /2/. Using modern monochrome high power LEDs, improved collimators and advanced microlens arrays e.g. with high refractive index polymer lenslets, illuminance of 3000 lux at a distance of 45 cm from the car was achieved enabling operation in daylight conditions. A further improvement is projection of animated graphics by arranging arrayed projectors onto the same substrate in front of a multitude of individually switchable collimated LED light sources (Fig. 3).

1 Präsentation am Stand der Brose GmbH auf der Internationalen Automobilausstellung IAA2017 in Frankfurt. | Presentation at booth of Brose GmbH at International Automobile Fair IAA201, Frankfurt.

2 Arrayprojektormodul als Warnsignal. | Array projector displaying warning sign.

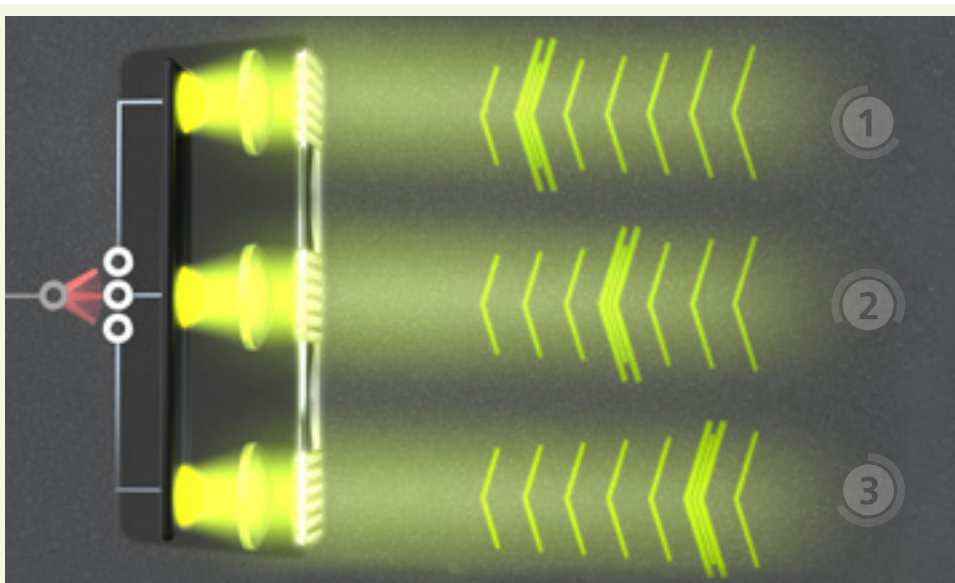
Darstellung wechselnder Bildinhalte durch die Anordnung mehrerer, individuell schaltbar beleuchteter Arrayprojektoren auf einem gemeinsamen Glassubstrat (Abb. 3)

In einem Projekt mit der Firma Brose Fahrzeugteile GmbH und Co. KG wurden derartige Projektoren zur Realisierung von Warnsignal (für Radfahrer) und Begrüßungsgrafik für automatisch öffnende Autotüren entwickelt. Der Einbauort im Fahrzeugchassis sichert eine von der Öffnung der Tür unbeeinflusste Projektion. Eine zweite Anwendung visualisiert mit einem dreistufigen Lauflicht und einer zweistufig animierten Grafik die Bedienung einer Kofferraumklappe mittels Fußkick.

In a project with the company Brose Fahrzeugteile GmbH und Co. KG, such projectors were developed for automatically opening cars, as a welcome light for the driver, and a warning signal for cyclists. The assembled projector's position in the car chassis ensures projection independent of the opening angle of the door. A second projector application guides the user for trunk opening by foot kick with a three channel projected graphics running light and a two channel animated graphic.

References / Literatur

- /1/ M. Sieler, S. Fischer, P. Schreiber, P. Dannberg, A. Bräuer: Microoptical array projectors for free-form screen applications, Opt. Express 21 (2013) No. 23, pp. 28702 - 9.
- /2/ Leuchtender Wegweiser zum Auto, Fraunhofer FORSCHUNG KOMPAKT 10 - 2015.



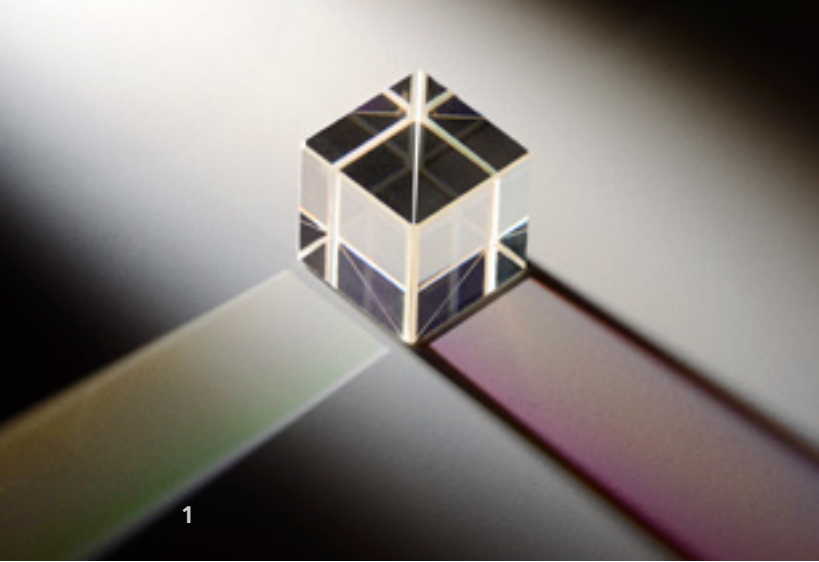
3 *Optikschema zur Projektion schaltbarer Bildinhalte. |*
Optics scheme for projection of switchable image content.

AUTHORS

Peter Schreiber
Christoph Wächter
Stephanie Fischer
Chen Li
Ralf Rosenberger

CONTACT

Dr. Peter Schreiber
Phone +49 3641 807-430
peter.schreiber@iof.fraunhofer.de



POLYMERFREIES FÜGEN OPTISCHER GLÄSER UND KOMPONENTEN

POLYMER-FREE JOINING OF OPTICAL GLASSES AND COMPONENTS

Das Fügen von Gläsern wird für Anwendungen wie Leichtgewichtsbauteile, mit Plansubstraten gedeckelte Gitter /1/ sowie die Fertigung von Gitter-Prisma-Kombinationen (GRISM) genutzt /2/. Im Rahmen des geförderten Projektes »Optibond« wurde nun der Einsatz bestehender Fügeverfahren mit und ohne Zwischenschicht für weitere optische Komponenten erarbeitet und untersucht.

Beim direkten plasmaaktivierten Bonden werden kovalente Si-O-Si-Bindungen zwischen den Fügepartnern erzeugt. Es entsteht eine hochstabile Verbindung mit optischer Transparenz bis in den UV-Bereich. Die Untersuchung einer großen Auswahl optischer Gläser, u. a. N-BK7 und N-SF6, hat gezeigt, dass sogar bleihaltige Gläser (z. B. SF11) mit einer hohen Festigkeit gefügt werden können.

Das direkte Bonden von beschichteten Komponenten erfordert deren nachträgliche Politur zur Verminderung der Oberflächenrauheit. Dieses Vorgehen bewirkt eine erhöhte Festigkeit von ca. 40 MPa statt 10 MPa, was etwa der Hälfte von unbeschichtet gefügten Bauteilen entspricht.

Als Demonstratoren wurden Strahlteilerwürfel aus Kieselglas und hochbrechenden SF11 hergestellt (Abb. 1). Das Ausrichten der Fügepartner erfolgt passiv in einer

Glass joining is used for various applications, such as light weight components, with blank covered gratings /1/ as well as for manufacturing grating-prism-systems (GRISM) /2/. Using existing bonding methods with and without interlayer for optical components were developed and investigated within the scope of the funded project "Optibond".

During direct plasma activated bonding, covalent Si-O-Si bonds are created between the joining partners. A highly stable joining with optical transparency even in the UV-range is formed. The investigation of a large variety of optical glasses, e.g. N-BK7 and N-SF6, has shown that even lead-containing glasses, e.g. SF11, can be joined with high bonding strength.

Direct bonding of coated components requires their final polishing to reduce the surface roughness. This procedure yields a higher bonding strength of 40 MPa rather than 10 MPa, which is approximately half of uncoated joined components.

Fused silica and SF11 beam splitter cubes have been fabricated as demonstrator elements (Fig. 1). The joining partners are aligned passively in high precision equipment. Applications are high power resistant beam splitters (laser

1 Hochleistungspolarisationsstrahlteiler aus SiO_2 . | SiO_2 High power polarization beam splitter.

2 Gefügte gekrümmte Substrate aus N-SF6 und N-BK7. | N-SF6 und N-BK7 joined curved substrates.

hochpräzisen Vorrichtung. Anwendungen sind leistungsbeständige Strahlteiler (Laserzerstörschwelle $0,25 \text{ J/cm}^2 @ 500 \text{ fs}$) sowie Breitbandpolarisatoren mit hohem Kontrast.

Als weiteres Verfahren wurde das silikatische Fügen mit einer mineralischen Lösung untersucht. Es entsteht eine polymerfreie, feste und stabile, visuell transparente Verbindung zwischen den Gläsern. Aufgrund der Alkaliionen aus der Silikatlösung ist die Transparenz im UV-Bereich eingeschränkt. Derart gefügte Substrate weisen Festigkeiten bis zu 80 % des massiven Materials auf. Die Methode gleicht Unebenheiten bis zu einigen Mikrometern aus und ermöglicht so das Fügen von gekrümmten Flächen und den Einsatz in der Optik und Systemtechnik. Demonstriert wurde das Verfahren zur Herstellung von achromatischen Optiken aus N-SF6 und N-BK7 (Abb. 2) sowie Zylinderlinsen-Anordnungen aus Kieselglas.

Literatur / References

- /1/ G. Kalkowski, T. Benkenstein, C. Rothhardt, F. Fuchs, U. Zeitner: Direct bonding for the encapsulation of transverse optical gratings, *Microelectronic Eng.* 110, 302-306, (2013)
- /2/ G. Kalkowski, G. Harnisch, K. Grabowski, T. Benkenstein, S. Ehrhardt, U. Zeitner, S. Risse: Low temperature GRISM direct bonding, *Proc. SPIE 95740K* (2015).

induced damage threshold $0.25 \text{ J/cm}^2 @ 500 \text{ fs}$) as well as broad band polarizers with high contrast.

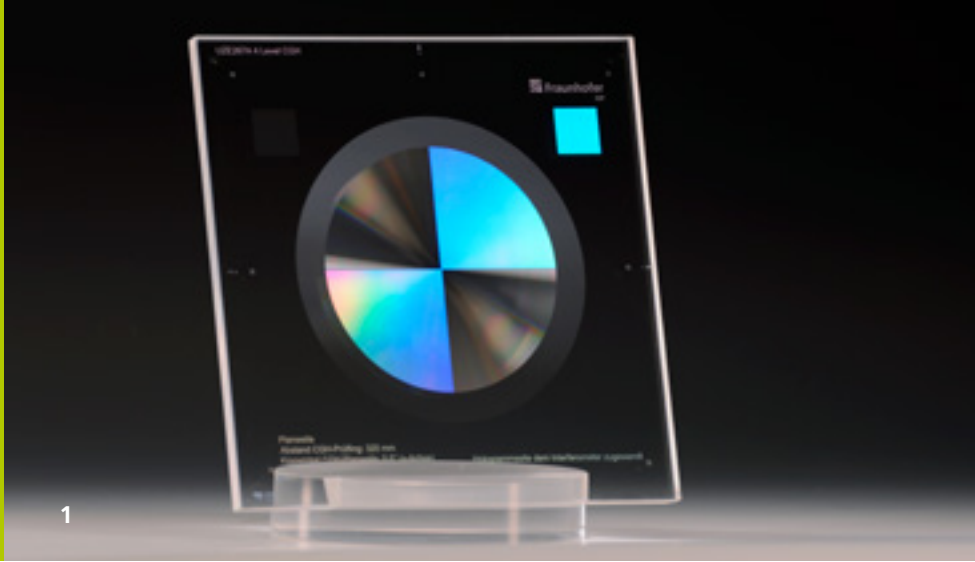
As a second method, silicate bonding using a mineral solution was investigated. A polymer-free, solid and stable, visual transparent joining between the glass components is formed. Due to alkaline ions in the silicate solution, the transparency in the UV range is limited. Thus, joined substrates show bonding strengths of 80 % of the bulk material. The method compensates for flatness errors of a few micrometers and therefore allows the joining of curved surfaces and the application in optics and system technology. The method was demonstrated for the manufacturing of achromatic optics composed of N-SF6 and N-BK7 as well as fused silica cylindrical lenses.

AUTHORS

Felix Dreisow
Carolin Rothhardt
Kevin Grabowski
Karina Jorke
Stefan Risse

CONTACT

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



ASPHÄREN PRÜF-CGH AUF BASIS VON EFFEKTIV-INDEXSTRUKTUREN ASPHERE-TEST-CGH BASED ON EFFECTIVE-INDEX STRUCTURES

Die hochgenaue Prüfung der Form sphärischer Optiken erfolgt typischerweise mit Hilfe interferometrischer Verfahren. Dabei wird die zu prüfende Fläche mit einer sphärischen Welle beleuchtet und Abweichungen des Prüflings von dieser Welle können im reflektierten Licht durch Überlagerung mit einer Referenzwelle bestimmt werden. In den letzten Jahren haben asphärische und freiformoptische Elemente zunehmend an Bedeutung für die Realisierung optischer Systeme gewonnen. Für deren Prüfung ist das oben beschriebene Verfahren so nicht einsetzbar, da ihre Oberfläche inhärent von einer sphärischen Form abweicht und damit im interferometrischen Messprozess keine auswertbaren Informationen gewonnen werden können. Hier hat sich seit Langem die Nutzung computer-generierter Hologramme (CGH) bewährt, welche spezifisch für die zu prüfende Optik eine Anpassung der interferometrischen Prüfwellen an die Oberflächenform des Prüflings realisieren. Diese CGH stellen damit eine Maßverkörperung für die zu prüfende Fläche dar. Typischerweise besteht die lichtablenkende Struktur eines CGHs aus einem binären Gitter mit örtlich variabler Periode. Diese Strukturen erreichen praktische Effizienzen von 40 % für die nutzbare Beugungsordnung. Da die Elemente zweimal durchlaufen werden, reduziert sich der für die Messung nutzbare Anteil des Lichts auf weniger als 16 %. Der restliche Lichtanteil verbleibt im Strahlengang und kann in ungünstigen Fällen eine Messung deutlich erschweren oder gar unmöglich machen. Höhere Beugungseffizienzen lassen sich z. B. durch Mikrostrukturen mit mehr Höhenstufen (4-Level Elemente) errei-

Testing of spherical optics is typically performed using interferometric methods. During such a measurement, the surface being tested is illuminated with a spherical wave and deviations of the surface shape from this wave can be characterized by superposition of the reflected light with a reference wave. In recent years, aspherical and freeform optical surfaces have gained increasing importance for the realization of optical systems. For their characterization, the above-mentioned method is no longer suitable as the surface shape inherently deviates from a sphere and no useful information can be extracted from the interferometric measurement. In such cases, the use of computer generated holograms (CGH) for adapting the interferometric illumination wave specifically to the optics being tested has been an established method for a long time. Thus, these CGHs represent a ruler for the aspherical surface. The light deflecting structure of CGHs typically consist of a binary grating with locally varying period. Such patterns achieve a diffraction efficiency in the range of 40 %, resulting in an overall light portion of only 16 %, usable for the measurement as the light passes the element twice. The unused light remains in the beam path of the interferometer and can thus interfere with the measurement, or even make it impossible. Higher diffraction efficiencies are achievable e.g. by micro-structures comprising a larger number of height levels (e.g. 4-level elements). Their lithographic realization, however, requires a significantly higher effort and

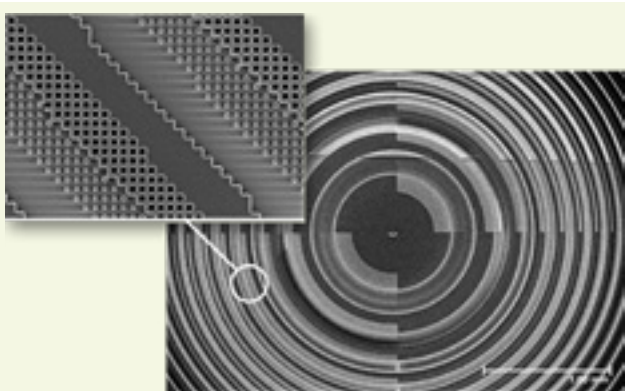
1 Effektivindex eines Asphären-Prüf-CGH. | Effective-index an asphere test-CGH.

chen. Allerdings ist deren lithographische Herstellung deutlich aufwändiger und typische Herstellungstoleranzen reduzieren die erreichbare Genauigkeit des CGHs.

Am Fraunhofer IOF wurde jetzt erstmals ein Prüf-CGH realisiert, bei dem die effizienz erhöhende multi-level Funktion auf der Basis von Sub-Wellenlängenstrukturen umgesetzt wurde. Diese Strukturen werden auf Grund ihrer geringen lateralen Abmessungen vom Licht des Interferometers nicht einzeln aufgelöst, durch eine Variation des lokalen Füllfaktors dieser Strukturen kann jedoch eine örtlich variierende Phasenverzögerung gezielt eingestellt werden. Optisch wirken diese Strukturen wie ein Material mit effektivem Brechungsindex, der vom Füllfaktor abhängig ist. Besonders vorteilhaft an dieser Realisierungsvariante ist, dass die effektiv-Indexstruktur durch ein rein binäres Oberflächenprofil in einem einzelnen lithographischen Strukturierungsschritt erzeugt wird. Dadurch ist die erreichbare Wellenfrontgenauigkeit identisch zu der eines einfachen 2-Level CGHs und der Genauigkeitsverlust kann infolge aufeinanderfolgender Lithographieschritte vollständig vermieden werden. Mit dem realisierten Prüf-CGH konnte eine Beugungseffizienz von 76 % im Einmaldurchgang erreicht werden, was dem theoretisch erwarteten Wert exakt entspricht.

the typical fabrication tolerances are reducing the wave-front accuracy of the CGH.

For the first time, the efficiency improving multi-level function of such an asphere test CGH has been realized by sub-wavelength structures at the Fraunhofer IOF. Because of their small lateral dimensions, the interferometric light does not resolve these structures. Nevertheless, by locally varying the duty-cycle of the structures, a lateral variation of the phase-delay can be implemented. Their optical function is therefore similar to that of a material with locally varying effective refractive index. A great advantage of this realization method for a multi-level structure is the fact that only a binary surface profile is required which is fabricated in a single lithographic patterning step. Consequently, the achievable wave-front accuracy is identical to that of a simple 2-level CGH and the accuracy reduction due to subsequent lithography layers can be completely avoided. The realized test CGH was characterized to show a diffraction efficiency of 76 % in single pass transmission, which corresponds exactly to the theoretically expected value.



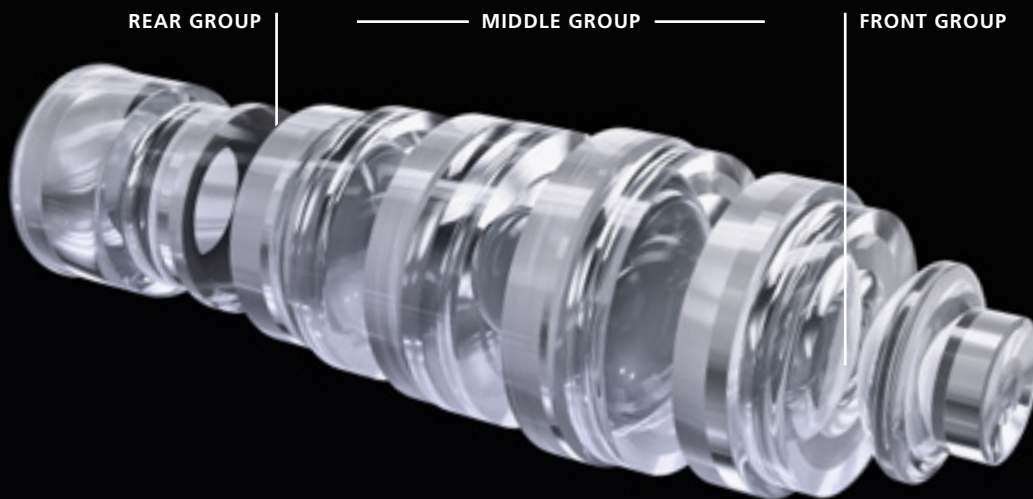
2 REM Aufnahme der CGH Nano-Struktur. |
SEM image of the CGH's nano-structure.

AUTHORS

Uwe D. Zeitner
Frank Burmeister
Thomas Flügel-Paul
Philipp Schleicher
Tino Benkenstein

CONTACT

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



UNTERSUCHUNG VON DESIGN-REGELN FÜR MIKROSKOPOBJEKTIVE

INVESTIGATION OF MICROSCOPIC LENSES

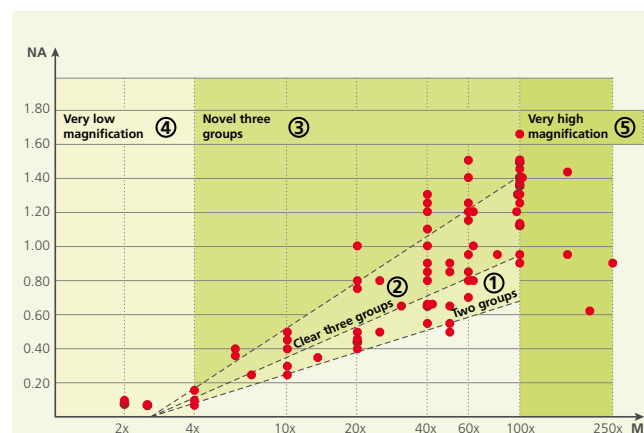
Das Objektiv ist die wichtigste optische Komponente eines Mikroskops, da dessen Qualität den Bildkontrast und die Auflösung vordergründig bestimmt. Obwohl Mikroskopobjektive bereits seit mehreren 100 Jahren entwickelt werden gibt es nur wenig Literatur zur Systematik verschiedener Designansätze /1/. Um eine solche Systematik zu entwickeln, wurde zunächst eine Datenbank aus mehreren hundert patentierten Mikroskopobjektiven aufgebaut /2/.

Sortiert man alle diese Objektive an Hand ihrer Vergrößerung und numerischen Apertur, so lassen sich fünf charakteristische Gebiete identifizieren, die jeweils durch Geraden im halb-logarithmischen Koordinatensystem abgegrenzt werden können (Abb. 2). Diese Klassifizierung spiegelt auch die zeitliche Entwicklung der Mikroskopobjektive von 1830 bis heute wider.

Die Designs der 2. und 3. Objektivklasse lassen sich an Hand ihrer geometrischen Struktur und der Funktionalität für die Aberrationskorrektur klar in drei Linsengruppen unterteilen (Abb. 1). Die beiden stärksten Aberrationen der vordersten Gruppe, sphärische Aberration und Koma, werden meist in der mittleren Gruppe kompensiert. Dagegen ist Astigmatismus etwas kleiner und wird durch eine symmetrische hintere Gruppe korrigiert. Genauso wird die Petzval-Feldkrümmung aus der ersten Gruppe mit Hilfe

The modern microscopic objective is the most sophisticated optical component in microscopes, providing high contrast images with diffraction-limited resolution. The design of microscopic objectives has been in development for over a hundred years; however, a systematic synthesis approach is rarely reported /1/. To understand the systematic behavior, we implemented a database with hundreds of patented objective examples /2/.

Sorted by magnification versus numerical aperture (NA), systems could be classified into five zones with linear boundaries on semi-log coordinates, shown in Figure 2.



2 Einteilung aller Mikroskopobjektive der Datenbank in fünf Klassen. | Overview of microscopic objective database with five zones classification.

1 Mikroskopobjektiv mit Einteilung in drei Linsengruppen. |
Microscope lens with clear three group division.

dicker Meniskuslinsen in der dritten Gruppe kompensiert. Der axiale Farbfehler wird in der mittleren Gruppe korrigiert, während der laterale Farbfehler durch die letzte Gruppe kontrolliert wird.

Die unterschiedlichen Designs wurden aus der Datenbank eingehend untersucht und jeweils in einzelne funktionale Linsen-Module zerlegt. Umgekehrt können mit Hilfe dieser Module bestehende Designs angepasst oder auf systematische Weise neu entwickelt werden. Ein solcher Syntheseprozess ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

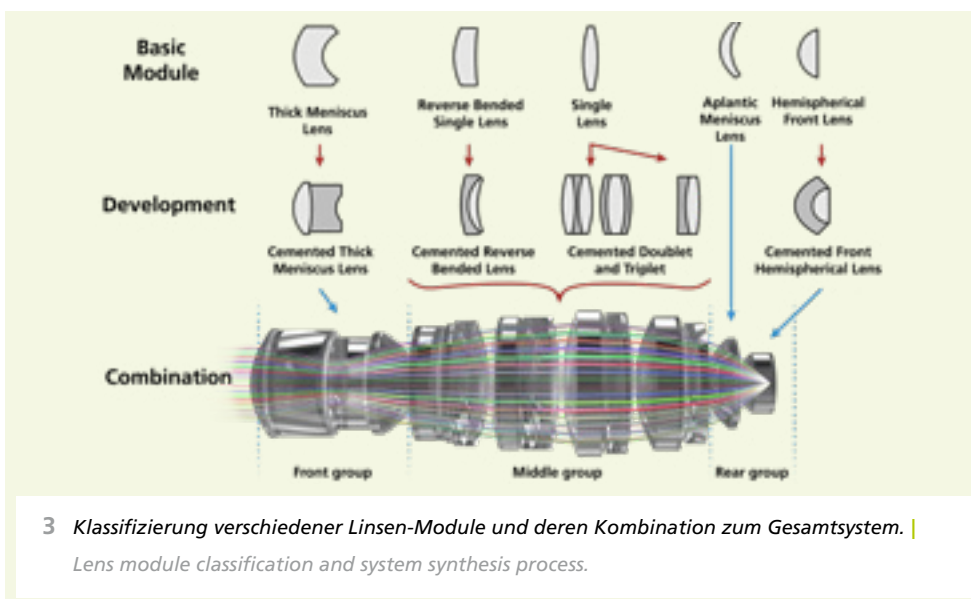
Literatur / References

- /1/ D. N. Frolov: Synthesis of the optical systems of lens objectives for microscopes, J. Opt. Technol. 69, 614 (2002).
/2/ Y. Zhang, H. Gross: Systematic design of microscopic lenses, Proc. SPIE ODC17.

The classification also implies the trend of the objective evolution from the 1830s to recent years.

According to the structural characteristic and functionality for aberration correction, the most significant zone 2 and zone 3 objectives could be divided clearly into three groups, illustrated in Figure 1. The spherical aberration and coma, which are introduced in the front group, are mostly corrected by the middle group. Astigmatism, which is slightly added by the front group, is compensated by a symmetric rear group. The positive Petzval curvature in the front group has to be compensated by meniscus thick lenses in the rear group. Axial chromatic aberration is corrected in the middle group, while the lateral chromatic aberration is corrected or controlled by the rear group.

The design principles are further investigated and summarized as lens module behavior. As a reversed process, a systematic approach for system modification and synthesis was achieved, the process of which is briefly demonstrated as Figure 3.



AUTHORS

Yueqian Zhang
Herbert Gross

CONTACT

Yueqian Zhang
Phone +49 3641 9-47994
yueqian.zhang@uni-jena.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



FEINMECHANISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME / PRECISION ENGINEERING COMPONENTS AND SYSTEMS

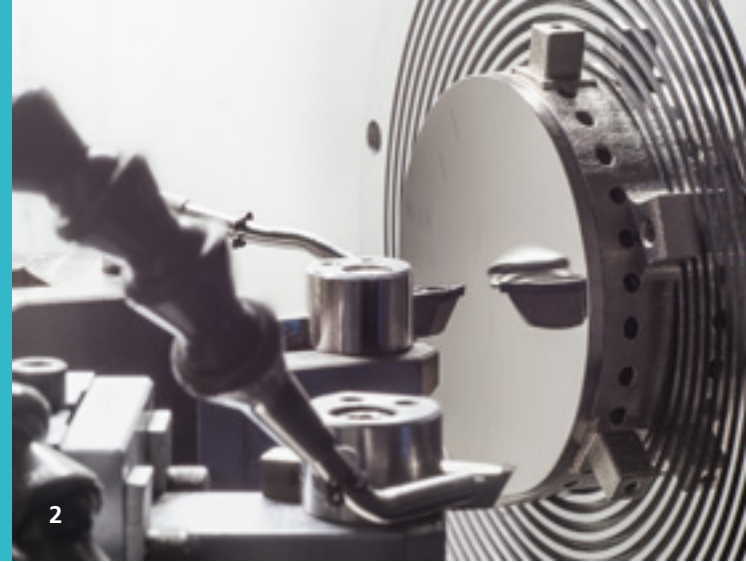
Die Kombination von Feinmechanik und Optik stellt ein strategisches Alleinstellungsmerkmal des Fraunhofer IOF innerhalb der deutschen und europäischen Forschungslandschaft dar und setzt die Tradition Jenas als einen der führenden Optikstandorte fort. Das Geschäftsfeld Feinmechanische Komponenten und Systeme betreibt die kundenspezifische Auslegung und Fertigung von mechanischen Baugruppen und Maschinen für verschiedene Anwendungen – auch für extreme Anforderungen, wie Ultrahochvakuum oder kryogene Temperaturen. Ein Schwerpunkt sind Systeme unter Einsatz von Leichtgewichtsstrukturen, welche zum Teil mittels Additiver Fertigung hergestellt werden. Diese Komponenten und Systeme finden vielfach Verwendung in der Raumfahrt. Weiterhin werden neue Verfahren zur Aufbau- und Verbindungstechnik von optischen Systemen (z. B. Laserlöten) und darauf basierend Vorrichtungen und Sondermaschinen entwickelt.

Die Bandbreite der in diesem Geschäftsfeld in 2017 abgeschlossenen Projekte zeigt sich in den nachfolgenden Beiträgen. Die Themen reichen von der additiven Fertigung von Metallspiegeln bis hin zu Aufbau- und Verbindungstechniken für weltraumtaugliche Systeme.

The combination of precision mechanics and optics represents a strategic unique feature of Fraunhofer IOF within the German and European research landscape, and continues Jena's tradition as one of the leading optics centers. The business unit Precision Engineering Components and Systems is responsible for customer-specific design and the manufacturing of mechanical assemblies and machines for very different applications – even for extreme requirements such as ultra-high vacuum or cryogenic temperatures. A focus is on systems with lightweight structures, which are partly manufactured by means of additive manufacturing. These components and systems are widely used in space. Furthermore, new methods for the assembly and integration of optical systems (e.g. laser soldering) and devices and special machines based on them are developed.

The range of projects completed in this business field in 2017 is shown in the following articles. The topics range from additive manufacturing of metal mirrors to assembly and connection technologies for space-capable systems.

LEFT *Bauteilentnahme aus einer Anlage zum selektiven Laserschmelzen von Metallen. | Component removal from an equipment for selective laser melting of metals.*



ADDITIVE FERTIGUNG VON ULTRALEICHTEN METALLSPIEGELN ADDITIVE MANUFACTURING OF LIGHTWEIGHT METAL MIRRORS

Eine Vielzahl wissenschaftlicher Instrumentierungen für die Erdbeobachtung oder für spektroskopische Untersuchungen der Atmosphäre basieren auf Metalloptiken. Neben den Anforderungen an die optische Performance und die mechanischen Kennwerte der Spiegel ist auch das Gewichtsbudget von großer Bedeutung. Etablierte Leichtgewichts-Ansätze reduzieren die Masse durch spanende Verfahren. In Abhängigkeit von der Geometrie und der Bearbeitungsrichtung werden Gewichtseinsparungen von 30 % - 50 % erreicht. Die Entfernung von Material von der Rückseite kann die Steifigkeit des Spiegels negativ beeinflussen.

Eine neue Herstellungsmethode für Metalloptiken ist das Pulverbett-Verfahren des selektiven Laserschmelzens (SLM). Durch die Nutzung additiver Herstellungsverfahren ist eine individuell designte Leichtgewichtsstruktur realisierbar, die Gewichtseinsparungen von bis zu 70 % erlaubt. Durch eine nahezu geschlossene Außenhülle sind sehr steife Designlösungen möglich.

Komplexe Leichtgewichtsstrukturen sind realisierbar und können durch Finite-Element-Methoden bereits im Konstruktionszustand analysiert und optimiert werden. Neben klassischen, periodischen Strukturen können Topologie optimierte Ansätze und Strukturen genutzt werden. Diese optimierten

Many scientific instruments for earth observation or spectroscopic studies of the earth's atmosphere are based on metal mirrors. In addition to the requirements for the optical performance and the mechanical characteristics of the mirror, the mass budget is also an important specification. Established approaches for lightweight designs are based on the material removal using cutting technologies. Based on the geometry and the area of material removal, mass savings of 30 % up to 50 % can be achieved. When machining the rear side, a negative impact on the stiffness of the mirror must be taken into account.

A new method of manufacturing metal optics is the powder-bed based technology of Selective Laser Melting (SLM). Individually designed lightweight structures can be realized by this additive manufacturing technology, enabling a mass reduction of up to 70 %. By keeping the outer surface of the mirror almost completely closed, very stiff designs can be achieved.

Complex internal lightweight structures can be designed with a variety of configurations, which can be analyzed and optimized during the CAD process. Besides the traditional periodic structures, topology optimized approaches can be used. These optimized structures are based on the possibility

- 1 *Additiv gefertigter Leichtgewichtsdemonstrator. | Additive manufactured lightweight demonstrator.*
- 2 *Leichtgewichtsdemonstrator nach UP-Bearbeitung. | Lightweight demonstrator after Diamond-Based Ultra-Precision Processing.*

Strukturen bieten durch angepasste Volumenverteilungen die Möglichkeit, belastete Bereiche gezielt zu verstärken und das Design auf die auftretenden Lastfälle zu optimieren.

Die Werkstoffauswahl für das SLM-Verfahren wurde optimiert, um ein athermales Konzept zu realisieren. Die Verarbeitung eines Aluminium-Silizium Werkstoffes mit einem hohen Silizium-Anteil von 40 % ist mit sehr geringer Porosität ($< 0,01$ %) möglich. Die mechanische Stabilität der additiv hergestellten Spiegelkörper konnte durch Shock und Vibration Tests verifiziert werden.

Die additiv gefertigten Grundkörper können mit der etablierten Prozesskette der Optikfertigung bearbeitet werden. Die Bearbeitung der Optikfläche mittels ultra-präziser Diamantbearbeitung und die Beschichtung mit Nickel-Phosphor sind möglich. Nach der Finish-Bearbeitung mittels magnetorheologischem Polieren wurden Formabweichungen kleiner 150 nm PV und Rauheiten von 2 nm RMS erreicht.

Danksagung

Teile der Arbeiten wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Rahmen des Projektes ultraLEICHT (FKZ 50EE1408) gefördert.

to selectively increase the material fraction in areas of high mechanical stress and save material in other areas. Therefore, it is possible to use tailored designs for specific load cases. The material selection for the SLM process is optimized to enable an athermal design. The aluminum-silicon material with a high silicon content of 40 % can be processed with a very low final porosity of < 0.01 %. The mechanical stability of the additive manufactured mirrors was verified by shock and vibration tests.

The additively made base-body can be handled with the well-established opto-mechanical process chain for metal mirrors. The machining of the optical surface with ultra-precision diamond turning, as well as the coating with electro-less nickel, is possible. After finishing with magnetorheological polishing, achievable shape deviations are below 150 nm peak-to-valley and a roughness of 2 nm rms was achieved.

Acknowledgement

Parts of the work were funded by the German Aerospace Center (DLR) within the project ultraLEICHT under grant number 50EE1408.

AUTHORS

Nils Heidler,
Enrico Hilpert,
Johannes Hartung,
Stefan Risse

CONTACT

Dr. Nils Heidler
Phone +49 3641 807-379
nils.heidler@iof.fraunhofer.de



1

AUFBAU UND VERBINDUNGSTECHNIK FÜR DIE EXOMARS MISSION ASSEMBLY AND JOINING TECHNIQUES FOR THE EXOMARS MISSION

Die für 2020 angesetzte ExoMars Mission der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) hat das Ziel, die Marsoberfläche auf ihre mineralogische Zusammensetzung hin zu analysieren und somit Spuren von Leben auf dem Mars zu suchen. Die Exomars-Mission wird erstmals das Fahren mit einem Rover auf dem Planeten, die Stationierung einer wissenschaftlichen Oberflächenplattform und das Bohren bis zu 2 m unter der Oberfläche kombinieren ^{1/}. Für die Analyse der Marsoberfläche, durch Raman Spektroskopie von dem Rover aus, wurde am Fraunhofer IOF in Kooperation mit dem spanischen Laserhersteller Monocrom ein frequenzverdoppelter diodengepumpter Festkörperlaser (DPSSL) für 532 nm Wellenlänge gebaut.

Die größten Herausforderungen bei dieser Arbeit bestanden darin, ein kleines DPSSL-Bauelement (<50 g) zu realisieren, welches die optische Leistung in Bezug auf Wellenlänge und Leistungsstabilität gewährleistet, aber auch unter rauen Umgebungsbedingungen funktioniert. Darüber hinaus musste der Laser auch die ESA-Planetenschutzstandards und eine extrem hohe Reinheit garantieren.

Gewöhnliche Montagetechniken wie Klebe- oder Klemmverfahren waren nicht in der Lage, die oben erwähnten strengen Anforderungen zu erfüllen. Daher wurde die laserbasierte Solderjet Bumping Technik genutzt, um den miniaturisierten

The goal of the ExoMars mission of the European Space Agency (ESA) is to examine the surface of Mars to search for signs of past and present life on the planet and characterize geochemical structures. The Exomars mission will be the first Martian research that comprises the combining capabilities of driving with a rover across the planet, drilling up to 2 m below the surface, and having a stationary science surface platform ^{1/}. For the purpose of analyzing the Martian samples by Raman Spectra measurements from the rover, a doubled 532 nm diode-pumped solid-state laser (DPSSL) was built at the Fraunhofer IOF in cooperation with the Spanish laser manufacturer Monocrom.

The main challenges of this work were to assemble a small DPSSL device (< 50 g), assuring optical performance in terms of wavelength and power stability, but also proving its capability to work in harsh environmental conditions. Moreover, the laser had to guarantee ESA Planetary protection standards and ultra-high cleanliness; outgassing total mass loss (TML) < 0.1 % and collected volatile condensable materials (CVCM) < 0.01 % ^{2/}.

Ordinary assembly techniques such as adhesive based or clamping methods were not able to fulfill the above-mentioned stringent aerospace imposed requirements. Thus, the laser-based soldering Solderjet Bumping technique

¹ *Diodengepumptes Festkörperlasermodul (DPSSL) für die ExoMars Mission. |*

Diode-pumped solid-state laser module (DPSSL) for the ExoMars mission.

grünen Laser zu montieren /3/. Laserbasierte Lötverfahren eignen sich besonders gut zum Fügen von optischen Bauteilen aus bruchempfindlichen und/oder spröden Materialien wie Glas, Keramik und optischen Kristallen aufgrund eines lokalisierten und minimierten Eintrags von thermischer Energie. Bei der Solderjet-Bumping Technik werden sphärische Lotformteile verwendet, die durch einen präzisen Laserpuls geschmolzen und durch einen diskreten Stickstofflaserpuls an der gewünschten Position platziert werden /4/.

Das Fraunhofer IOF hat in Zusammenarbeit mit Monocrom die mit der Solderjet Bumping Technik montierten Flugmodullaser an das Spanische Institut für Luft- und Raumfahrttechnik (INTA) geliefert. Dort wurden sie im Raman Spektrometer Instrument (RLS) montiert. Dieses wird abschließend der ESA übergeben. Der Start der ExoMars Mission ist für 2020 geplant, wenn der Rover mit einer russischen Proton-Rakete aus Baikonur in den Weltraum fliegt.

Literatur / References

- /1/ <http://exploration.esa.int/mars/56934-european-payload-selected-forexomars-2018-surface-platform/>
- /2/ P. Ribes-Pleguezuelo et al.: Opt. Eng., Vo. 55, Iss. 11, 116107 (2016); doi: 10.1117/1.OE.55.11.116107.
- /3/ P. Ribes-Pleguezuelo et al.: Journal of the European Optical Society – Rapid Publications, SpringerOpen, (2017); doi: 10.1186/s41476-017-0063-7.
- /4/ P. Ribes-Pleguezuelo et al.: Proc. SPIE 9520, Integrated Photonics: Materials, Devices, and Applications III, 952009, Barcelona, Spain, (2015); doi:10.1117/12.2178373.

was used to assemble the miniaturized green laser /3/. Laser-based soldering processes are especially well suited to the joining of optical components made of fragile and/or brittle materials such as glasses, ceramics, and optical crystals due to a localized and minimized input of thermal energy. Solderjet bumping technique uses spherical solder preforms that are molten by a precise laser pulse and jetted to the desired position through a discrete nitrogen laser pulse /4/.

Fraunhofer IOF, in cooperation with Monocrom, handled the required Flight Module lasers assembled by the Solderjet bumping technique to the Spanish National Institute of Aerospace Technology (INTA), where they were mounted to the Raman Spectrometer Instrument (RLS) which will finally be delivered to ESA. The launch of the space mission is scheduled for 2020, when the ExoMars rover will be going into space with a Russian Proton rocket from Baikonur.

AUTHORS

Pol Ribes-Pleguezuelo
Marcel Hornaff
Steffen Gramens
Erik Beckert

CONTACT

Dr. Erik Beckert
Phone +49 3641 807-338
erik.beckert@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN UND SCHICHTEN

FUNCTIONAL SURFACES AND LAYERS

Das Fraunhofer IOF entwickelt Oberflächenfunktionalisierungen und multifunktionale optische Schichtsysteme auf unterschiedlichen Substratmaterialien für Wellenlängen vom Röntgen- bzw. Extrem-Ultravioletten- bis zum Infrarot-Spektralbereich. Dabei wird der gesamte Prozess von Design, Herstellung bis hin zur Analyse und Charakterisierung für vielfältigste Anwendungen abgedeckt.

Bei der Entwicklung innovativer Entspiegelungen sowie reflektiver Hochleistungsschichten ist das Fraunhofer IOF weltweit führend. Zudem bietet das Fraunhofer IOF Lösungen für hochwertige Antireflexsysteme auf ebenen oder gekrümmten Glas- und Kunststoffoberflächen bis hin zur Entspiegelung von Saphir oder Diamant. Atomlagenabscheidung (ALD) als leistungsstarke Beschichtungstechnologie ermöglicht konformes Dünnschichtwachstum organischer oder auch hybrid organisch-anorganischer Beschichtungen auf nano-/mikrostrukturierten Substraten wie auch auf Freiformen.

Das Fraunhofer IOF ist dank seiner einzigartigen Ausstattung in der Lage, extreme Anforderungen in Bezug auf Substrate, Gradienten, spektrale Eigenschaften und Umweltbedingungen zu erfüllen.

Die in 2017 in diesem Geschäftsfeld abgeschlossenen Projekte zeigen in den nachfolgenden Beiträgen eine große Bandbreite: Entspiegelung von Glas- und Kunststofflinsen, ALD Antireflexschichten, Streulichtmesstechnik, Black Germanium Antireflexstrukturen.

Fraunhofer IOF develops surface functionalizations and multifunctional optical layer systems on different substrate materials for wavelengths from the X-ray or extreme ultraviolet to the infrared spectral range. The entire process, from design and production to analysis and characterization, is covered for a wide range of applications.

Fraunhofer IOF is a world leader in the development of innovative antireflective coatings and reflective high-performance coatings. In addition, Fraunhofer IOF offers solutions for high-quality antireflex systems on flat or curved glass and plastic surfaces, as well as antireflection coatings on sapphire or diamond. Atomic layer deposition (ALD) as a high-performance coating technology enables conformal thin-film growth of organic or hybrid organic-inorganic coatings on nano-/microstructured substrates as well as on free forms.

Thanks to its unique equipment, Fraunhofer IOF is capable of fulfilling extreme requirements in terms of substrates, gradients, spectral properties, and environmental conditions.

In the following articles, the projects completed in 2017 in this business field demonstrate a wide spectrum: antireflective coating of glass and plastic lenses, ALD antireflection coatings, scattered light measurement technology, Black Germanium antireflex structures.

LEFT *Entspiegelung komplexer Substrate mittels Atomlagenabscheidung. | Antireflection coatings on complex substrates by atomic layer deposition.*



3D-KONFORME ANTIREFLEX-SCHICHTEN MITTELS ALD

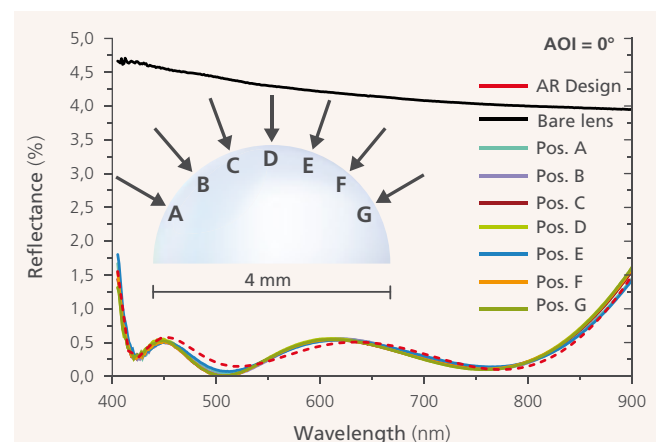
3D CONFORMAL ANTIREFLECTIVE COATINGS BY ALD

Antireflexschichten basieren auf Interferenzschichtsystemen aus hoch- und niedrigbrechenden Materialien, welche gleichmäßig und mit präziser Schichtdicke abgeschieden werden müssen. Konventionelle physikalische Abscheidungsverfahren erzeugen jedoch auf stark gekrümmten Oberflächen ungleichmäßige Schichtdickenverteilungen, welche die optische Funktion beeinträchtigen. Wir demonstrieren, dass Atomlagenabscheidung (ALD) ein geeignetes Verfahren ist, um Entspiegelungen auf stark gekrümmten Substraten zu erreichen. ALD basiert auf zyklischen, selbstbegrenzenden Oberflächenreaktionen, wobei die Schichtdicke unabhängig von der Probengeometrie durch die Anzahl der ALD-Zyklen definiert wird.

Mit einem $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -Mehrschichtsystem wurde die Reflexion einer Quarzglas-Halbkugellinse im Wellenlängenbereich von 390 nm bis 750 nm auf $R_{av} < 0,3\%$ verringert (Abb. 2). Eine sehr gute Übereinstimmung der entlang der Oberfläche gemessenen Reflektivität und dem AR-Design konnte gezeigt werden.

Ferner wurden Einzelschicht-Entspiegelungen aus nanoporösem SiO_2 verwendet. Diese Schichten wurden durch die Abscheidung von $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ -Mischungen realisiert, wobei der Al_2O_3 -Anteil anschließend nasschemisch entfernt wurde. Wir erreichen eine gleichmäßige Entspiegelung einer

Antireflective (AR) coatings based on the interference of the reflections at the interface of alternating thin films with low and high refractive indices require precise thickness control. Conventional physical vapor deposition techniques usually produce a non-uniform thickness distribution on strongly curved substrates which severely affects the optical function. We demonstrate the suitability of atomic layer deposition (ALD) to achieve high AR performance even on steeply curved substrates. ALD is based on cyclic self-limiting surface reactions. The thickness of each layer is determined by the number of ALD cycles regardless of the substrate's shape.



2 Reflektivität einer mittels ALD-Mehrschichtsystems entspiegelten Halbkugel. | Reflectance of an ALD-multilayer AR coated half-ball lens.

1 Stark gekrümmte Linsen für ALD-Beschichtung. | Highly curved lenses for ALD coating.

asphärischen B270-Linse mit $R_{av} < 0,1\%$ im Wellenlängenbereich von 600 nm bis 700 nm (Abb. 3).

ALD ist ein vielversprechendes Verfahren zur Abscheidung von dünnen optischen Schichten auf komplex geformten Komponenten, wie z. B. konvexen oder konkaven Linsen, Zylindern, Kugellinsen, Röhrchen oder anderen Substraten, die mit konventionellen Abscheidungsverfahren nur schwierig zu funktionalisieren sind.

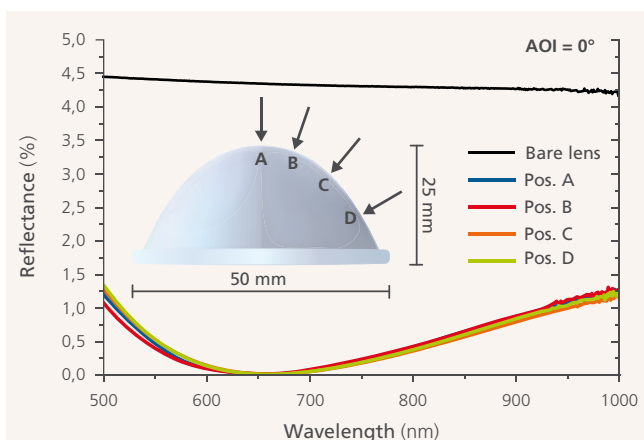
Literatur / References

- /1/ K. Pfeiffer, U. Schulz, A. Tünnermann, A. Szeghalmi: Coatings, 7, 118 (2017).
/2/ L. Ghazaryan, E. B. Kley, A. Tünnermann, A. Szeghalmi: Nanotechnology, 27, 255603 (2016).

An ALD $Al_2O_3/TiO_2/SiO_2$ -multilayer system has been applied to a fused silica half-ball lens to reduce the reflectance to $R_{av} < 0.3\%$ in the wavelength range of 390 nm to 750 nm (Fig. 2). Excellent agreement of all measured spectra along the lens surface and the design is demonstrated.

Furthermore, single layer AR coatings consisting of nanoporous SiO_2 have been applied. These layers have been realized by the deposition of $Al_2O_3:SiO_2$ composite materials, where the alumina component was removed by subsequent wet chemical etching. We achieved a conformal AR with $R_{av} < 0.1\%$ in the wavelength range of 600 nm to 700 nm on an aspheric B270 lens (Fig. 3).

Atomic layer deposition is a promising technology for coating thin optical films on complex shaped components, such as convex and concave lenses, cylinders, ball lenses, in tubes or other substrates which are difficult to functionalize precisely with conventional coating technologies.



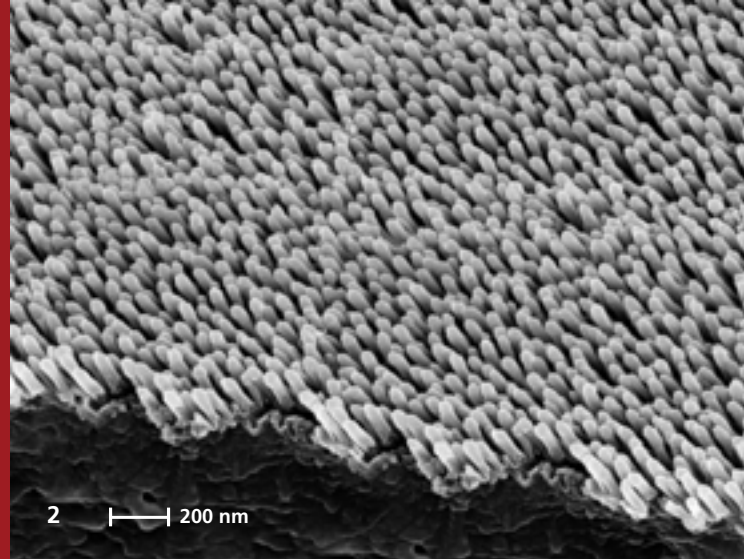
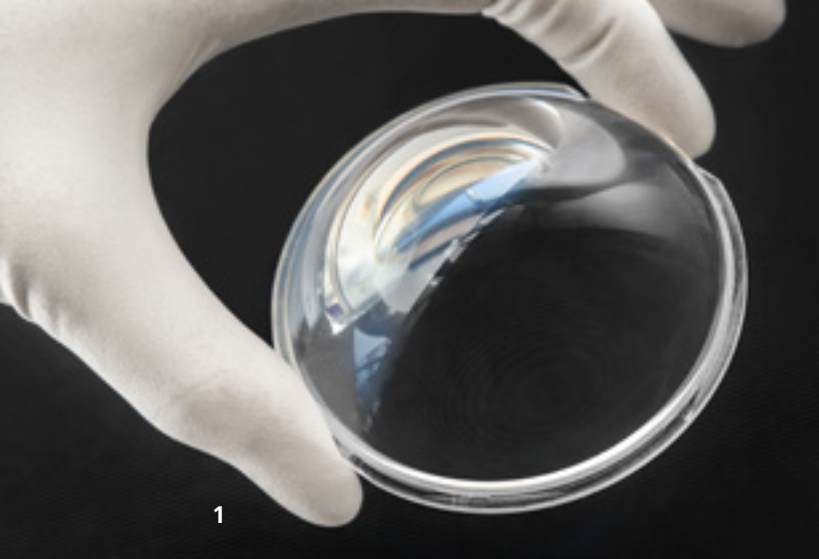
3 Reflektivität einer mittels nanoporöser SiO_2 -Einzelschicht entspiegelten Asphäre. | Reflectance of a nanoporous SiO_2 single-layer AR coated aspheric lens.

AUTHORS

Kristin Pfeiffer
Lilit Ghazaryan
Ulrike Schulz
Adriana Szeghalmi

CONTACT

Dr. Adriana Szeghalmi
Phone +49 3641 807-320
adriana.szeghalmi@iof.fraunhofer.de



ENTSPIEGELUNG AR-PLAS2 FÜR GLAS- UND KUNSTSTOFFLINSEN ANTIREFLECTION COATING AR-PLAS2 FOR GLASS- AND PLASTIC LENSES

Gegenwärtig gibt es einen wachsenden Bedarf an extrem guten Antireflexschichten, die auch auf kompliziert geformten Oberflächen funktionieren müssen. Die Entspiegelung stark gekrümmter Linsen stellt dabei noch immer eine Herausforderung dar, insbesondere wenn zusätzlich hohe Anforderungen bezüglich der Lichteinfallswinkel bestehen. Industriell eingesetzte PVD Aufdampfprozesse ermöglichen keine konforme Schichtabscheidung, was dazu führt, dass die Entspiegelungsbereiche herkömmlicher Schichtsysteme in den geneigten Bereichen der Oberfläche zu kürzeren Wellenlängen verschoben sind. Eine konforme Beschichtung solcher Oberflächen ist an Versuchsanlagen am Fraunhofer IOF mittels Atomic Layer Deposition möglich. Diese Technologie befindet sich auf dem Weg zur Anwendung in der optischen Industrie, kann zur Zeit aber nur einen Teil der Herausforderungen lösen.

Um mittels etablierter Aufdampfprozesse eine sehr gute Reflexminderung im visuellen Spektralbereich entlang gekrümmter Linsenoberflächen zu gewährleisten, kann der Spektralbereich der Entspiegelung so weit verbreitert werden, dass die spektrale Verschiebung auf geneigten Flächen kompensiert wird. Entscheidend für eine sehr geringe Restreflexion ist eine niedrige effektive Brechzahl $n < 1,15$ der letzten nanostrukturierten Schicht. Gleichzeitig können damit auch die Anforderungen

There is an increasing demand for high performance antireflection (AR) coatings applied to complexly shaped surfaces. The application of such coatings on strongly curved lenses remains a challenge, particularly when a wide range of light incidence angles is required. PVD deposition processes, commonly used in industry, are not suitable for conformal coating resulting in a shift to shorter wavelength of the antireflection band on inclined areas. Conformal coating deposition has recently been made possible at Fraunhofer IOF using Atomic Layer Deposition pilot plants. This technology is being developed for use in the optics industry; however, it can only partly solve the challenges.

To achieve excellent antireflection properties over the full area of a curved lens with well-established evaporation technology, it is necessary to compensate the spectral shift by widening the AR bandwidth. The crucial factor for minimal remaining reflection is a low effective refractive index $n < 1.15$ for the final, nanostructured layer. At the same time, requirements for high angles of light incidence can be achieved more easily than before.

Fraunhofer IOF has identified new organic materials suitable for the generation of nanostructures with refractive indices

1 Kunststofflinse mit farbneutral entspiegelter Teilfläche. |

Plastic lens with color neutral antireflection coating on right lens part.

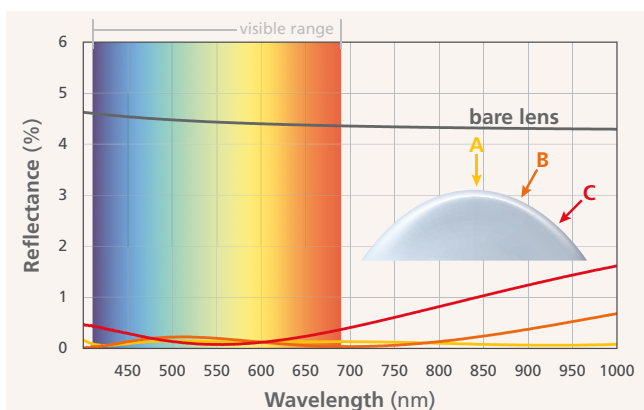
2 Nanostrukturierte Oberfläche bestehend aus Uracil/SiO₂. |

Nanostructured surface consisting of Uracil/SiO₂.

für große Lichteinfallswinkel besser als bei herkömmlichen Lösungen erfüllt werden.

Am Fraunhofer IOF wurden einige neue organische Materialien identifiziert, welche für die Ausbildung von Nanostrukturen mit effektiven Brechungsindizes im Bereich $1,08 < n < 1,25$ sehr gut geeignet sind. Die auf der Basis dieser Materialien erzeugten Schichtsysteme AR-plas2® sind im industriellen Maßstab kostengünstig herstellbar. Die Schichtsysteme werden aus nicht mehr als 2-3 Elementen aufgebaut und zeichnen sich durch eine hohe Klimabeständigkeit aus. Auf Kunststofflinsen kann die erste strukturierte Schicht durch Plasmabehandlung direkt in das Substrat eingebracht werden. In einem patentierten Verfahren wird eine Nanostruktur durch Ätzen einer organischen Schicht ausgebildet, welche die Geometrie der nachfolgenden anorganischen Schicht determiniert (Abb. 2). Nach weiteren Prozeduren enthält das fertige Schichtsystem lediglich noch geringe Spuren des organischen Materials und ist entsprechend stabil und transparent bis in den ultravioletten Spektralbereich. Die neuen verlustarmen Beschichtungen ermöglichen eine farbneutrale Reflexminderung gekrümmter Linsen und Oberflächen im sichtbaren Spektralbereich mit einer mittleren Restreflexion $< 0,2\%$ (Abb. 3).

in a range from $1.08 < n < 1.25$. The antireflection coating AR-plas2®, which is based on these materials, can be manufactured cost effectively and on an industrial scale. These multilayer coatings consist of only two to three elements and are distinguished by their excellent environmental stability. On a plastic lens surface, it is possible to etch the first structure directly into the substrate. A nanostructure is formed by etching an organic layer with the use of a patented procedure. This organic structure determines the topography of the subsequently deposited inorganic layer (Fig. 2). After special post-treatments, the final coating contains only residuals of the organic material and is subsequently stable and UV-transparent. These new low-loss coatings allow a color neutral reduction of the reflectance for curved lenses with an average remaining reflectance of $< 0.2\%$ over the visible wavelength range (Fig. 3).



3 Reflexion einer optischen Linse mit Entspiegelung AR-plas2. |
Reflectance of optical lens with antireflection coating AR-plas2.

AUTHORS

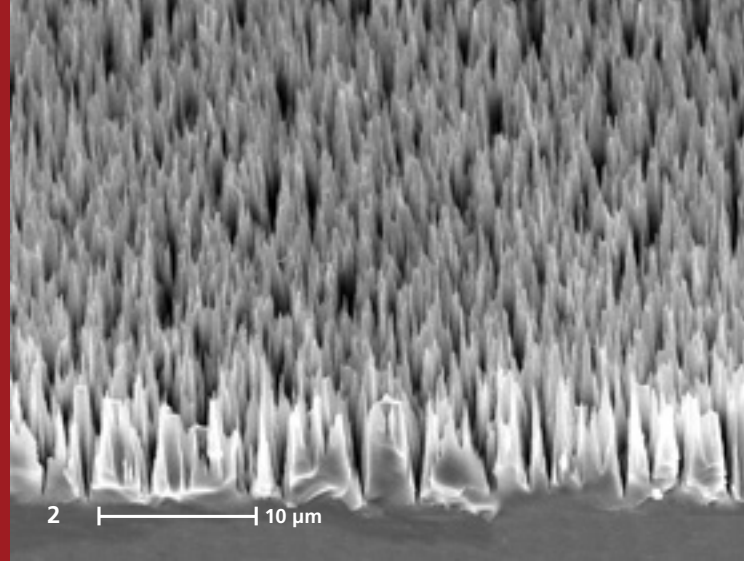
Ulrike Schulz
Peter Munzert
Friedrich Rickelt
Heiko Knopf

CONTACT

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



1



2 | 10 μm

BLACK GERMANIUM ANTIREFLEXSTRUKTUREN BLACK GERMANIUM ANTIREFLECTION STRUCTURES

Dank seiner geringen Dispersion, guten chemischen Beständigkeit und exzellenten mechanischen Eigenschaften ist Germanium eines der meist verwendeten Materialien für Optiken im infraroten Spektralbereich von 2 μm bis 15 μm Wellenlänge. Aufgrund seines hohen Brechungsindex von etwa 4 leidet es allerdings unter intrinsisch hohen Reflexionsverlusten, was den Einsatz von Antireflexbeschichtungen (AR) unumgänglich für praktische Anwendungen von Germaniumoptiken macht.

Eine kostengünstige Alternative zu AR-Beschichtungen stellen monolithische »Black Germanium« Antireflexstrukturen dar. Anstelle der aufwändigen Beschichtung vieler μm dicker optischer Schichtsysteme, wird hier in einem selbst-organisierten, maskenfreien Plasmaätzprozess eine stochastische Oberflächenstruktur in Germanium erzeugt, die mit einer drastischen Reduktion der Reflektivität einhergeht (Abb. 1 & 2). Auf diesem Wege kann die Reflexion von Germanium über breite Spektral- und Winkelbereiche auf weniger als 1% verringert werden (Abb. 3).

Aufgrund seiner monolithischen Natur leidet Black Germanium nicht unter thermischen Spannungen oder

Thanks to its low dispersion, good chemical stability, and excellent mechanical properties, Germanium is one of the most frequently used materials for optics operating in the infrared spectral range from 2 μm to 15 μm of wavelength. However, as a result of its high refractive index of about 4, it suffers from intrinsically high reflection losses, thus making the employment of antireflection (AR) coatings inevitable for practical applications of Germanium optics.

Monolithic "Black Germanium" antireflection structures represent a cost-effective alternative to AR coatings. Instead of extensively depositing several μm thick optical layer systems, here a stochastic surface structure is produced in Germanium by a self-organized, mask-free plasma etching process accompanied by a drastic reduction of reflectivity (Fig. 1 & 2). With this, the reflection of Germanium can be reduced to less than 1% over wide spectral and angular ranges (Fig. 3).

Due to its monolithic nature, Black Germanium does not suffer from thermal stress or film stress. The rather simple structure fabrication allows for high cost reductions compared to AR layer systems. In addition, the manufac-

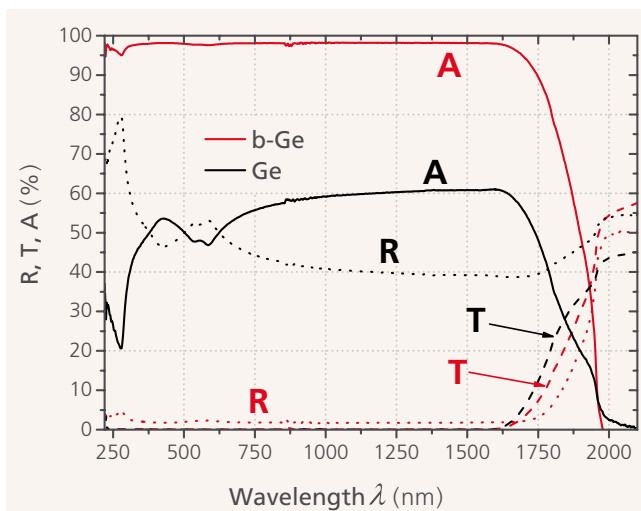
- 1 Foto eines Germanium-Fensters von 30 mm Durchmesser mit und ohne Black-Germanium-Antireflexstruktur. | Photo of a Germanium window of 30 mm diameter with and without Black Germanium antireflection structure.
- 2 Black-Germanium-Antireflexstruktur REM-Aufnahme unter einem Winkel von 30°. | SEM image of a Black Germanium antireflection structure under an angle of 30°.

Schichtspannungen. Die vergleichsweise simple Strukturherstellung erlaubt potenziell hohe Kosteneinsparungen gegenüber AR-Schichtsystemen. Zudem kann die Herstellung strukturiert, also in vorab z. B. lithografisch definierten Gebieten erfolgen.

Mögliche Anwendungsgebiete von Black Germanium umfassen die Verwendung als AR-Struktur sowohl in abbildenden und nichtabbildenden Ge-Optiken, als auch in Ge-basierten Optosensoren. Zudem können die Strukturen zur Unterdrückung optischer Geister in IR-Optiken verwendet werden.

turing is patternable, i.e. in regions that have previously been lithographically defined.

Potential application areas of Black Germanium are as an AR structure both in imaging and non-imaging Ge optics, as well as in Ge-based opto-sensors. Furthermore, the structures can be used for the suppression of optical ghosts in IR optics.



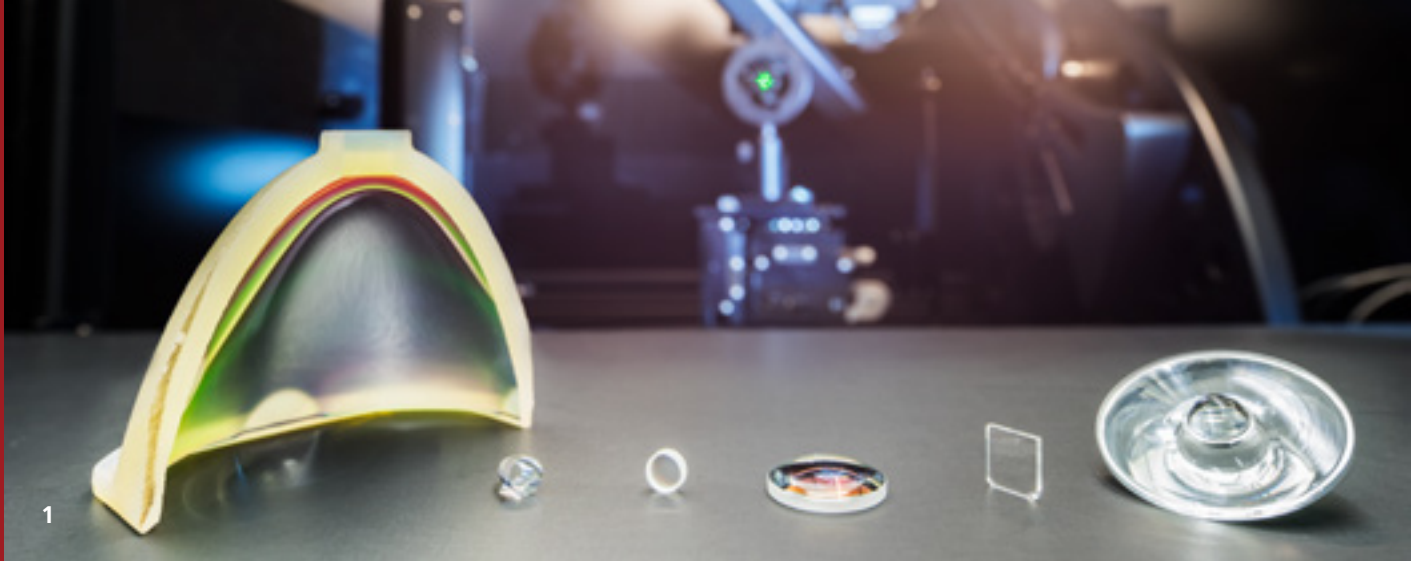
3 *Optische Spektren (Reflexion R, Transmission T und Absorption A) von Black Germanium (b-Ge) im UV-NIR. Zum Vergleich sind auch die entsprechenden Spektren unstrukturierten Germaniums dargestellt (Ge). | Optical spectra (reflection R, transmission T and absorption A) of Black Germanium (b-Ge) in the UV-NIR. For comparison the corresponding spectra of unstructured Germanium is shown, too (Ge).*

AUTHORS

Martin Steglich
Tyler Joseph Schoeppner
Thomas Käsebier

CONTACT

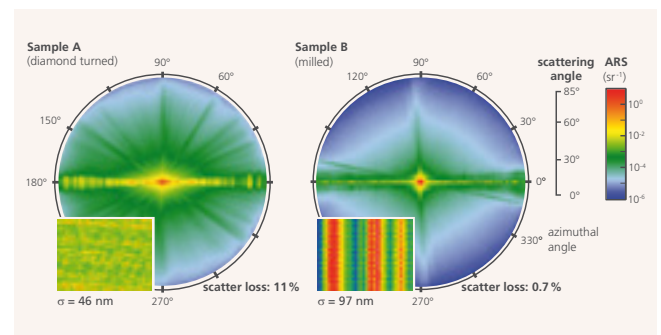
Dr. Martin Steglich
Phone +49 3641 9-47835
martin.steglich@uni-jena.de



PROZESSOPTIMIERUNG IN DER OPTIK-FERTIGUNG DURCH STREULICHTANALYSE LIGHT SCATTERING ANALYSIS FOR THE OPTIMIZATION OF OPTICAL FABRICATION

Die Herstellung von optischen Komponenten mit einer funktionsgerechten Oberflächen- und Materialgüte ist mit zeit-, kosten- und ressourcenintensiven Prozessketten verbunden. Unzureichende Oberflächen- und Materialqualitäten führen zu erhöhten Streuverlusten, einer verschlechterten Abbildungsqualität und zu erhöhten Störlichtproblematiken. Umgekehrt führen zu strenge Spezifikationen zu einem unnötig hohen Prozess- und Fertigungsaufwand. Insbesondere für High-Volume Optiken (z. B. gepresste Kunststoffbeleuchtungsoptiken, Abb. 1) ermöglicht eine gezielte Optimierung der Streulichteigenschaften nur im anwendungskritischen Winkelbereich oft eine Entspannung der Spezifikationen in anderen Bereichen. Dies erlaubt entweder die Herstellungskosten bei gleichbleibender anwendungsbezogener optischer Qualität deutlich zu reduzieren oder die optische Performance schon durch kleine Änderungen im Prozess drastisch zu verbessern. Für ein gezieltes Maßschneidern von Fertigungsprozessen an die applikationsrelevanten Spezifikationen ist hierfür ein detailliertes Verständnis der optischen Charakteristik, insbesondere des Zusammenhangs von Streulicht mit Oberflächen- und Materialeigenschaften unabdingbar /1/. Abbildung 2 zeigt sowohl die winkelaufgelösten Streulichtmessungen in der Transmissionshemisphäre als auch die mittels Weißlichtinterferometer gemessenen Topographien von Beleuchtungsoptiken mit fertigungstypischen PMMA-Oberflächen /2/. Die Oberflächen wurden mittels Diamantdrehen bzw. Fräsen

The fabrication of optical components with a surface and material quality that is adapted to the application requirements results in time consuming and expensive process chains. On the one hand, insufficient qualities of surface and material increase light scattering losses, decrease image quality, and increase stray light problems. On the other hand, specifications that are too tight lead to unnecessary process and fabrication expenses. Especially for high volume optics (Fig. 1), a tailored optimization of the light scattering performance only in the application relevant region of scattering angles often allows relaxed specifications in other regions. This allows either a reduction in production costs while the application relevant quality stays the same, or drastically improving the optical performance with even



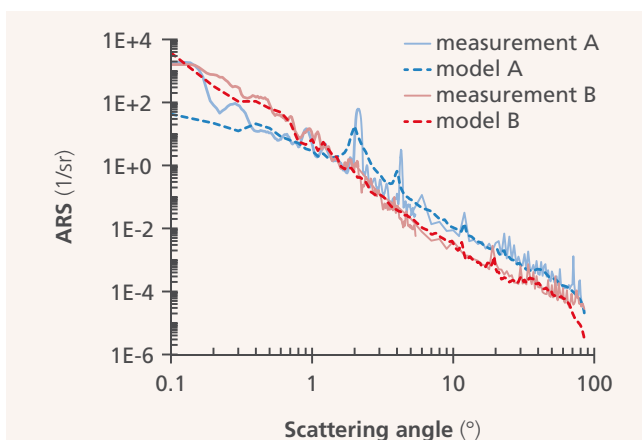
2 *Hemisphärische Streulichtmessungen und Weißlichtinterferometermessungen an PMMA-Oberflächen für Beleuchtungsoptiken. | Hemispherical light scattering measurements and white light interferometer measurements on processed PMMA surfaces for imaging applications.*

1 *Beleuchtungs- und Abbildungsoptiken vor Streulichtmesssystem AlbatrossTT. | Optical components for imaging and illumination applications in front of the scatterometer AlbatrossTT.*

hergestellt und weisen stark anisotrope Rauheitsstrukturen auf. Entgegen der intuitiven Erwartung weist die rauere Oberfläche B im Streuwinkelbereich von 2° und 85° einen wesentlich niedrigeren Totalen Streuverlust ($TS_t = 0,7\%$) als die glattere Oberfläche A ($TS_t = 11\%$) auf. Zur tiefergehenden Analyse der streulichrelevanten Rauheitskomponenten wurde die Streuverteilung beider Proben aus Weißlichtinterferometer- und Rasterkraftmikroskopietopographiedaten modelliert (Abb. 3). Messungen und Simulationen zeigen über den weiten Streuwinkelbereich eine sehr gute Übereinstimmung. Es ist erkennbar, dass die betrachteten Rillenstrukturen von Oberfläche B vor allem bei sehr kleinen Winkeln ($< 1^\circ$) zum Streulicht beitragen. In diesem Beispiel wäre aufgrund des wesentlich niedrigeren Streuverlustes somit Oberfläche B besser für Beleuchtungsanwendungen geeignet. Oberfläche A hingegen weist aufgrund der geringeren Nahwinkelstreuung eine bessere Performance für Abbildungsanwendungen auf.

Literatur / References

- /1/ S. Schröder et al.: Advanced Optical Technologies 4 (2015).
/2/ O. Dross et al.: EOS 2017 München.



3 Modell und Messungen der Streulichtverteilungen beider Oberflächen aus Abbildung 2. | Model and measurements of the light scattering distributions of surfaces in Fig. 2.

small changes in the fabrication process. In order to tailor the fabrication processes to the application relevant specifications, a detailed understanding of the optical characteristic is mandatory, especially regarding the relationship between light scattering and surface and material properties /1/.

Figure 2 displays angle resolved scattering measurements in the transmission hemisphere as well as topographies obtained by white light interferometry on typical PMMA surfaces processed for illumination optics /2/. The surfaces were fabricated by diamond turning and milling and show highly anisotropic roughness structures. Against intuition, the rougher surface B leads to a smaller total scattering loss ($TS_t = 0.7\%$) between scattering angles of 2° and 85° compared to the smoother surface A ($TS_t = 11\%$). For an in-depth analysis of the light scattering relevant roughness components, the light scattering distributions were also modeled based on white light interferometer and atomic force microscopy measurements (Fig. 3). Measurements and simulation show a very good agreement over the large region of scattering angles. It can be observed that the grooves of surface B mainly contribute scattered light at small scattering angles. Based on the lower scattering losses, surface B would consequently show a better performance for illumination application, while surface A would be more qualified for imaging applications as a result of the lower near angle scattering.

AUTHORS

Alexander von Finck
Nadja Felde
Oliver Dross¹
Sven Schröder

¹Philips Lighting, Eindhoven

CONTACT

Dr. Sven Schröder
Phone +49 3641 807-232
sven.schroeder@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



PHOTONISCHE SENSOREN UND MESSSYSTEME / PHOTONIC SENSORS AND MEASURING SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF entwickelt optische und opto-elektronische Mess- und Sensorsysteme. Die Forschungsarbeiten umfassen neuartige Messmethoden, Sensorprinzipien und Auswerteverfahren sowie Systemlösungen. Das Fraunhofer IOF nutzt modernste optische und miniaturisierte bzw. mikrooptische Komponenten sowie Sende- und Empfangseinheiten, Projektionstechniken, Lichtquellen, Softwaretechnologien und Rechnerarchitekturen. Einen Schwerpunkt bilden Lösungen für 3D-Messsysteme für Anwendungen in der Produktion und Medizin, basierend auf Verfahren der Muster- und Streifenprojektion. Einen zweiten Arbeitsschwerpunkt bilden Systeme zur Schicht- und Oberflächencharakterisierung, darunter streulichtbasierte Messsysteme zur Rauheitsbestimmung und Mikro- und Nanostrukturvermessung. Ein Alleinstellungsmerkmal bilden die Entwicklungsarbeiten zu ultrakompakten multikanaligen mikrooptischen Bilderfassungssystemen auf der Grundlage bio-inspirierter Ansätze. Eingesetzt werden solche optischen Sensoren, wie z. B. ultradünne mikrooptische Kameras (facetvision), in mobilen Endgeräten und im Automotive-Bereich.

Viele der genannten Themen wurden 2017 bearbeitet und sind in den nachfolgenden Beiträgen dargestellt, wie zum Beispiel die 3D-Vermessung transparenter Objekte, ein 3D-Sensornetzwerk, Echtzeitscanner für die Roboterinteraktion, eine mikrooptische 3D-Kamera, eine multispektrale Kamera und die Rauheitsanalyse dentaler Implantate.

Fraunhofer IOF develops optical and opto-electronic measuring and sensor systems. The research includes novel measuring methods, sensor principles, and evaluation methods as well as system solutions. Fraunhofer IOF uses state-of-the-art optical and miniaturized or micro-optical components as well as transmitting and receiving units, projection techniques, light sources, software technologies, and computer architectures. One focus is on solutions for 3D measuring systems for applications in production and medicine, based on methods of pattern or fringe projection. A further focus is on systems for layer and surface characterization, including straylight-based measuring systems for roughness determination or micro- and nanostructure measurement. A unique feature is the development of ultra-compact multi-channel micro-optic imaging systems based on bio-inspired approaches. Such optical sensors, for example ultra thin microoptical cameras (facetvision), are used in mobile end devices and in the automotive field.

Many of the topics mentioned were worked on in 2017 and are presented in the following articles, such as the 3D measurement of transparent objects, a 3D sensor network, real-time scanners for robot interaction, micro-optical 3D cameras, multispectral cameras, and the roughness analysis of dental implants.

LEFT *3D-Echtzeitscanner für die Roboterinteraktion.* |
3D real-time scanner for robot interaction.



ECHTZEITSCANNER FÜR DIE ROBOTER-INTERAKTION REAL-TIME SCANNER FOR ROBOT INTERACTION

Während die allgemeine Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen rasant voranschreitet (Sprachsteuerung, Touch-Bedienung), gibt es unerfüllte Anforderungen in Anwendungsfeldern, die auf die genaue Echtzeit-3D-Erfassung von Menschen im Raum angewiesen sind.

Um diesen Anforderungen Rechnung zu tragen, wurde ein echtzeitfähiges 3D-Messsystem geschaffen, welches mit niedriger Latenzzeit und hoher Framerate 3D-Daten von komplexen dynamischen Szenen im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion zur Verfügung stellt. Wegen des Einsatzes im Aufenthaltsbereich von Menschen war Irritationsfreiheit eine wichtige Anforderung.

Zur Demonstration des 3D-Messsystems wurde ein Exponat aufgebaut, in dem ein Industrieroboter auf menschliche Eingaben an einer Interaktionsfläche (Eindrücken einer Gummimembran) reagiert. Das Messsystem erstellt kontinuierlich 3D-Scans der Membran. Die 3D-Daten werden live auf zwei Monitoren angezeigt. Die nachgeschaltete Datenauswertung bestimmt die jeweils tiefste Eindruckstelle auf der Membran und ermittelt so kontinuierlich neue Zielpositionen für den Roboter.

While the development of human-machine interfaces is advancing fast (e.g. speech control, touch interfaces), accurate real-time measurement of human-machine interaction in 3D space is a field where much research is still outstanding.

To meet the requirements of this field, we have developed a real-time 3D measuring system which can provide accurate 3D data of complex human-machine interaction scenes at high frame rates with low latency. One of the key requirements of the system was that it is capable of working irritation free in the vicinity of humans.

To demonstrate the system, we have built an exhibit consisting of the 3D scanner, a robot arm, and an interaction surface (made of rubber). The surface is observed by the 3D scanner and continuously generates new target coordinates for the robot based on the human interaction with the rubber surface. In addition, two LCD displays show the 3D model reconstructed by the scanner to provide additional visual feedback of the scan.

1 *Versuchsaufbau für die Robotersteuerung mit 3D-Messsystem. | Experimental setup for robot control with the 3D measuring system.*

2 *Die Aufgabe des Benutzers besteht darin, alle Bälle mit dem Roboterarm anzustoßen. Die Bewegungsbefehle werden über das 3D-Touchpad eingegeben. | The users task is to hit all balls with the robot arm. The movement instructions are entered via the 3D touchpad.*

Das 3D-Messsystem verwendet eine Stereo-Kamera mit aktivem High-Speed-Projektor mit aperiodischen Sinusmustern /1, 2/. Der Projektor arbeitet mit nicht-sichtbarem Infrarotlicht (850 nm Wellenlänge) und ist deshalb irritationsfrei (= blendfrei). Das System stellt im Echtzeitbetrieb eine 3D-Datenrate von 36 3D-Datensätzen pro Sekunde mit einer Latenz von 80 ms bereit. Jeder 3D-Datensatz besteht aus einer Million 3D-Punkten.

Die Kameras des Scanners werden synchron betrieben und nehmen jeweils 360 Bilder pro Sekunde auf. Die 3D-Rekonstruktionsrechnung erfolgt auf einem Standard-PC vollständig auf der Grafikhardware (GPU-Programm mit OpenCL), so dass für anschließende Auswertungen der 3D-Daten die volle CPU-Leistung zur Verfügung steht. Dies ermöglicht vielfältige Anwendungen mit unterschiedlichsten Datenverarbeitungsanforderungen, wie z. B. kontinuierliche Formüberwachung in Fließband-Systemen, Pick-and-Place-Anwendungen, Gesichtserkennung in Sicherheitsschleusen oder 3D-Gestik-Erkennung.

Literatur / References

- /1/ S. Heist, P. Kühmstedt, A. Tünnermann, G. Notni: Theoretical considerations on aperiodic sinusoidal fringes in comparison to phase-shifted sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement, *Applied Optics* Vol. 54, Issue 35, pp. 10541-10551 (2015). <https://doi.org/10.1364/AO.54.010541>.
- /2/ S. Heist, P. Lutzke, I. Schmidt, P. Dietrich, P. Kühmstedt, A. Tünnermann, G. Notni: High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection *Optics and Lasers, Engineering* 87, 90-96 (2016).

The 3D measuring system consists of calibrated stereo cameras with an active high-speed projector using aperiodic sinusoidal patterns /1, 2/. The projector works with invisible infrared light (850 nm wavelength) and therefore does not irritate humans being scanned (glare-free). In real-time operation, the system provides a 3D data rate of 36 3D data sets per second with a latency of 80 ms. Each 3D dataset consists of one million 3D points.

The scanner's cameras operate synchronously and each of them captures 360 images per second. The 3D reconstruction calculation is carried out on a standard PC completely on the graphics hardware (GPU program with OpenCL) so that full CPU performance is available for subsequent evaluation of the 3D data. This enables a wide range of applications with different data processing requirements, such as continuous shape monitoring in assembly line systems, pick-and-place applications, face detection in security gates, or 3D gesture recognition.

AUTHORS

Patrick Dietrich
Kevin Srokos
Ingo Gebhart
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

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



HOCHLEISTUNGS-3D-SENSORNETZWERK ZUR ECHTZEITREKONSTRUKTION HIGH PERFORMANCE 3D SENSOR NETWORK FOR REAL-TIME RECONSTRUCTION

Die hochgenaue und schnelle dreidimensionale Vermessung von Personen und großen Messobjekten stellt immer noch eine Herausforderung dar. Dies liegt unter anderem an den riesigen, schnell zu verarbeitenden Datenmengen und den unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften verschiedener Messobjekte. Weiterhin müssen bei der Personenerfassung z. B. auch Bewegungen detektiert und ggf. kompensiert werden. Die strukturierte Beleuchtung darf die zu vermessende Person nicht irritieren. Zur Vermessung sich bewegendere Personen aber auch komplexer Messobjekte bis zu einer Größe von aktuell ca. 2 m x 1 m x 0,5 m wurde am Fraunhofer IOF ein Hochleistungs-3D-Sensornetzwerk mit niedriger Latenz zur vollständigen Echtzeitrekonstruktion der Oberfläche entwickelt. Dieses 3D-Sensornetzwerk besteht aus mehreren unabhängigen 3D-Sensoren mit Musterprojektion, die im Nah-Infrarot-Bereich (NIR) auf der Auswertung von Musterbildfolgen beruhen. Anwendungsgebiete sind unter anderem die Bekleidungsindustrie, der Fitness- / Sportmarkt und die Medizin, aber auch Anwendungen in der industriellen Produktion. Die herausragende Eigenschaft des Sensornetzwerks ist die kurze Latenzzeit von unter 200 ms, die zwischen Bildaufnahme und Vorliegen des hochauflösenden 3D-Datensatzes vergeht. Damit kann das Sensornetzwerk für Echtzeitanwendungen eingesetzt werden. Es besteht aus einer Anzahl zunächst unabhängiger aktiver 3D-Sensoren, die jeweils aus einem Projektor und zwei Kameras bestehen. Die Projektionseinheit wurde nach dem Prinzip der GOBO-Projektion realisiert, wobei eine rotierende

Fast, high precision 3D measurement of people and large objects by structured light based methods remains a challenge. Reasons for this are, for example, large datasets which should be processed quickly and different reflection properties of the objects' surfaces. Furthermore, for the acquisition of people, their motions should be compensated and the structured illumination must not disturb the person. A high-precision 3D sensor network with short latency time for 3D measurements of people and other complex objects up to a size of 2 m x 1 m x 0.5 m has been developed at Fraunhofer IOF. This network consists of several independent 3D sensors operating with structured light projection in the near-infrared (NIR) range.

Application fields of such sensor systems are the apparel industry, fitness and sports, medicine, and industrial production. The main feature of the sensor network is the short latency time of less than 200 ms from image recording to the calculated 3D point cloud. This makes the system real-time capable.

The network consists of several independent 3D sensors, each composed of a projector and two NIR cameras. The projection unit was realized according to the GOBO (graphical optical blackout) principle using aperiodic fringe patterns. The cameras have a 2 MPix resolution and can record up to 110 frames per second. The system operates

Scheibe mit aperiodischen Streifenmustern durchleuchtet und das Muster auf das Messobjekt projiziert wird. Mit den Kameras werden hochaufgelöste Bilder (2 MPix) mit einer Frequenz von 110 Hz aufgenommen. Die Empfindlichkeit der Kameras besteht in einem Wellenlängenbereich bis 850 nm. Durch Verwendung entsprechender Filter kann der gesamte visuelle Bereich gesperrt werden. Die einzelnen Sensoren werden zunächst separat kalibriert und liefern jeder für sich einen 3D-Datensatz der Oberfläche des Messobjektes, die im Sichtfeld beider Kameras liegt. Durch die gleichzeitige 3D-Erfassung vieler unterschiedlich positionierter Sensoren, kann eine nahezu vollständige Oberflächenerfassung in sehr kurzer Messzeit realisiert werden. Dazu werden die Positionen und Blickrichtungen der einzelnen Sensoren zueinander in einem gemeinsamen Koordinatensystem bestimmt. Dies wird einmalig und mit hoher Genauigkeit unabhängig von den Messvorgängen bestimmt. Abbildung 2A zeigt beispielhaft eine schematische Anordnung der Sensoren. Somit ist das Sensornetzwerk z. B. für die Rundumvermessung sich langsam bewegender Personen geeignet, z. B. Mensch-Maschine-Interaktion. Die Abbildung 2B zeigt die dreidimensional erfasste Oberfläche einer Schaufensterpuppe.

at 850 nm wavelength. Using appropriate filters, the visible light can be blocked. Each sensor is calibrated separately. Afterwards the positions and viewing directions of all sensors are calibrated in a common world coordinate system with high accuracy.

Each sensor generates a 3D point cloud of object points in its viewing area. Due to the simultaneous 3D measurement by all sensors, a whole body measurement can be realized in a very short time.

Figure 2A shows an example of the sensor arrangement. The network is suitable e.g. for whole body measurements of slow moving people for adapted machine control. Figure 2B shows the 3D representation of a measured mannequin.



AUTHORS

Christoph Munkelt
Daniel Höhne
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

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



OPTISCHE 3D-VERMESSUNG VON GLAS UND TRANSPARENTEN KUNSTSTOFFEN OPTICAL 3D MEASUREMENT OF GLASS AND TRANSPARENT PLASTICS

Wenn es um die berührungslose, schnelle und hochgenaue 3D-Erfassung von Objekten geht, haben sich die am Fraunhofer IOF entwickelten optischen Stereo-Vision-Systeme, basierend auf aktiver Musterprojektion, für eine Vielzahl von Anwendungen in der Industrie und Forschung bewährt. Neue 3D-Systeme mit Arbeitswellenlängen im nahen Infrarot-Bereich ermöglichen irritationsfreie 3D-Aufnahmen des Menschen, z. B. für Anwendungen im Rahmen der Mensch-Maschine-Interaktion /1/.

Sämtliche dieser 3D-Systeme basieren auf der Projektion von optischen Mustern auf die zu erfassenden Objektoberflächen, was im visuellen oder nahinfraroten Spektralbereich für eine Vielzahl von Materialien erfolgreich durchgeführt werden kann. 3D-Bildausfälle entstehen jedoch immer dann, wenn die optischen Eigenschaften bestimmter Materialien, wie z. B. Glas oder transparente Kunststoffe, keine diffuse Reflexion der Projektionsmuster erlauben.

Am Fraunhofer IOF wurde nun ein neues Verfahren entwickelt, mit welchem die 3D-Vermessung dieser spiegelnden oder transparenten Materialien gelingt. Hierzu werden thermische Muster (im Spektralbereich bei 10 μm) auf die Objektoberflächen projiziert und mittels Wärmebildkameras analysiert /2/. Die Wärmemuster werden hierbei mittels eines CO_2 -Lasers und angepasster aperiodischer Sinusmuster /3/

When it comes to non-contact, fast, and highly precise 3D measurements of objects, optical stereo-vision systems developed by the Fraunhofer IOF have proven their efficacy for certain applications in industry and research. Based on active pattern projection, new 3D systems with wavelengths in the near infrared offer accurate, irritation-free 3D measurements of humans, e.g. for applications in the field of human-machine interaction /1/.

The basic principle of these 3D systems is the active projection of optical patterns onto the objects' surfaces, which works successfully in the visible or near-infrared wavelength range for a multitude of materials. Yet 3D image errors always arise if the optical properties of certain materials such as glass or transparent plastics interfere with the process of diffuse reflection.

Fraunhofer IOF has developed a new method which makes the 3D measurement of these reflective or transparent materials possible. For this purpose, thermal patterns (in the infrared about 10 μm) are absorbed from the object's surface and their re-emission is analyzed with thermographic cameras /2/. The patterns are generated based on a CO_2 laser and an adapted GOBO principle which is described in /3/. Glass and transparent plastics become absorbent by changing the spectral range to the thermal infrared.

1 *Laboraufbau zur optischen 3D-Vermessung transparenter Kunststoffe und Gläser. |*

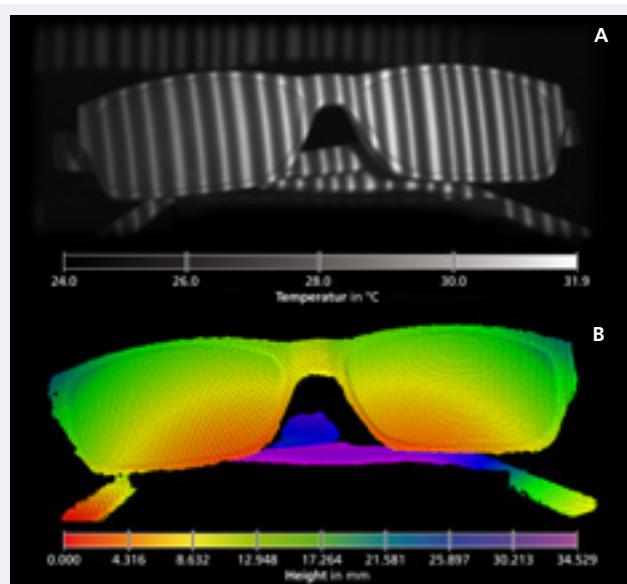
Laboratory setup of an optical 3D-sensor for measuring transparent plastics and glasses.

generiert. Durch den Wechsel des Spektralbereichs hin zum Wärmewellenlängenbereich werden Gläser und Kunststoffe absorbierend. Abbildung 2A zeigt die Wärmebildkamera-Aufnahme einer Kunststoffbrille mit Wärmemuster. Der Temperaturkontrast von ca. 1-2 °C zwischen Muster und Objekt reicht aus, um das Wärmebild verwerten zu können. Für die Rekonstruktion einer vollständigen Oberfläche werden die Bildstapel zweier Wärmebildkameras und verschiedener Musterprojektionen korreliert und eine 3D-Punktwolke berechnet (Abb. 2B).

Figure 2A shows a thermal image of glasses made from plastics with a typical thermal pattern on the object surface. A thermal contrast of about 1 to 2 Kelvin between pattern and surface is sufficient for the further image processing. Figure 2B shows a complete 3D point cloud of the glasses which was reconstructed by correlating the image stacks of two thermal imaging cameras after various pattern projections.

References / Literatur

- /1/ A. Brahm et al.: Fast 3D NIR systems for facial measurement and lip-reading, Proc. SPIE Vol. 10220 (2017).
- /2/ A. Brahm et al.: 3D shape measurement with thermal pattern projection, Adv. Opt. Techn. Vol. 5(5-6) (2017).
- /3/ S. Heist et al.: High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection, Opt. Laser Eng. Vol. 87 (2016).



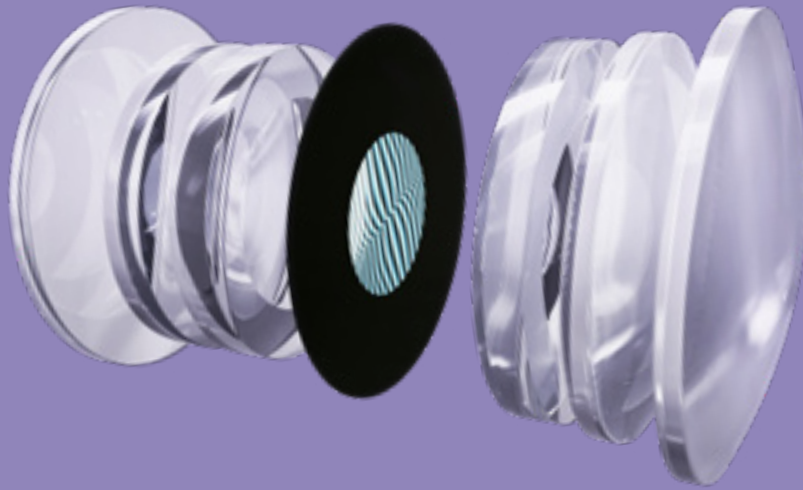
2 Wärmebildkamera-Aufnahme einer Kunststoffbrille mit eingepprägtem Wärmemuster (A). Rekonstruierte 3D-Punktwolke mit farbcodierter Tiefeninformation (B). | Thermal image of plastic glasses with a thermal pattern on the surface (A). Reconstructed 3D point cloud with color-coded depth information (B).

AUTHORS

Anika Brahm
Simon Schindwolf
Stefan Heist
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

Dr. Anika Brahm
Phone +49 3641 807-237
anika.brahm@iof.fraunhofer.de



1

MONOKULARE 3D-KAMERAS MONOCULAR 3D-CAMERAS

Neben der klassischen, zweidimensionalen Bildaufnahme steht insbesondere die erweiterte Akquisition von Tiefeninformationen im Fokus aktueller Kamera- und Sensorik-anwendungen. Entsprechende Applikationsszenarien erstrecken sich von der Mensch-Maschine-Interaktion über die Qualitätskontrolle in Fertigungsprozessen bis hin zum Bereich »Virtual/Augmented Reality«. Steigende Anforderungen im Hinblick auf 3D-Auflösung, Kompaktheit und Kosten verlangen dabei nach innovativen Lösungen, da bestehende Konzepte an ihre technologischen Grenzen gebracht werden. Ausgehend von diesen Ansprüchen wurde ein neuartiges Kamerasystem zur passiven, optischen 3D-Objekterfassung entwickelt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Stereo- und Multiapertur-Anordnungen wird nur eine (monokulare) Kamera benötigt. Dadurch können kompaktere und kosteneffizientere Lösungen realisiert werden, die hinsichtlich lateraler und axialer Auflösung bestehenden monokularen und plenoptischen Konzepten überlegen sind.

Das Aufnahmeprinzip basiert auf der direkten Implementierung eines diffraktiven, mikrooptischen Elements in den Strahlengang eines konventionellen Kameraobjektives (Abb. 1). Das strukturierte Oberflächenprofil des 1 mm dünnen Glaselements modelliert die optische Phase, wodurch eine gezielte Beeinflussung der Abbildungseigenschaften der Kamera erreicht wird. Die 3D-Informationen eines aufgenommenen Objektfeldes werden so direkt in der Rohbildverteilung optisch kodiert. Eine angepasste, elektronische Bildnachverarbeitung kann anschließend einerseits das Tiefenprofil des Objektes und andererseits die hochaufgelöste,

In addition to the classical, two-dimensional imaging, the extended acquisition of depth information is a particular focus of current camera and sensor applications. The respective application scenarios range from human-machine interaction through to quality control in manufacturing processes to the area of "virtual / augmented reality". More stringent requirements with regard to 3D resolution, compactness, and costs call for innovative solutions as existing concepts are pushed to their technological limits. A novel camera system for passive, optical 3D object detection has been developed based on these demands. In contrast to conventional stereo and multi-aperture arrangements, only one (monocular) camera is required. As a result, more compact and cost-effective solutions can be realized, which provide superior lateral and axial resolution compared to existing monocular and plenoptic concepts.

The imaging principle is based on the direct implementation of a diffractive, micro-optical element in the beam path of a conventional camera lens (Fig. 1). The structured surface profile of the 1 mm thin glass element modulates the optical phase, which alters the imaging properties of the camera. As a result, the 3D information of a recorded object field is optically encoded directly in the raw image distribution. An adapted, electronic image post-processing can then reconstruct the depth profile of the object in addition to a high-resolution, lateral object distribution. Based on this system concept, demonstration systems for machine vision applications were implemented for the first time. The implemented micro-optical element was

1 Schematischer Objektivaufbau mit integriertem Phasenelement in Blendenebene. |

Schematic layout of camera objective with integrated phase element.

laterale Objektverteilung rekonstruieren. Basierend auf diesem Systemkonzept wurden erstmalig Demonstrationsysteme für Anwendungen im Bereich des Machine Vision umgesetzt. Das mikrooptische Element wurde dabei kosteneffizient durch UV-Replikation im Wafer-Maßstab hergestellt und kann flexibel in ein Kameraobjektiv integriert werden. Bei einem Arbeitsabstand von 1 m konnte so eine laterale Auflösung von $60\ \mu\text{m}$ sowie eine Tiefenauflösung von bis zu 0,6 mm erzielt werden. Die Berechnung des 3D-Profiles aus der 5 Megapixel Rohbildverteilung (Abb. 2) erfolgt dabei mit einer Geschwindigkeit von bis zu 7 Bildern pro Sekunde.

Diese Entwicklung wurde durch das BMBF im Rahmen des Programms Photonik Forschung Deutschland (FKZ: 13N13667) gefördert.

cost-effectively produced by UV replication on a wafer scale and can be flexibly integrated into a camera objective. At a working distance of 1 m, a lateral resolution of $60\ \mu\text{m}$ and a depth resolution of up to 0.6 mm could be achieved. The calculation of the 3D profile from the 5 megapixel raw image distribution (Fig. 2) is performed at a speed of up to 7 frames per second.

This development was supported by the BMBF within the framework of the program Photonics Research Germany (FKZ: 13N13667).



2 *Aufgenommene Rohbild (links) und rekonstruiertes Tiefenprofil (rechts). |
Recorded raw image (left) and reconstructed depth profile (right).*

AUTHORS

René Berlich
Marko Stumpf
Peter Dannberg
Andreas Brückner

CONTACT

René Berlich
Tel.: +49 3641 807-381
rene.berlich@iof.fraunhofer.de



1

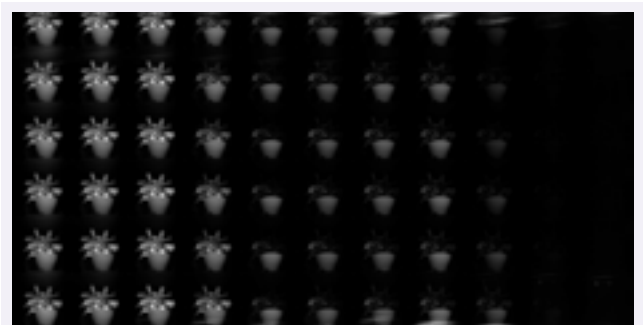
KOMPAKTE MULTISPEKTRALE ARRAY-KAMERA COMPACT MULTISPECTRAL ARRAY-CAMERA

Die besondere Anforderung an multispektrale Kamerasysteme besteht in der gleichzeitigen Aufnahme von hochaufgelösten spektralen und räumlichen Informationen. Klassische Lösungen basieren hierbei häufig auf scannenden Verfahren bei denen entweder eine räumliche Dimension oder das Spektrum zeitsequentiell aufgenommen wird. Aktuell ist jedoch ein vermehrter Trend hin zu echtzeitfähigen Systemen zu beobachten. Ein weiterer Trend betrifft die fortschreitende Miniaturisierung von solchen Systemen insbesondere für den Drohnen-gestützten Einsatz im Bereich des Precision-Farmings.

Der im Projekt »MIRO« verfolgte Ansatz vereint dabei beide genannten Entwicklungsziele. Dafür werden mittels einer Multiaperturkamera 66 Bilder bei jeweils unterschiedlichen Wellenlängen gleichzeitig aufgenommen. Die Parallelisierung der Abbildung wird dabei durch ein Mikrolinsenarray als Abbildungsoptik realisiert. Zusätzlich erlaubt dieser Ansatz eine sehr flache Bauform der Optik von nur ca. 7 mm. Für die spektrale Selektion kommt ein linear variierender Bandpassfilter zum Einsatz. Mittels geeigneter auf dem Mikrolinsenarray aufgebrachter Blendenstrukturen wird eine diskrete Selektion der transmittierten Wellenlängen pro Bildkanal ermöglicht. Um ein Übersprechen der verschiedenen Abbildungskanäle zu vermeiden, wurde die multispektrale Kamera mit einem

The particular challenge of multispectral cameras is the simultaneous detection of spectral and spatial information with high resolution. Scanning systems which measure either one spatial dimension or the spectral information in a time sequential mode are typically used. To overcome the associated problems, new developments have to operate in real-time or so called snap-shot mode. A second trend goes towards miniaturization, e.g. for applications such as precision farming based on UAVs (unmanned aerial vehicle) for plant monitoring.

In the project "MIRO", an innovative multispectral camera system was realized that combines both goals by using a multi-aperture approach with 66 simultaneously working imaging channels each seeing its individual wavelength. The concept is



2 *Simultane Aufnahme von 66 parallelen Abbildungskanälen mit unterschiedlichen Transmissionswellenlängen. | Simultaneous recording of 66 parallel imaging channels with different transmission wavelengths.*

1 *Prototyp der kompakten Multispektralkamera. | Prototype of the compact multispectral camera.*

zusätzlichen Crosstalk-Modul ausgestattet. Insgesamt lässt sich mit dem erarbeiteten Kamerakzept ein Spektralbereich von 450 - 850 nm bei einer Abtastung von ca. 6,0 nm adressieren und bietet gleichzeitig eine räumliche Auflösung von 400 x 400 Pixeln pro Kanal.

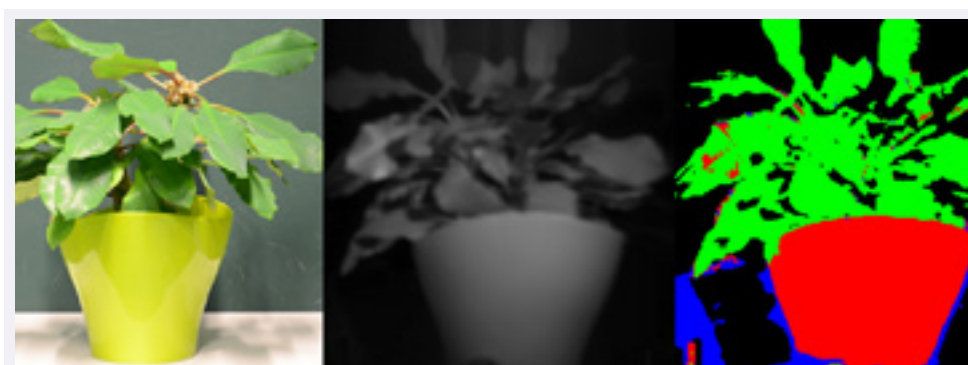
Die Auswertung der multispektralen Aufnahmen erfolgt mittels einer selbst entwickelten Software und ermöglicht zum einen das Zusammenfügen der Einzelbilder und zum anderen die Ausgabe der Spektren je Bildpunkt. Dabei wird neben einfachen Bildfehlern vor allem die spektrale Winkelabhängigkeit des Bandpassfilters korrigiert. Des Weiteren lassen sich ausgewählte spektrale Kanäle zu Indizes wie dem NDVI (normalized difference vegetation index) verrechnen und als Falschfarbendarstellung anzeigen.

Das dargestellte Vorhaben wird gefördert mit Mitteln der Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen des Projektes »MIRO«.

based on a special microlens-array, which results in a very thin imaging optic of approximately 7 mm. For spectral selection, a linear variable bandpass filter is used. The definition of discrete spectral transmission bands for each channel is possible by aperture structures placed between the filter and the microlens-array. An additional crosstalk module is integrated to ensure the channel-separation on the image sensor. In conclusion, this system enables the recording of multispectral images ranging from 450 nm to 850 nm with a sampling of about 6.0 nm and a spatial resolution of 400 x 400 pixels.

The evaluation of the multispectral images is carried out by software developed in-house. Key features are the merging of sub-images and the extraction of local spectral information. Small imaging errors, as well as the angle dependency of the used bandpass filter, are corrected. Furthermore, selected spectral channels can be combined for the calculation of classification indices such as the NDVI (normalized differences vegetation index) and shown as a pseudocolor image.

The presented project is funded by the Fraunhofer Society within the framework of the research project "MIRO".



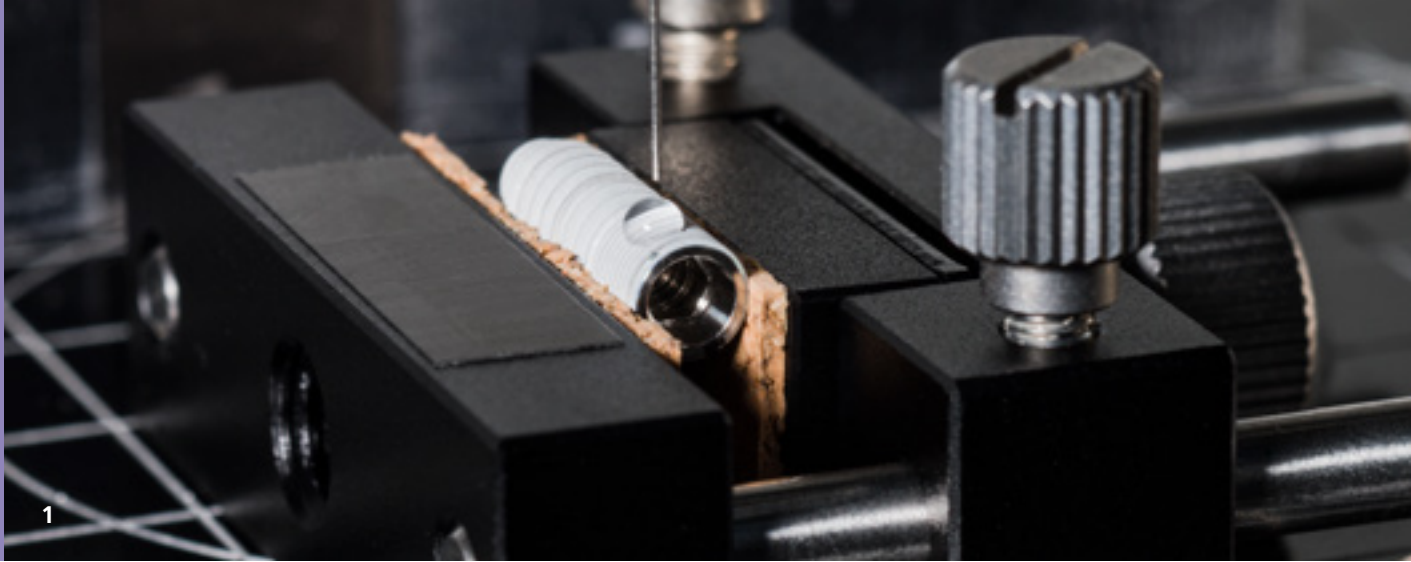
3 Testszene und zusammengefügtes Multispektralbild sowie Falschfarbendarstellung des Bildinhaltes mittels NDVI . | Test scene and merged multi-spectral-image together with a pseudocolor image evaluating the NDVI.

AUTHORS

Robert Brüning
René Berlich
Christin Gassner
Martin Hubold
Robert Brunner

CONTACT

Dr. Robert Brüning
Phone +49 3641 807-360
robert.bruening@iof.fraunhofer.de



KOMBINATIVE RAUHEITS- UND FUNKTIONS- ANALYSE DENTALER IMPLANTATE COMBINED ROUGHNESS AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF DENTAL IMPLANTS

Die Entwicklung von »smarten« Biomaterialien sowie die Funktionalisierung von Oberflächen für die Medizintechnik stellen bereits seit vielen Jahren Schlüsselthemen, nicht nur in der Medizin, sondern auch in diversen Naturwissenschaften, wie Biologie, Chemie, Physik und Materialwissenschaften, dar. Eine effiziente und zielgerichtete Herstellung solcher Biomaterialoberflächen mit an die finale biomedizinische Applikation adaptierten Funktionen sowie optimaler Biokompatibilität erfordert ein umfassendes Verständnis der einzelnen spezifischen Eigenschaften (Topografie, Rauheit, Benetzung, Festigkeit) und deren Zusammenhänge. Dies hat zur Folge, dass auch die Ansprüche an die Charakterisierungsverfahren stetig steigen. Das Fraunhofer IOF entwickelt kontinuierlich die Methoden der Rauheits- und Funktionsanalysen weiter, um die Struktur-Eigenschaftsbeziehungen verschiedener Oberflächen- und Schichtsysteme umfassend aufzuklären und entsprechend der jeweiligen spezifischen Anwendung zu optimieren bzw. neu zu erarbeiten. Gegenwärtig werden erste Versuche unternommen unsere Mess- und Analyseverfahren zur Modellierung, Definition und Kontrolle von Rauheitsstrukturen für optimale hydro/oleo-phobe/-phile Benetzungseigenschaften auf biomedizinische Oberflächen zu übertragen.

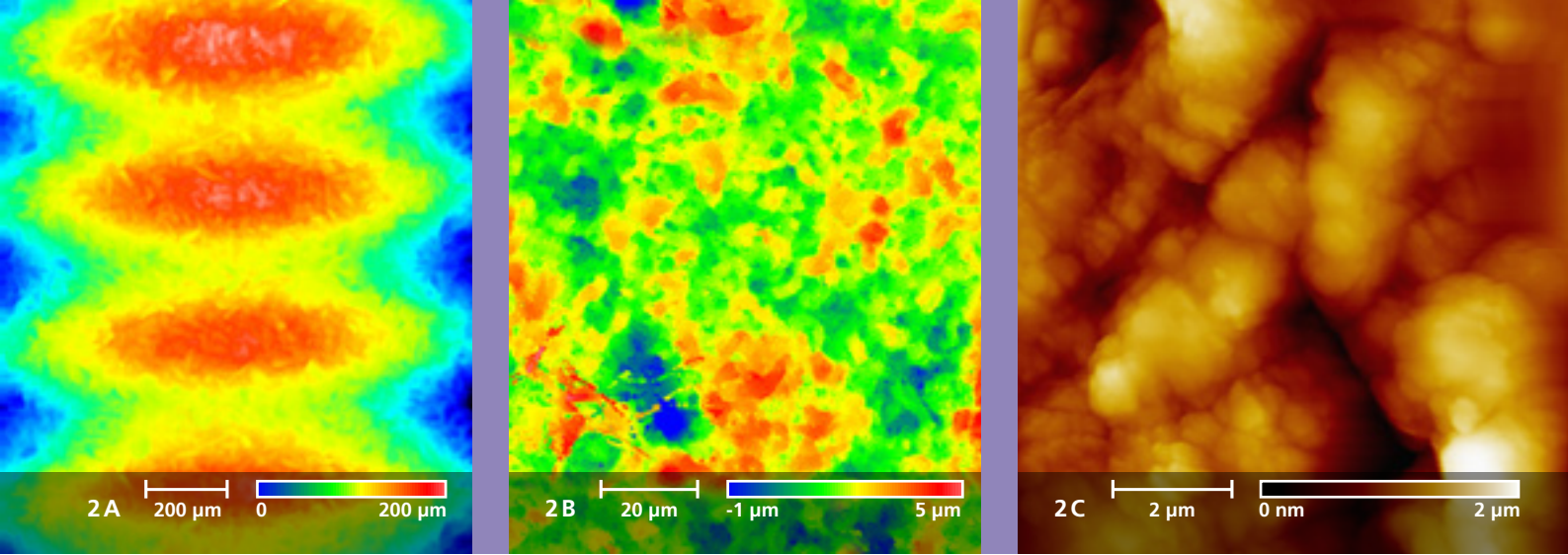
Basis einer belastbaren Strukturanalyse stellt dabei die Leistungsspektraldichtefunktion (PSD) dar, die sowohl die

The development of "smart" biomaterials and the functionalization of surfaces for medical applications have been key issues for many years not only in medical field, but also in various natural sciences such as biology, chemistry, physics, and materials science. An effective fabrication of biomaterials with specific functionalities and optimal biocompatibility demands a thorough understanding of their individual properties (e.g. topography, roughness, wettability, mechanical strength) and relationships. This results in increased requirements for appropriate characterization methods and analysis techniques. Fraunhofer IOF continuously refines its roughness and functional analysis methods to achieve a comprehensive enlightenment of the structural and functional properties of different surface and thin film coatings. This comprises an optimization of existing, or a development of novel, methods with respect to the specific application. The first approaches have been made to extend our measurement and analysis methods for effective prediction, defining, and controlling of roughness structures for optimal hydro/oleo-phobic/-philic wetting properties to biomedical surfaces.

The Power Spectral Density (PSD) function yields data on the vertical as well as lateral distributions of the roughness components and, hence, constitutes the basis for an advanced

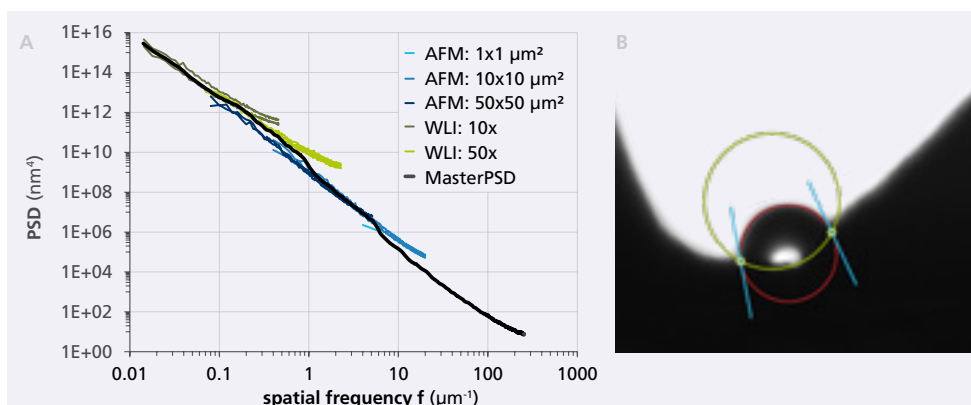
1 *Benetzungsanalyse eines dentalen Implantats. | Wetting analysis of dental implant.*

2 *Topografie Implantat: Laser-Scanning-Mikroskopie (A), Weißlichtinterferometrie (B), Rasterkraftmikroskopie (C). | Topography implant: Laser-Scanning-Microscopy (A), White-Light-Interferometry (B), Atomic-Force-Microscopy (C).*



vertikale als auch die laterale Verteilung der Rauheitskomponenten einer strukturierten Oberfläche erfasst. Durch die Kombination der PSDs resultierend aus einzelnen Messungen (unterschiedliche Messfelder und Messtechnik) kann bspw. die Rauheitscharakteristik einer dentalen Implantatoberfläche (Abb. 1) über mehrere Größenordnungen beschrieben werden. In den Abbildungen 2A-C sind die Topografiedaten resultierend aus Laser-Scanning-Mikroskopie (LSM), Weißlichtinterferometrie (WLI) und Rasterkraftmikroskopie (AFM) dargestellt. Die daraus berechneten einzelnen PSD-Funktionen wurden, wie in Abbildung 3A gezeigt, zu einer MasterPSD kombiniert. Analog verhält es sich bei der Benetzungsanalyse: Eine rein qualitative Darstellung oder eine Beschreibung mittels eines einzigen Kontaktwinkels ist nur für eine erste Bewertung geeignet. Belastbare Aussagen erfordern hingegen Charakterisierungsmethoden, die auf die jeweilige Applikation optimal angepasst sind. Dazu stehen am Fraunhofer IOF eine Vielzahl von Systemen und Methoden zur Verfügung, wie z. B. die Nanoliterdosiereinheit (DataPhysics), mit der zusätzlich zur makroskopischen Kontaktwinkelanalyse die Benetzung direkt in den Vertiefungen (Abb. 3B) oder aber an den Flanken von dentalen Implantatgewinden untersucht werden kann.

structural analysis. The combination of PSDs obtained from different scan areas and different measurement techniques enables a robust roughness analysis over a wide spatial frequency range of dental implants (Fig. 1), for instance. Figures 2A-C show the topography of Laser-Scanning-Microscope (LSM), White-Light-Interferometer (WLI), and Atomic-Force-Microscope (AFM) measurements. The calculated single PSD functions and combined MasterPSD are depicted in Figure 3A. The same applies to the wetting behavior: A pure qualitative description or utilization of only one contact angle is only sufficient for a first assessment; however, a suitable evaluation and comparison of the specific wetting properties requires characterization methods that are well defined and focus on the particular application. For this purpose, a huge number of techniques as well as methods are available at Fraunhofer IOF. For example, the nanoliter dosing system (DataPhysics) enables an investigation of the wetting behavior at the bottom (Fig. 3B) or at the edge of the dental implant thread instead of the entire implant surface.



3 PSD-Funktionen der Gewindeoberfläche (A). Wassertropfen im Gewinde (B) des dentalen Implantats. | PSD function of the thread surface of the dental implant (A). Water drop placed in the thread (B) of the dental implant.

AUTHORS

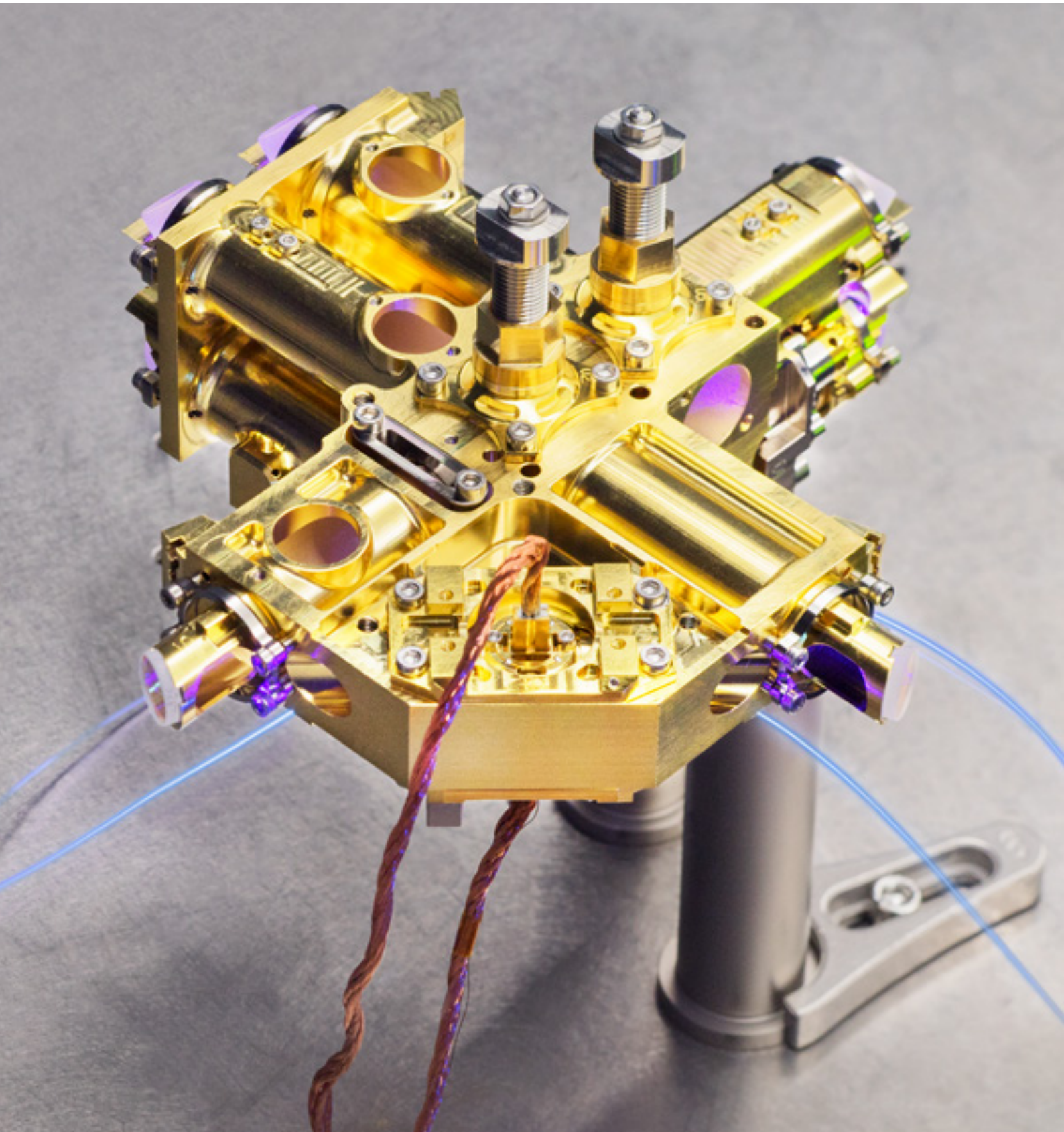
Luisa Coriand
Nadja Felde
Torsten Knieps¹
Sven Schröder

¹medentis medical GmbH

CONTACT

Dr. Luisa Coriand
Phone +49 3641 807-247
luisa.coriant@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



LASERTECHNIK

LASER TECHNOLOGY

Das Fraunhofer IOF beherrscht die Entwicklung neuester Festkörperlasersysteme. Schwerpunkt ist die Entwicklung von beugungsbegrenzten Faserlasersystemen mit Ausgangsleistungen im multi-Kilowatt-Bereich (cw/pulse). Im Fasertechnologiezentrum am Fraunhofer IOF sind hierzu die Kompetenzen von der Preformherstellung über das Faserziehen von aktiven und passiven Spezialfasern, die notwendige Aufbau- und Verbindungstechnik bis hin zur Systemintegration und -realisierung gebündelt.

Die Erschließung neuer Wellenlängenbereiche unter Anwendung von Methoden der nichtlinearen Optik, die Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse bis zu Attosekunden-Pulsdauern sowie die Führung und Formung von Laserstrahlung höchster Leistung und Intensität sind weitere Themen. Zudem werden Prozesse und Prozesstechnologien der Laser-Mikro-Materialbearbeitung erforscht und entwickelt.

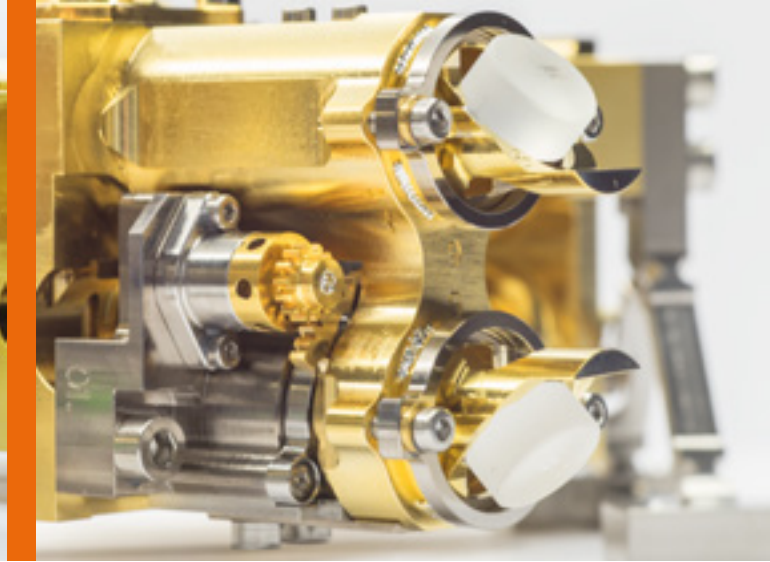
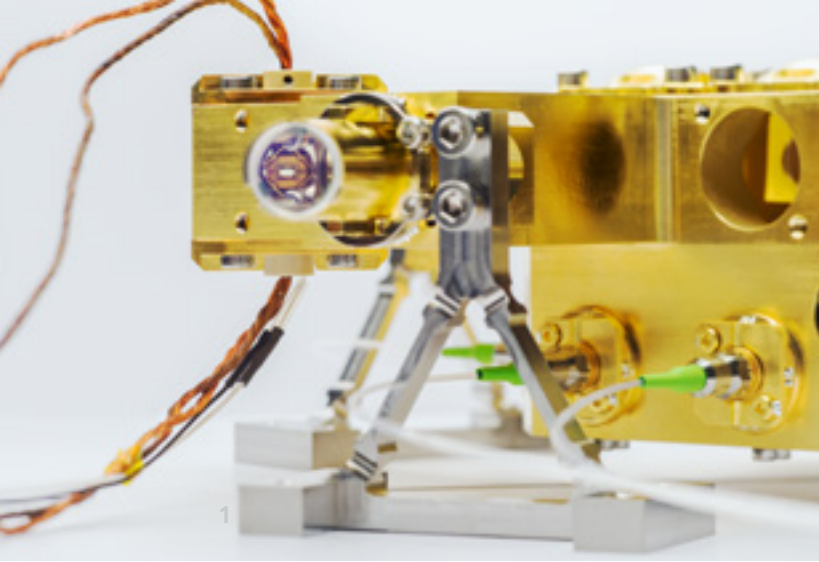
Das Fraunhofer IOF gehört in diesen Themenfeldern zu den forschungsstärksten Instituten mit globaler Sichtbarkeit und zahlreichen technologischen Alleinstellungsmerkmalen. In dem Geschäftsfeld Lasertechnik konnten in 2017 unter anderem die folgenden Themen erfolgreich bearbeitet werden: verschränkte Photonenquellen, thermische Stabilität in Faserverstärkern und additive Fertigung mittels ultrakurzer Laserimpulse.

Fraunhofer IOF masters the development of the latest solid-state laser. The focus is on the development of diffraction-limited fiber laser systems with output powers in the multi-kilowatt range (cw / pulse). In the fiber technology center at the Fraunhofer IOF, competences from preform production through to fiber drawing of active and passive special fibers, necessary assembly and joining technologies to system integration and system realization are combined.

The development of new wavelength ranges using methods of nonlinear optics, the generation of ultrashort light pulses up to attosecond pulse durations as well as the guidance and shaping of laser radiation at the highest power and intensity are further topics. In addition, processes and process technologies of laser micro material processing are researched and developed.

In these fields, the Fraunhofer IOF is one of the most research-intensive institutes with global visibility and numerous technological unique selling points. Amongst other things, the following topics were successfully addressed in the Laser Technology business field in 2017: entangled photon sources, thermal stability in fiber amplifiers, and additive manufacturing using ultra-short laser pulses.

LEFT *Quelle für verschränkte Photonen.* |
Entangled Photon Source.



VERSCHRÄNKTE PHOTONENQUELLE FÜR DIE QUANTENKOMMUNIKATION ENTANGLED PHOTON SOURCE FOR QUANTUM COMMUNICATION

Die Quantum Key Distribution (QKD) beinhaltet das Verteilen von Schlüsseln zum Chiffrieren und Deciffrieren von Daten an Sender und Empfänger auf der Basis von Photonen, die die entsprechende Schlüsselinformation codieren. Dabei ist der Schlüssel durch die quantenmechanische Verschränkung der an Sender und Empfänger gerichteten Photonen physikalisch abhörsicher, weshalb die QKD als Zukunft der verschlüsselten Kommunikation angesehen wird.

Durch die gegenwärtig nur in Freistrahlanordnungen gewährleistete, lange Kohärenzlänge von verschränkten Photonen sind im Moment nur satellitengestützte optische Links zum Verteilen der Schlüsselinformationen über große Entfernungen geeignet. Am Fraunhofer IOF wurde dafür im Rahmen eines von der European Space Agency geförderten Projektes der Prototyp einer effizienten und raumfahrttauglichen verschränkten Photonenquelle entwickelt. Die Quelle basiert auf einem hybriden Aufbau, in dem ein nichtlinearer, periodisch gepolter Kristall (ppKTP) von zwei Seiten in der Anordnung eines Sagnac-Interferometers mit einer Leistung von max. 8 mW bei 405 nm gepumpt wird. Die dadurch angeregte Spontaneous Down Conversion (SPDC) im Kristall erzeugt polarisationsverschränkte Photonen im Sender- und Empfänger-Kanal mit einer Rate von bis zu 300.000 Paaren pro Sekunde bei einer Sichtbarkeit dieser Photonenpaare (Visibility) im Bereich 96 - 99 %. Bei höheren Pumpleistungen kann mit Paarraten

Quantum Key Distribution (QKD) is the distribution of keys to sender and receiver for encrypting and decrypting data. The key information is carried by photons that are quantum mechanically entangled. This means that a pair of entangled photons, where one photon is going to the sender and the other to the receiver, cannot be eavesdropped by a third party without destroying the entanglement state, which can be observed by sender and receiver. QKD is thus believed to be the future of encrypted communication; it provides keys that are safe from being hacked by means of the laws of physics.

Due to the required long coherence length of entangled photons that can only currently be realized by free-space optics, satellite optical links are preferred to distribute keys over large distances to different customers. At Fraunhofer IOF, the prototype of a space-suitable Entangled Photon Source (EPS) has been developed for such satellite links within the framework of the European Space Agency ARTES telecom program.

The EPS is based on a hybrid setup, where a non-linear, periodically poled KTP crystal is double-side pumped using up to 8 mW pumping power at 405 nm in a sagnac-interferometer scheme. The pumping power triggers spontaneous down conversion (SPDC) in the crystal that

1 *Komponenten der verschränkten Photonenquelle.* |
Components of the entangled photon source.

bis zu 1 Mio/s gerechnet werden, was Voraussetzung für die effiziente Datenübertragung bei optischen Freistrahllinks mit hoher Dämpfung ist.

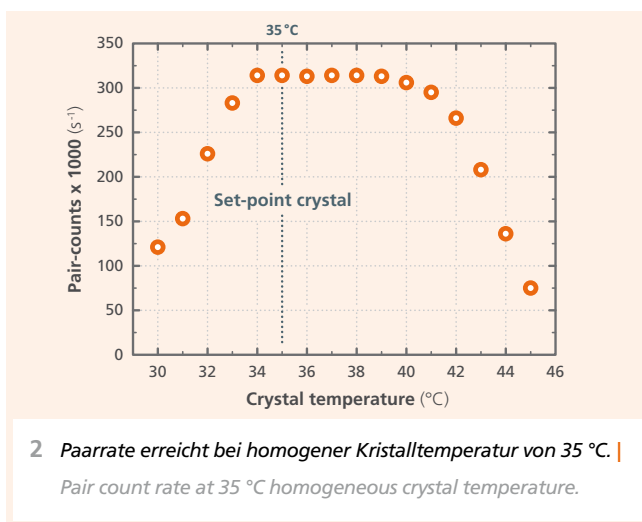
Für das raumfahrttaugliche Design der verschränkten Photonenquelle wurde eine kompakte, präzisionsmechanische und thermomechanisch stabile Plattform entworfen, auf der in determinierten Montagealgorithmen Pump- und Signalstrahlengang der Quelle effektiv und sehr genau justiert werden können. Die Temperierung des nichtlinearen Kristalls erfolgt in der Plattform mit einer Homogenität von bis zu 0,1 K entlang der 30 mm langen optischen Achse des Kristalls. Um die sehr empfindlichen Justierzustände der optischen Komponenten dauerhaft und raumfahrttauglich zu fixieren, kamen spezielle Laserlöt- und Klebtechnologien zum Einsatz. Die Quelle wurde einem typischen Testprogramm für Raumfahrt-Baugruppen unterzogen in Bezug auf thermische und mechanische Belastung sowie Thermalvakuum und auch nach diesen Tests positiv bezüglich der quantenoptischen Parameter evaluiert.

Im Ergebnis der Entwicklungsarbeiten ist geplant, die Quelle weiterzuentwickeln und in einer Satelliten-Mission zur Demonstration eines optischen QKD-Links einzusetzen.

generates polarization entangled photons within sender and receiver channel at rates up to 300.000 pairs per second and at visibilities between 96 - 99 %. At higher pumping power, it is expected that up to 1 mio. pairs/s can be achieved, which will be the basis for efficient key transmission at highly attenuated optical links.

For the space-suitable design of the EPS, a compact, precision mechanics, thermo-mechanically stable platform has been selected, on which the optical setup of the source was integrated via effective and deterministic assembly algorithms, achieving high accuracies. Temperature leveling of the ppKTP crystal within this platform was realized at temperature homogeneity of 0.1 K along the 30 mm long optical axis of the crystal. To fixate the sensitive alignment state of the EPS with respect to long-term stability under space conditions, specific laser based soldering and optics glueing technologies have been used. The source was positively evaluated for its quantum optical parameters within and after typical test cycles for space assembly for thermal and mechanical loads as well as thermal-vacuum.

As a result of the development activities and results, it is planned to further optimize the EPS and implement it in an upcoming satellite mission for the demonstration of QKD links.

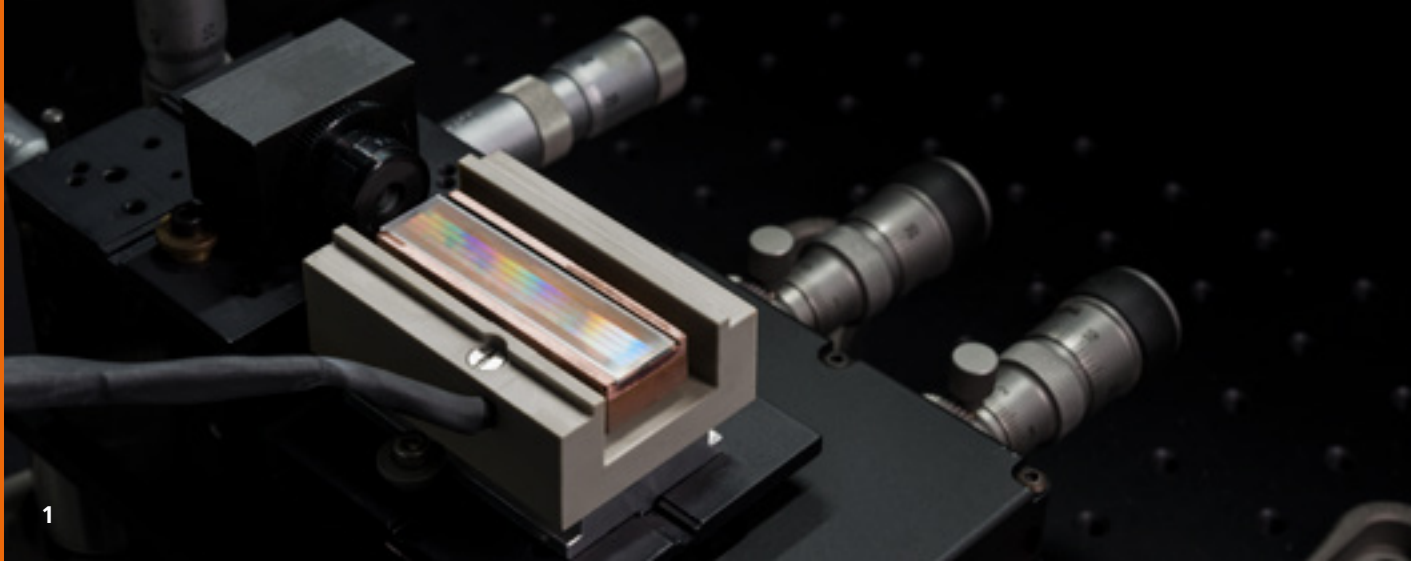


AUTHORS

Erik Beckert
Oliver deVries
Christoph Damm

CONTACT

Dr. Erik Beckert
Phone +49 3641 807-338
erik.beckert@iof.fraunhofer.de



INTEGRIERTE QUELLEN FÜR VERSCHRÄNKTE PHOTONENPAARE INTEGRATED SOURCES FOR ENTANGLED PHOTON PAIRS

Photonenpaare mit einstellbaren Eigenschaften sind die Grundlage vieler Anwendungen der Quantenoptik. Diese speziellen Quantenzustände des Lichts werden gewöhnlich mittels spontaner parametrischer Konversion in Materialien mit einer Nichtlinearität 2. Ordnung erzeugt. Dabei zerfällt ein Pumpphoton in ein Paar aus Signal- und Idlerphotonen. Integriert-optische Systeme erlauben eine weitgehende Kontrolle dieser Konversionsprozesse und damit die Erzeugung von auf die spezifischen Anforderungen verschiedener Anwendungen abgestimmter Photonenteile.

Die Quantenspektroskopie erlaubt durch Ausnutzung von Quanteninterferenzeffekten die Vermessung schwer zugänglicher Spektralbereiche, z. B. des mittleren Infraroten (MIR), mittels Detektion in anderen Spektralbereichen. Dafür werden Photonenteile mit je einem Photon in jedem der adressierten Spektralbereiche benötigt. Eine entsprechende Quelle wurde in einem Lithiumniobat-Wellenleiter, wie in Abbildung 1 dargestellt, realisiert ¹. Dabei wurden Photonenteile mit einer Signalwellenlänge von ca. 1 μm und einer Idlerwellenlänge im MIR von ca. 2,7 μm erzeugt, deren Wellenlängen durch die Pumpwellenlänge kontrolliert wurden. Diese Quelle wird als Grundlage für die Realisierung von auf optischen Chips integrierter Quantenspektroskopie dienen.

Daneben wurden Konzepte entwickelt, um durch eine komplexere Wellenleitergeometrie auch die Kontrolle der

Photonenteile mit maßgeschneiderten Eigenschaften sind die Basis für viele Anwendungen in der Quantenoptik. Diese speziellen Quantenzustände des Lichts werden gewöhnlich durch spontane parametrische Down-Konversion in Materialien mit 2^{ter} Ordnung Nichtlinearität erzeugt, bei der ein Pumpphoton in ein Paar aus Signal- und Idlerphotonen zerfällt. Integrierte optische Systeme ermöglichen eine weitgehende Kontrolle dieser Konversionsprozesse und ermöglichen somit die Erzeugung von Photonenteilen mit Eigenschaften, die für spezifische Anwendungen optimiert sind.

Quantenspektroskopie nutzt Quanteninterferenzeffekte, um spektroskopische Messungen in schwer zugänglichen Spektralbereichen, z. B. im mittleren Infrarot (MIR), durch die Detektion von Photonen in anderen Spektralbereichen zu ermöglichen. Zu diesem Zweck sind Photonenteile mit Photonen in beiden adressierten Spektralbereichen erforderlich. Eine integrierte Quelle für solche Photonenteile wurde in einem Lithiumniobat-Wellenleiter, wie in Abbildung 1 ¹ dargestellt, realisiert. Es wurden Photonenteile mit Signalphotonen bei 1 μm Wellenlänge und Idlerphotonen bei 2,7 μm Wellenlänge erzeugt, deren Wellenlängen durch die Pumpwellenlänge kontrolliert werden können. Diese Quelle kann die Grundlage für die Realisierung von Quantenspektroskopie auf optischen Chips sein.

In addition, we have developed new concepts to control the spatial properties of the generated photon pairs using more complex waveguide geometries. For

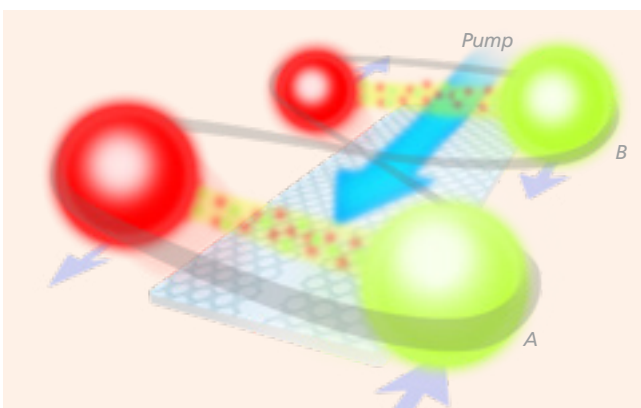
¹ *Wellenleiter zur Photonenteilerzeugung. | Waveguide for photon-pair generation.*

räumlichen Eigenschaften erzeugter Photonenpaare zu ermöglichen. Wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt, erlaubt z. B. eine periodische Strukturierung die simultane Erzeugung von Photonenpaaren, bei denen die Signalphotonen entweder vorwärts oder rückwärts und die Iderphotonen jeweils entgegengesetzt propagieren. Für spezifische Wellenleitergeometrien können dadurch Photonenpaare erzeugt werden, deren Propagationsrichtungen maximal verschränkt sind /2/. Die Erzeugung derartiger Zustände in Wellenleitern ist eine wichtige Grundlage für die Integration komplexerer quantenoptischer Systeme.

example, a periodically structured waveguide allows for the simultaneous generation of photon pairs where the signal is propagating either forward or backward and the idler in the corresponding opposite direction as schematically shown in Figure 2. For specific waveguide geometries, this enables the generation of photon pairs maximally entangled in their propagation direction /2/. The generation of such quantum states in waveguides is an important step towards integration of complex photonic quantum systems.

References / Literatur

- /1/ A. S. Solntsev, P. Kumar, T. Pertsch, A. A. Sukhorukov, and F. Setzpfandt: LiNbO₃ Waveguides for Integrated Quantum Spectroscopy, *APL Photonics* 3, 021301 (2018).
/2/ S. Saravi, T. Pertsch, and F. Setzpfandt: Generation of Counterpropagating Path-Entangled Photon Pairs in a Single Periodic Waveguide, *Phys. Rev. Lett.* 18, 183603 (2017).



2 *Schema eines periodischen Wellenleiters zur Erzeugung verschränkter Photonen durch zwei Konversionsprozesse A und B, die Signal- und Iderphotonen jeweils in entgegengesetzte Propagationsrichtungen emittieren. |*

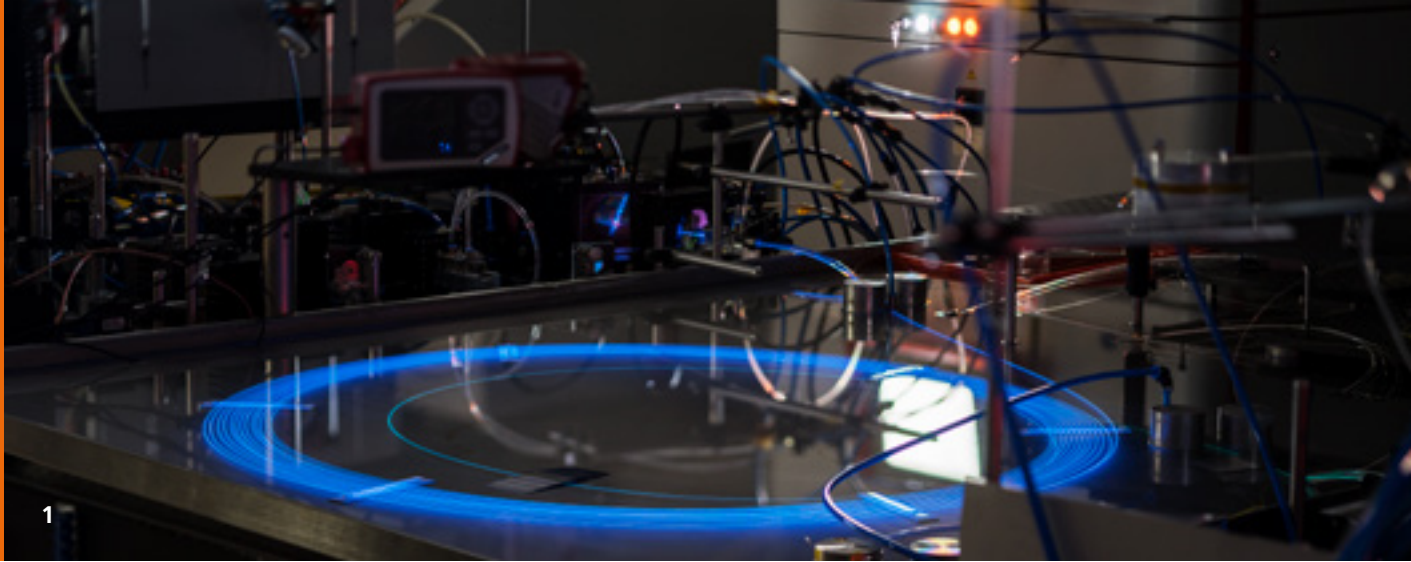
Schematic visualization of a periodic waveguide for the generation of entangled photons using two simultaneous conversion processes A and B, which emit signal and idler photons in opposite directions.

AUTHORS

Frank Setzpfandt
Sina Saravi
Pawan Kumar
Thomas Pertsch

CONTACT

Prof. Dr. Thomas Pertsch
Phone +49 3641 9-47560
thomas.pertsch@uni-jena.de



WÄRMEMESSUNGEN AN DER MODENINSTABILITÄTSSCHWELLE MEASURING THERMAL LOAD IN PRESENCE OF TRANSVERSAL MODE INSTABILITIES

Transversale Modeninstabilitäten (TMI) in Faserverstärkern sind ein signifikantes Hindernis auf dem Weg zu höheren Ausgangsleistungen. Überschreitet die Leistung eine systemabhängige Schwelle, kommt es zu zeitlichen Fluktuationen des Strahlprofils und in der Folge zu einer Verringerung der Strahlqualität. Oberhalb der Schwelle wird eine präzise Bearbeitung von Werkstücken unmöglich. Als Ursache der Strahldynamik wurden thermische Effekte im Faserkern identifiziert, deren Ursprung im Laserprozess und den daran beteiligten Kernmoden zu finden ist. Der Wärmeeintrag ins Kernmedium führt zur Erwärmung der Faser und des umgebenden Materials. Um ein besseres Verständnis für die physikalischen Vorgänge zu gewinnen und die derzeitigen Grenzen der Leistungsskalierung zu verschieben, spielt die Charakterisierung der Temperaturverteilung im Faserkern eine wesentliche Rolle.

Auf der Grundlage der sogenannten Frequenzbereichs-Reflektometrie wurde ein neuartiges in situ-Messsystem entwickelt, mit dem diese Temperaturverteilung während des Hochleistungsbetriebes gemessen werden kann. Der Messaufbau lässt sich in den Faserverstärker integrieren, ohne dessen Eigenschaften signifikant zu beeinflussen. Sind darüber hinaus die Umgebungsbedingungen bekannt, lässt sich aus den gemessenen Temperaturwerten die Wärmemenge im Faserkern bestimmen. Die longitudinale Auflösung erreicht dabei die Größenordnung weniger Millimeter. Unter Zuhilfenahme einer Simulation des Laserprozesses kann die

Transversal mode instabilities (TMI) in fiber amplifiers are a significant obstacle of further output power scaling. If the output power exceeds a system-dependent threshold, the beam profile fluctuates over time and consequently the beam quality is reduced. Above the threshold, precise processing of workpieces becomes unfeasible. The origin of the beam dynamics was identified as thermal effects in the fiber core. The thermal load in the core medium leads to heating of the fiber and the surrounding material. In order to achieve a better understanding of the physical processes and to increase the current limits of power scaling, characterization of the temperature distribution in the fiber core plays an important role.

Based on the so-called frequency domain reflectometry, a new in-situ measurement system was developed to measure this temperature distribution during high-power operation. The measurement setup can be integrated into the fiber amplifier without significantly influencing its properties. If the ambient conditions are known, the quantity of the thermal load in the fiber core can be determined from the measured temperature values. The longitudinal resolution reaches the order of magnitude of a few millimeters. Using a simulation of the laser process, the measured total thermal load can be analyzed and the significant quantities involved can be assigned to quantum defect, photodarkening, and background absorption. The TMI threshold is determined not only by the fiber properties, but also by the bend diameter of the fiber and the signal wavelength.

gemessene Gesamtwärme analysiert und den signifikanten, am Wärmeeintrag beteiligten Größen – Quantendefekt, Photodarkening und Hintergrundabsorption – zugeordnet werden.

Die TMI-Schwelle wird neben den Fasereigenschaften auch aufgrund des Biegedurchmessers der Faser und der zu verstärkenden Signalwellenlänge determiniert. Im Rahmen der Untersuchung wurde die TMI-Schwelle einer Ytterbium-dotierten Faser in Abhängigkeit dieser beiden Größen untersucht. Bei konstanter Faserbiegung konnte die wellenlängenabhängige TMI-Schwelle auf der Grundlage der zuvor ermittelten Wärmemenge vorhergesagt und um 25 % erhöht werden. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass Photodarkening im Falle der untersuchten Faser nur einen zu vernachlässigenden Beitrag zum Wärmeeintrag hat.

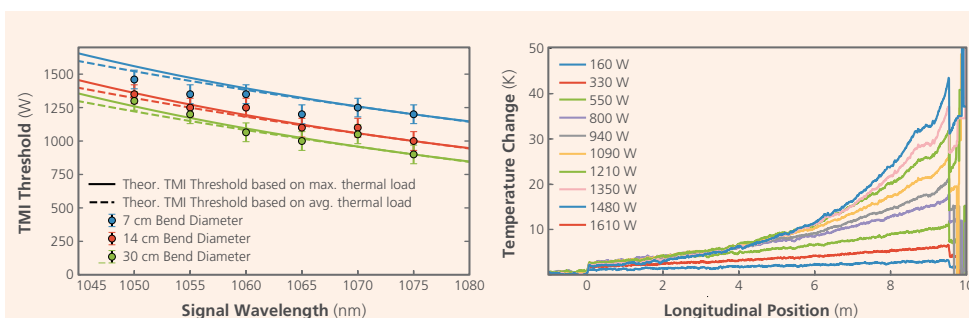
Die gewonnenen Informationen zu Wärmeeintrag und Abhängigkeit der TMI-Schwelle sind auch für die Entwicklung und Herstellung zukünftiger Fasern von Bedeutung. In Zukunft soll erstmals die Wärmeverteilung in verschiedenen Fasern und Betriebszuständen experimentell untersucht und verglichen werden.

The TMI threshold of an ytterbium-doped fiber was investigated as a function of these two variables. With constant fiber bending diameter, the wavelength-dependent TMI threshold could be predicted and increased by 25 % based on the previously determined thermal load. In addition, it has been demonstrated that photodarkening in the case of the investigated fiber has only a negligible impact on the thermal load.

The quantitative information on the thermal load and the dependence of the TMI-threshold is also important for the development and production of future high power fibers. In the future, the heat distribution in different fibers and under various operating conditions will be investigated and compared experimentally for the first time.

References / Literatur

- /1/ F. Beier et al.: Measuring thermal load in fiber amplifiers in the presence of transversal mode instabilities, Opt. Lett. 42, 4311-4314 (2017).
- /2/ F. Beier et al.: Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier, Opt. Express 25, 14892-14899 (2017).



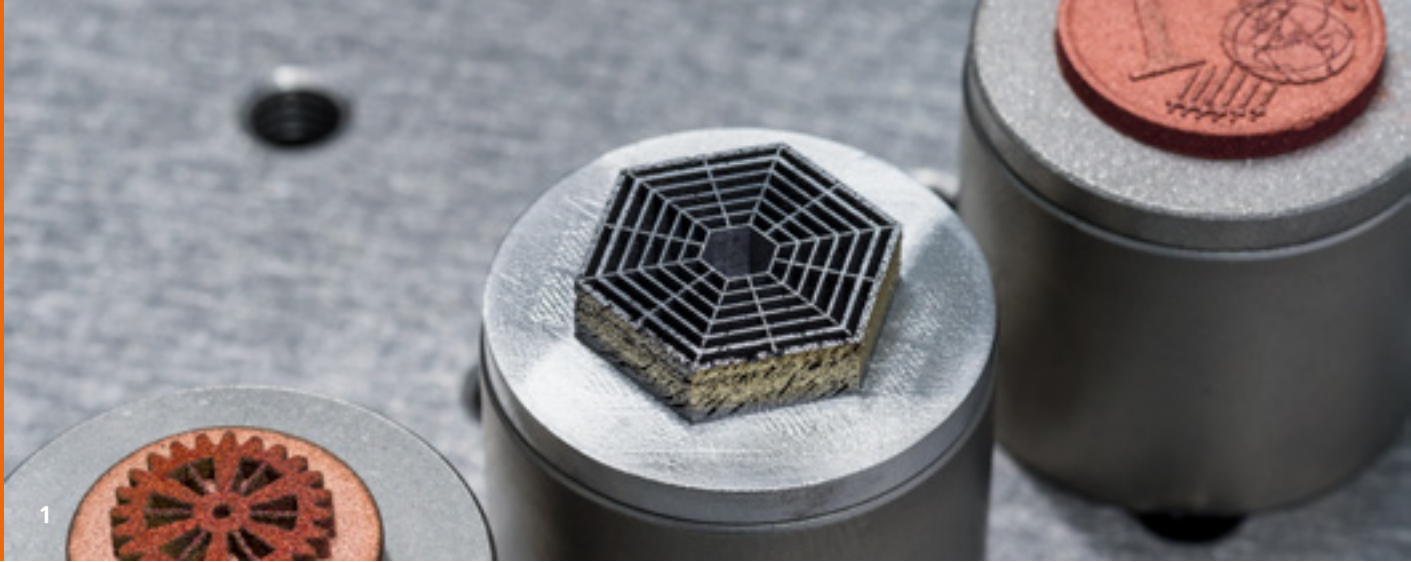
2 *Modeninstabilitätsschwellen für verschiedene Biegedurchmesser und Signalwellenlängen (links). Longitudinale Temperaturverteilung im Faserkern für verschiedene Ausgangsleistungen (rechts). | Mode instability thresholds for different bending diameters and signal wavelengths (left). Longitudinal temperature distribution in the fiber core for different output powers (right).*

AUTHORS

Franz Beier
Marco Plötner
Bettina Sattler
Fabian Stutzki
Till Walbaum
Andreas Liem
Nicoletta Haarlammert
Thomas Schreiber

CONTACT

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



ADDITIVE FERTIGUNG MITTELS ULTRAKURZER LASERIMPULSE ADDITIVE MANUFACTURING USING ULTRASHORT LASER PULSES

Die lasergestützte Additive Fertigung (AM) ermöglicht den schichtweisen Aufbau von Bauteilen hochkomplexer Geometrien. Insbesondere für die Verarbeitung von Metallen hat sich das Pulverbettverfahren etabliert. Allerdings limitiert der Einsatz konventioneller Dauerstrich-Lasersysteme die Auswahl zur Verfügung stehender Werkstoffe. Problematisch sind insbesondere Materialien mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit oder Werkstoffe, die extreme Schmelztemperaturen besitzen. Darüber hinaus unterliegen nicht-eutektische Legierungen oftmals Entmischungsvorgängen während der Laserbearbeitung, die nachhaltig die Stabilität des Gefüges beeinflussen.

Die Anwendung von Ultrakurzpulslaserstrahlung (UKP) zum lokalen Verschweißen des Pulvers erweitert die Auswahl einsetzbarer Werkstoffe erheblich. UKP-Lasersysteme liefern typischer Weise Laserstrahlung mit Pulsdauern kleiner 100 ps (10^{-10} s). Die hierbei zur Verfügung stehenden Puls-spitzenleistungen liegen im MW- bis GW-Bereich. Damit lassen sich die Schmelztemperaturen aller Materialien erreichen. Die hohen Leistungsdichten im Fokusbereich ermöglichen nicht-lineare Absorptionsprozesse, so dass auch transparente Materialien aufgeschmolzen werden. Darüber hinaus unterstützen die extrem kurzen Wechselwirkungszeiten zwischen Laserstrahlung und Material eine Bearbeitung im nichtthermischen

Laser assisted additive manufacturing (AM) allows the layer-wise build-up of elements with highly complex geometries. In particular, for the processing of metals, the powder bed method is well-established. However, the application of conventional continuous wave lasers significantly limits the range of applicable materials. In particular, materials with high thermal conductivity, as well as elements with increased melting temperature, are problematic. Furthermore, non-eutectic materials often show segregation during laser melting, yielding strong degradation of the microstructure stability.

The application of ultrashort pulse (USP) laser radiation for local melting of the powder significantly increases the range of applicable materials. USP laser systems typically deliver laser radiation with pulse durations below 100 ps (10^{-10} s). Here, the available peak power extends from MW to GW. Within this range, the melting temperature of any material can be reached. The high intensities within the focal region yield nonlinear absorption which allow for the melting of transparent materials. Moreover, the extremely short interaction times between laser radiation and material support processing within the non-thermal equilibrium. Thus, segregation processes of composites within the melt

1 *Additiv gefertigte 3D-Strukturen aus AlSi40 (mitte) und reinem Kupfer (links und rechts). Die minimal erzielte Wandstärke mit AlSi40 liegt unterhalb 50 μm , mit Kupfer unterhalb von 100 μm . | Additively manufactured 3D structures from AlSi40 (middle) and copper (left and right). The minimally achieved wall thickness with AlSi40 is below 50 μm , with copper the thickness is below 100 μm .*

Gleichgewicht. Dadurch lassen sich einerseits Entmischungsvorgänge von Materialkompositen im Schmelzbad unterdrücken, zum anderen die lokale Ausdehnung des Schmelzbereiches reduzieren. Als Folge lassen sich komplexe Bauteile mit optimierten Gefügeeigenschaften aufbauen.

So konnten zum Beispiel unter Einsatz von UKP-AM filigrane Elemente aus einer nicht-eutektischen Aluminiumlegierung (AlSi40) hergestellt werden. Die hier erzielten Wandstärken liegen unterhalb von 50 μm (Abb. 1, /1/). AlSi40 eignet sich aufgrund des spezifischen Wärmeausdehnungskoeffizienten ideal zur Herstellung optischer Elemente /2/. Zusätzlich konnte unter Einsatz optimaler Laserparameter das Mikrogefüge deutlich verbessert werden und Entmischungsvorgänge innerhalb der stark übersättigten Al-Legierung unterdrückt werden.

Ein weiteres Beispiel ist reines Kupfer, das zum einen ein sehr hohes Reflexionsvermögen im NIR ($> 98\% @ 1030 \text{ nm}$), zum anderen sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten besitzt. Beide Eigenschaften haben bislang die Verarbeitung in kommerziellen AM-Maschinen verhindert. Mit Hilfe von UKP-AM konnten komplexe dreidimensionale Strukturen aus reinem Kupfer hergestellt werden, die Wandstärken unterhalb 100 μm aufweisen /3/.

Literatur / References

- /1/ T. Ullsperger et al.: Selective laser melting of hypereutectic Al-Si40-Powder using ultra-short laser pulses, Applied Physics A, 123, 798 (2017).
/2/ Patent DE 10 2005 026 418 A1, 2006. 12.21.
/3/ L. Kaden et al.: Selective laser melting of copper using ultrashort laser pulses, Applied Physics A, 123, 596 (2017).

bath can be suppressed and the local heat expansion can be further minimized. As a consequence, complex elements with optimized micro-structure can be fabricated.

For example, devices of hypereutectic aluminum alloy (AlSi40) could be produced by using USP-AM. The minimum wall thickness achieved was below 50 μm (Fig. 1, /1/). AlSi40 is well suited for the fabrication of optical elements due to the adapted thermal expansion coefficient /2/. Moreover, the application of optimized laser parameters improved the microstructure by reducing the appearance of segregation within the supersaturated alloy.

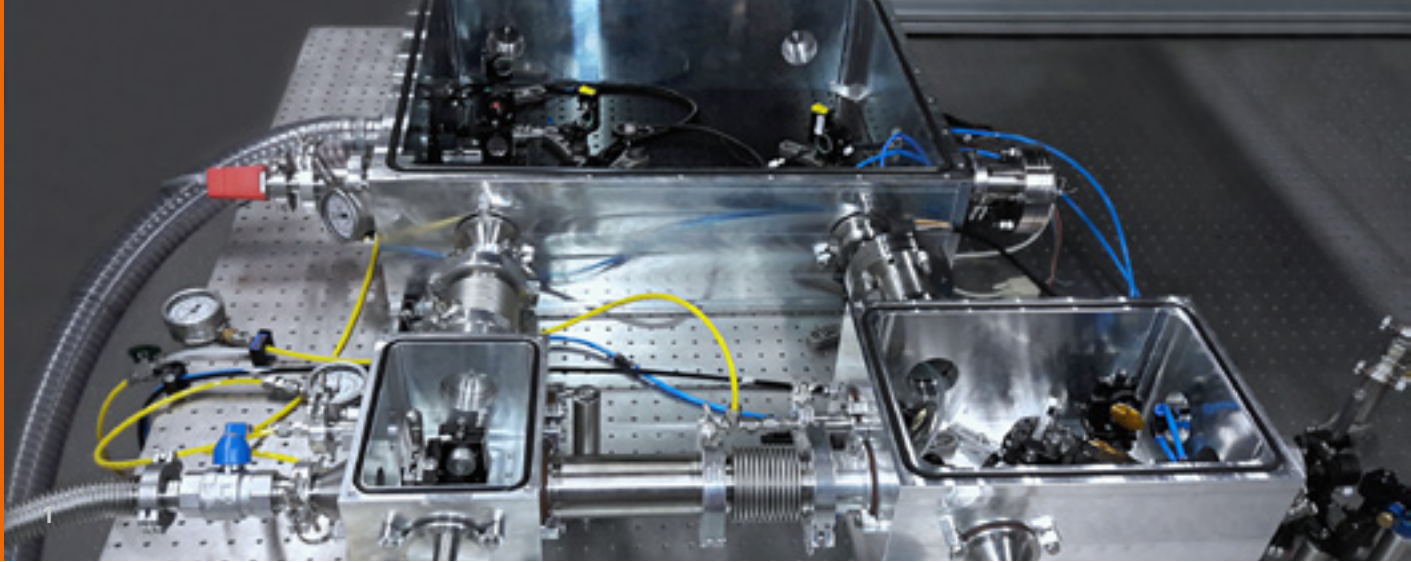
A further example is copper which exhibits high reflectivity values in the NIR ($> 98\% @ 1030 \text{ nm}$) and an extremely high thermal conductivity. Until now, these properties prevented the manufacturing of pure copper parts using commercially available AM machines. By using USP-AM, complex 3D parts could be generated featuring wall thicknesses below 100 μm /3/.

AUTHORS

Gabor Matthäus
Lisa Kaden
Tobias Ullsperger
Stefan Nolte

CONTACT

Dr. Gabor Matthäus
Phone +49 3641 947820
gabor.matthaeus@uni-jena.de



HOCH-BRILLANTE LASER IM MITTLEREN INFRAROT HIGH-BRIGHTNESS MID-INFRARED LASER

Kompakte und robuste hoch-brillante Strahlungsquellen im mittleren Infrarot, die den Wellenlängenbereich zwischen 2 und 20 μm abdecken, werden von Forschern und Entwicklern seit mehreren Jahrzehnten nachgefragt /1/. Diese Nachfrage ist in der spektralen Abdeckung von Rotations-Schwingungs-Übergängen vieler Moleküle in diesem Spektralbereich begründet, was insbesondere für die medizinische Diagnostik, Umweltwissenschaften, Mikroskopie und Grundlagenforschung von großem Interesse ist /1/. Die meisten Fortschritte in diesen Bereichen, die unsere derzeitige Gesellschaft wie nie zuvor beeinflussen, basieren auf der Verwendung von thermischen Strahlungsquellen mit geringer Brillanz. Bis jetzt wurden die Vorteile von Infrarotstrahlung mit hoher Brillanz und das Potenzial für zukünftige Anwendungen lediglich in Synchrotron-Einrichtungen demonstriert, die aufgrund ihrer Größe und ihren hohen Betriebskosten nur eingeschränkt nutzbar sind.

Eine interessante, alternative Möglichkeit der Erzeugung langwelliger Strahlung ist die nichtlineare Frequenzkonversion. Voraussetzung dafür ist jedoch ein nichtlineares Medium mit guter Transmission für die Wellenlänge des treibenden Lasers und für die Zielwellenlänge im mittleren Infrarot. Die beschränkte Verfügbarkeit solcher nichtlinearen Medien erschwert die Nutzung von leistungsstarken Lasern, die typischerweise um oder unter 1 μm Wellenlänge emittieren. Die erst kürzlich neu

Compact and reliable high-brightness mid-infrared radiation sources addressing the wavelength range between 2 and 20 μm have been desired by researchers and developers for several decades. That is, because they cover most of the ro-vibrational transitions of molecules, which is of particular interest for medical diagnostics, environmental science, microscopy, and fundamental research /1/. Most advances in these fields, which are currently impacting our society like never before, are based on the use of low brightness thermal radiation sources. So far, the advantages of high-brightness mid-IR radiation and the potential for future applications have been unveiled with large-scale synchrotron facilities, being incompatible with transfer to mass usage.

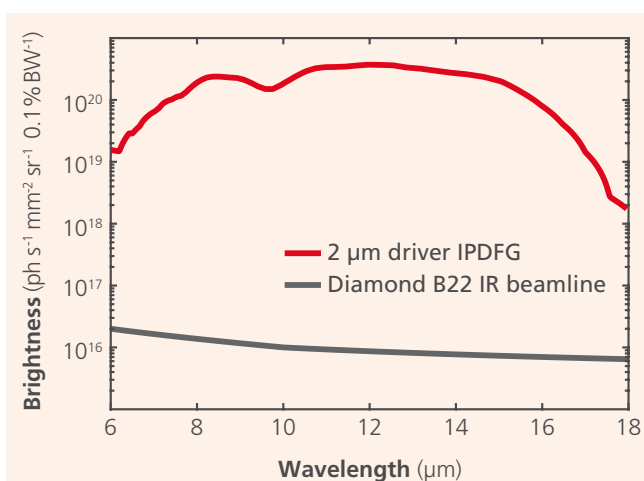
An interesting and long known possibility to reach out for long-wavelength operation is nonlinear frequency downconversion. This, however, requires a nonlinear medium with good transmission for the driving laser wavelength and the targeted mid-IR wavelength region, which is hard to find starting from a pump wavelength at or below 1 μm wavelength, where most high power lasers operate. Therefore, the advent of high power ultrafast Tm-doped fiber lasers operating at 2 μm wavelength /2/ opens up great possibilities for power scaling of ultrafast laser sources in the mid-IR, which is the basis for novel applications in research and development.

1 **Laboraufbau am Institut für Angewandte Physik in Jena.** |

Laboratory setup at the Institute of Applied Physics in Jena.

entwickelten leistungsstarken Thulium-dotierten ultrakurzgepulsten Faserlaser emittieren um $2\ \mu\text{m}$ /2/ und erlauben nun erstmals die Realisierung von brillanter, ultrakurzgepulster, kohärenter Strahlung im mittleren Infrarot, was die Grundlage für neuartige Anwendungen in Forschung und Entwicklung bietet.

Diese neuartige Laserquelle erlaubte uns die Demonstration der bislang höchsten Brillanz in einem spektralen Band, welches gleichzeitig Wellenlängen zwischen $7,5 - 15\ \mu\text{m}$ abdeckt und zwischen $3,7 - 18\ \mu\text{m}$ beliebig einstellbar ist (Abb. 2) /3/. Die Brillanz dieser Quelle im mittleren Infrarot übertrifft die Leistungsfähigkeit von Synchrotrons, die derzeit einzige Alternative in diesem Spektralbereich für Applikationsentwicklung in der Sensorik und Diagnostik der nächsten Generation.



2 Brillanzvergleich von charakteristischer Synchrotronstrahlung (Grau) /3/ und $2\ \mu\text{m}$ faserlasergetriebener Frequenzkonversion im mittleren Infrarot (Rot). | *Brightness comparison of typical synchrotron radiation (gray) /3/ and $2\ \mu\text{m}$ fiber-laser driven frequency conversion in the mid-infrared (red).*

With this laser source we demonstrate the highest brightness to date in a spectral band simultaneously covering the $7.5 - 15\ \mu\text{m}$ wavelength range and with tunability between $3.7 - 18\ \mu\text{m}$ (Fig. 2) /3/. This performance is achieved by a table-top laser source, with dimensions that are significantly smaller than large-scale synchrotron facilities, the only other light sources in this wavelength range currently available for next generation sensing and diagnostic applications.

References / Literatur

- /1/ D. Caffey et al.: Recent results from broadly tunable external cavity quantum cascade lasers, Proc. SPIE 7953 (2011).
- /2/ M. Gebhardt et al.: Nonlinear pulse compression to 43 W GW-class few-cycle pulses at $2\ \mu\text{m}$ wavelength, Opt Lett 42, 4179-4182 (2017).
- /3/ G. Cinque et al.: Far-IR/THz spectral characterization of the coherent synchrotron radiation emission at diamond IR beamline B22. Rendiconti Lincei 22, 33-47 (2011).

AUTHORS

Christian Gaida
Martin Gebhardt
Tobias Heuermann,
Cesar Jauregui
Jens Limpert

CONTACT

Christian Gaida
Phone +49 3641 9-47647
christian.gaida@uni-jena.de



FRAUNHOFER IOF – PHOTONIK WEITERDENKEN FRAUNHOFER IOF – BOOSTING PHOTONICS

Die Forschung und Anwendung von Licht – die Photonik – ist eine der Schlüsseltechnologien für die nächsten Jahrzehnte. Mit ihr wird man die Suche nach Lösungen für viele Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft entscheidend voranbringen können. Die Photonik wird der Medizin neue Einblicke und Therapiemöglichkeiten eröffnen, die Interaktion von Menschen und Maschinen intuitiv und sicher gestalten und die Entwicklung von Systemen ermöglichen, die es uns erlauben mehr über die Umwelt und das Universum zu erfahren.

Um die Forschung auf diesem Weg zu unterstützen und entscheidend weiter zu entwickeln, engagiert sich das Fraunhofer IOF mit einer Reihe von strategischen Projekten, Zentren, Initiativen und Graduiertenschulen. Sie alle verfolgen das Ziel, Rahmenbedingungen zu schaffen, die es der grundlegenden und anwendungsorientierten Forschung ermöglichen, gemeinsame Vorhaben und Ideen schneller und effizienter in Anwendungen zu überführen. Auch die Förderung und Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses zu

The research and application of light – the photonics – is one of the key technologies for the next decades. Photonics will decisively advance the search for solutions to many current and future challenges. By providing new technical opportunities, photonics will provide medicine with new insights and therapies, make human and machine interaction intuitive and secure, and enable the development of systems that allow us to learn more about the environment and the universe.

In order to support and develop research along this path, the Fraunhofer IOF is involved in a series of strategic projects, graduate schools, research centers, and initiatives. They all create new conditions that allow fundamental and application-oriented research to work more closely together and translate joint projects and ideas into applications faster and more efficiently. The promotion and training of young scientists is another very important focus of these projects. On the following pages, the projects and their development status are presented in detail.



herausragenden Persönlichkeiten ihres Arbeitsgebiets ist ein weiterer, ganz wesentlicher Schwerpunkt der Projektarbeit des Fraunhofer IOF. Die Projekte und ihr Entwicklungsstand werden auf den folgenden Seiten im Einzelnen präsentiert.

INHALT

- Seite 78: **Leistungszentrum Photonik**
- Seite 80: **Advanced Imaging Solutions (QUILT)**
- Seite 82: **Max Planck School of Photonics**
- Seite 84: **25 Jahre Fraunhofer IOF**
- Seite 86: **Eröffnung des Fasertechnologiezentrums**
- Seite 88: **TOF – tailored optical fibers**
- Seite 90: **Forschungsallianz 3Dsensation**
- Seite 92: **»Meet the Dutch« in Jena**
- Seite 94: **Das Institut in Zahlen**
- Seite 96: **Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces**
- Seite 100: **Die Fraunhofer-Gesellschaft**
- Seite 102: **Namen, Daten und Ereignisse**

CONTENT

- Page 78: **High Performance Center of Photonics**
- Page 80: **Advanced Imaging Solutions (QUILT)**
- Page 82: **Max Planck School of Photonics**
- Page 84: **25 years of Fraunhofer IOF**
- Page 86: **Fiber Technology Center inaugurated**
- Page 88: **TOF – tailored optical fibers**
- Page 90: **Alliance 3Dsensation**
- Page 92: **"Meet the Dutch" in Jena**
- Page 94: **The Institute in figures**
- Page 96: **Fraunhofer Group Light & Surfaces**
- Page 100: **The Fraunhofer-Gesellschaft**
- Page 102: **Data and activities of the Fraunhofer IOF**

TOP *Photonik-Standort Jena – Blick auf den Beutenberg Campus und das Fraunhofer IOF. | Photonik melting pot Jena – View of the Beutenberg Campus and the Fraunhofer IOF.*



LEISTUNGSZENTRUM PHOTONIK HIGH PERFORMANCE CENTER OF PHOTONICS

Das »Leistungszentrum Photonik« ist eine gemeinsame Initiative des Fraunhofer IOF, der Friedrich-Schiller-Universität Jena, der Leibniz-Institute HKI und IPHT sowie dem Helmholtz-Institut Jena. Es verfolgt das Ziel, die wissenschaftlich herausragende Grundlagenforschung und die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung der beteiligten Akteure noch enger zu verzahnen, Forschungsergebnisse in Anwendungen zu transferieren und die Industrie zu innovativen Lösungen mit Licht zu befähigen. Es dient als zentrales Portal für innovative Industrieforschungsprojekte sowie als Partner in Wirtschaft und Wissenschaft.

Zur Realisierung dieses Ziels verfolgt das Leistungszentrum Photonik zahlreiche Maßnahmen, wie die Einrichtung einer Graduiertenschule für angewandte Photonik sowie die Unterstützung der Vorlaufforschung mittels Pilotprojektförderung, die eine effiziente Umsetzung kreativer Ideen auch abseits des Tagesgeschäfts ermöglichen. Zusätzlich entwickelt das Leistungszentrum strategische Partnerschaften mit internationalen Schwergewichten der Photonik – wie dem Optikcluster Rochester – und trägt strategische Entwicklungen, wie das im vergangenen Jahr erfolgreich eingeworbene Fraunhofer-Leitprojekt »QUILT« und das »Innovationszentrum für Quantenoptik und Sensorik (InQuoSens)«. Die durch das Leistungszentrum initiierte »Max Planck School of Photonics«, eine nationale Exzellenz-Graduiertenschulen des BMBF, bündelt zudem die Kompetenzen der deutschen Photonik-Community mit dem Ziel, hochbegabte Nachwuchsforscher anzuwerben und auf Weltspitzenniveau zu fördern.

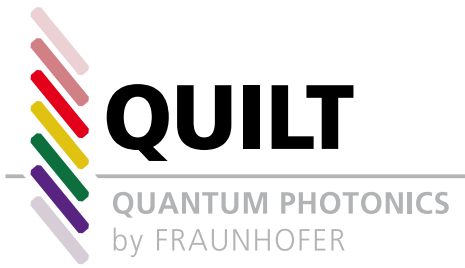
Zukünftig kommt dem Leistungszentrum Photonik eine wachsende Rolle als national fokussiertes Element des Forschungstransfers zu, um insbesondere die klein- und mittelständisch geprägte Photonikindustrie im regionalen und nationalen Umfeld zu stärken. Es bietet Unternehmen hierzu flexible Innovationsplattformen, wie den »Thüringer Innovationscampus Photonik«, auf deren Basis der Zyklus der Produktentwicklung von der Grundlagenforschung zum Prototyp und Endprodukt effizient unterstützt, begleitet und umgesetzt werden kann.

The High Performance Center of Photonics is a joint venture of the Fraunhofer IOF, the Friedrich Schiller University Jena, the Leibniz Institutes HKI, and IPHT as well as the Helmholtz Institute Jena. Its aim is to link outstanding scientific basic research with application-oriented research, to strengthen the German photonics research landscape and to enable innovative industrial solutions using light.

In order to achieve this goal, the High Performance Center pursues a number of activities such as the establishment of a graduate school for applied photonics as well as the support of fundamental and preliminary research projects, which enable the efficient implementation of creative ideas even outside of day-to-day business. In addition, the High Performance Center develops strategic partnerships with international photonics centers and supports strategic developments such as the Fraunhofer Lighthouse Project QUILT and the Innovation Center for Quantum Optics and Sensor Technology (InQuoSens), which were successfully acquired last year. In addition, the Max Planck School of Photonics, one of the first national excellence graduate schools of the Federal Ministry of Education and Research and initiated by the High Performance Center, combines the broad competencies of the German photonics community and pursues the goal of recruiting highly talented young researchers and promoting them to the world's top level.

In the future, the High Performance Center of Photonics will become even more important as a nationally focused element of research transfer in order to strengthen the small and medium-sized photonics industries at both regional and national level. For this purpose, the High Performance Center offers companies flexible innovation platforms and services to enable efficient development cycles from basic research to prototypes and final products.

LEFT *Von der Forschung in die industrielle Anwendung – kompakter Arrayprojektor im BMW 7er. | From research to industry – compact array projector used in the current BMW 7 Series.*



QUILT – QUANTUM METHODS FOR ADVANCED IMAGING SOLUTIONS

In den letzten Jahren ist ein neues Paradigma in den Fokus der Quantenforschung gerückt: Quantenobjekte werden einzeln gesteuert und genutzt. Im Sinne der »zweiten Quantenrevolution« steigt die Quantentechnologie zur Schlüsseltechnologie der modernen Informationsgesellschaft auf. Innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft ist es dem Leistungszentrum Photonik gelungen das Leitprojekt »Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions« (QUILT) zu akquirieren und federführend zu gestalten. Es bündelt das Know-how der Fraunhofer Institute IOF, IPM, IMS, IOSB, ILT und ITWM mit der Exzellenz führender quantentechnologischer Einrichtungen: dem österreichischen Institut für Quantenoptik und Quanteninformation und dem Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts.

Abbildungen mit Quantenlicht bieten Zugang zu aufregenden Forschungsfragen, sie stellen grundlegende Gesetzmäßigkeiten neu auf die Probe: Können exotische Quantenzustände die Abbe'sche Auflösungsgrenze überwinden? Welcher Zusammenhang besteht zwischen Photonen und Information, wenn die Abbildung nur durch die »geisterhafte Fernwirkung« der Verschränkung vermittelt wird?

Durch Quantenimaging können Lichtquellen, Abbildung, und Bildregistrierung auf maßgeschneiderten Wellenlängen operieren. Kaum erschlossene Spektralbereiche werden nutzbar. Anwendungen in Prozess- und Umweltanalytik, Materialprüfung, Mikroskopie und Lithographie können wesentlich verbessert werden. Mittels Quantenimaging-Verfahren kann in drei Dimensionen durch streuende Medien wie Nebel, Rauch oder Gewebe gesehen werden. In diesem Spannungsfeld markiert QUILT den Versuch durch frühzeitiges Engagement diesen Wissenschaftszweig nachhaltig zu gestalten. Es versteht sich als Vorreiter einer modernen Interpretation des Fraunhofer-Gedankens: Entdecker und Erfinder zu sein. Es steht für das Verständnis, durch die dichte Verzahnung von Grundlagen- und Anwendungsforschung, die wissenschaftlich-technische Schlagkraft aufzubauen, um mit Entwicklungen den heutigen Innovationszykluszeiten zuvorzukommen.

Within the last few years, a new paradigm came to the fore of quantum research: quantum objects are being operated and used separately. In line with the 'second quantum revolution', quantum technology is moving towards being the key technology of the modern information society. Within the Fraunhofer-Gesellschaft, the "High Performance Center for Photonics" has succeeded in acquiring the lead project "Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions" (QUILT) and, in a leading position, proactively shaped this "second quantum revolution". It combines the expertise of the Fraunhofer Institutes IOF, IPM, IMS, IOSB, ILT, and ITWM with the excellence of leading quantum technology institutions: the Austrian Institute of Quantum Optics and Quantum Information, and the Max Planck Institute for the Science of Light.

Images with quantum light offer access to exciting research questions. Once again, imaging quantum systems puts basic laws to the test: are exotic quantum states able to overcome the Abbe resolution limit? What is the connection between photons and information if the image is only being imparted by the "ghostly long-distance effect" of entanglement? Quantum imaging allows light sources, imaging, and image registration to operate at tailored wavelengths. Barely accessible spectral ranges become usable. Applications in process and environmental analysis, material testing, microscopy, and lithography can be significantly improved. By means of the quantum imaging method, one can see in 3 dimensions through scattering media such as fog, smoke, or tissue. Within this field of tension, QUILT's early engagement marks the attempt to shape an insight-driven branch of science sustainably. It sees itself as a pioneer of a modern interpretation of the Fraunhofer idea: being a discoverer AND inventor. It stands for the perception that only through a dense interlocking of basic and applied research the scientific-technical impact can be built up, in order to illustrate developments with innovation cycle periods that are necessary today.

LEFT *Das QUILT Konsortium.* | *The QUILT consortium.*



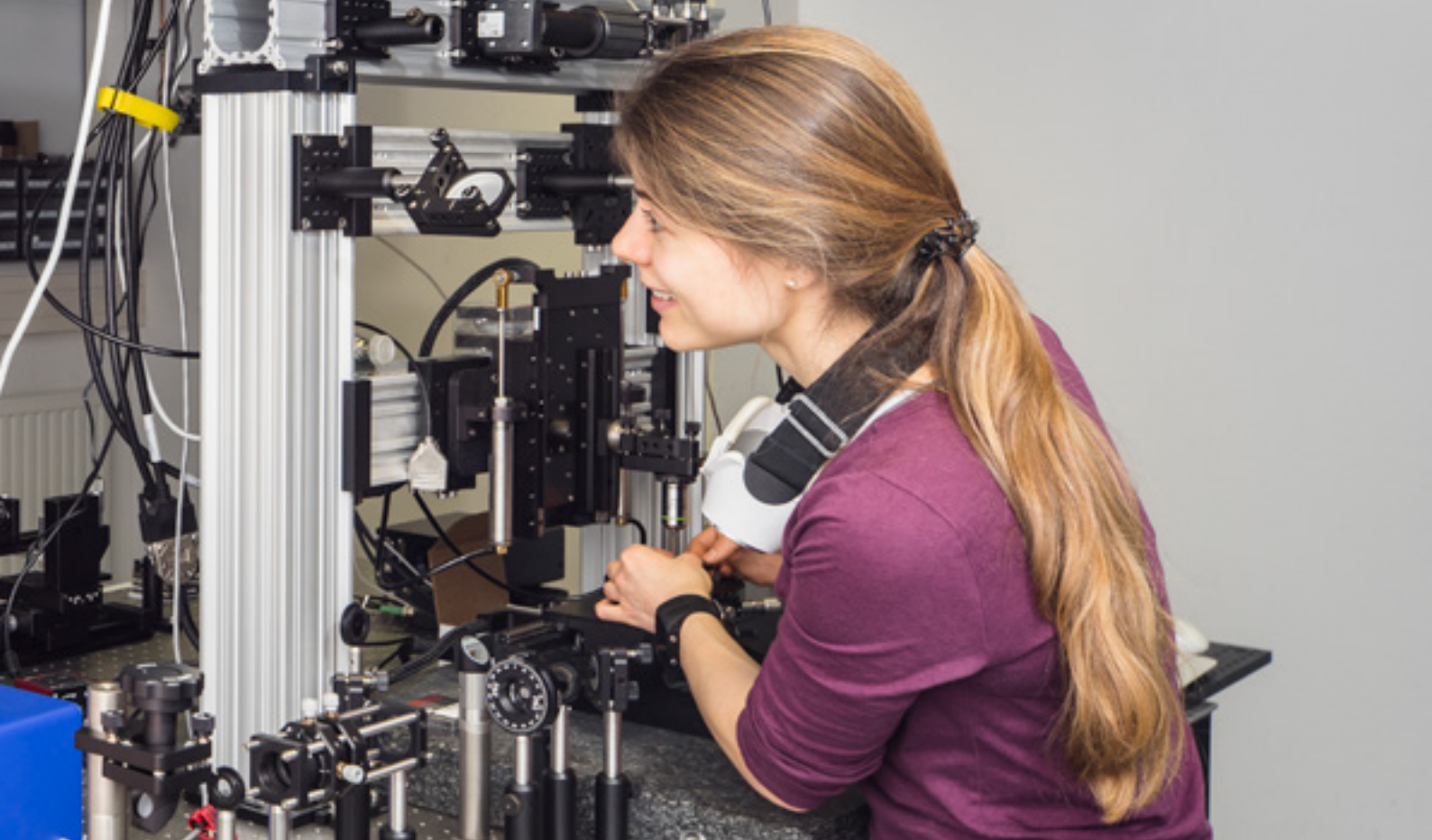
MAX PLANCK SCHOOL OF PHOTONICS

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat die Einrichtung eines neuen Exzellenznetzwerks, das federführend durch das Fraunhofer IOF geleitet wird, befürwortet. Die Max Planck School of Photonics (MPSP) bündelt die Kompetenzen der deutschen Photonik-Community und wird hochbegabte Nachwuchsforscher auf Weltpitzenniveau fördern. Das nationale Exzellenznetzwerk will damit an Standards von Eliteeinrichtungen wie der US-amerikanischen Harvard-Universität oder dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) anknüpfen und neue Maßstäbe in der Forschung mit Licht setzen.

»Mit der MPSP wird ein neues Niveau von Vernetzung innerhalb der Photonik erreicht sowie die Erforschung von Zukunftsthemen wie der Attosekundenphysik oder Quantenoptik vorangetrieben. Das Netzwerk zeigt die Fähigkeit der Photonik-Community, über Disziplinengrenzen und institutionelle Barrieren hinweg große Forschungsthemen anzugehen«, erklärt Prof. Andreas Tünnermann, Gründungsdirektor der MPSP und Direktor des Fraunhofer IOF sowie des Leistungszentrums Photonik in Jena. Die Themenvielfalt reflektiert sich in sieben universitären Standorten sowie neun teilnehmenden Forschungsinstituten. »Unser Konsortium repräsentiert

Germany's Federal Ministry of Education and Research (BMBF) has called for the implementation of a new network of excellence under the lead of the Fraunhofer IOF. The Max Planck School of Photonics (MPSP) combines the key strengths of the German Photonics Community and will support highly skilled young researchers at a world class level. The national network of excellence aims to level the playing field with elite institutions, such as the Harvard University or the Massachusetts Institute of Technology (MIT), by setting new standards in research with light.

»MPSP marks a new level of networking in the photonics community. It pushes the boundaries on cutting edge topics, such as attosecond physics and quantum photonics. The network showcases the photonics community's ability to bridge the gaps between disciplines and cross institutional barriers, enabling it to tackle grand challenges in science« says Prof. Andreas Tünnermann, founding director of the MPSP, director of the Fraunhofer IOF and its High Performance Center of Photonics. The topical diversity is reflected in the seven universities and nine research institutions that participate in MPSP. »Our consortium does not only present the Champions League of



tiert dabei nicht nur die Champions-League der deutschen Photonikforschung, sondern auch ihre Tradition, visionäre Forschung über institutionelle Grenzen hinweg gemeinsam umzusetzen«, erklärt Prof. Tünnermann weiter.

Koordiniert wird das neue Exzellenznetzwerk von der Abbe School of Photonics, die an der Friedrich-Schiller-Universität Jena angesiedelt ist und als internationales Aus- und Weiterbildungszentrum der Photonik gilt. Die MPSP verbindet bereits bestehende nationale und internationale Graduiertenprogramme wie den International Max Planck Research Schools (IMPRS), den Graduiertenkollegs der DFG, den PIER Helmholtz Graduate Schools (PHGS) sowie den Graduiertenschulen der Bundes-Exzellenzinitiative.

Unterstützt wird die Max Planck School of Photonics über die nächsten fünf Jahre durch das BMBF mit einer Fördersumme von 15 Millionen Euro sowie durch die Fraunhofer-Gesellschaft mit weiteren 4 Millionen Euro.

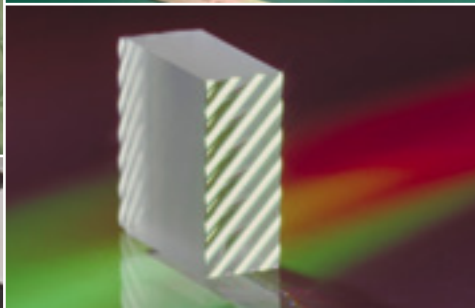
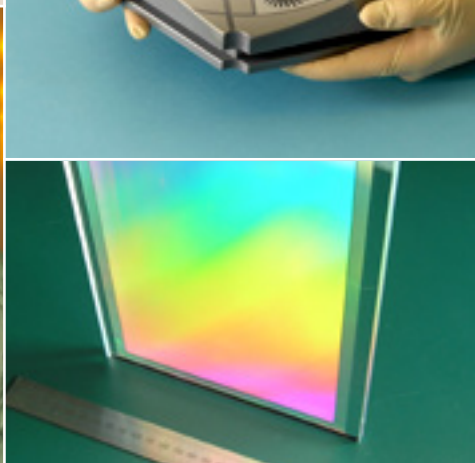
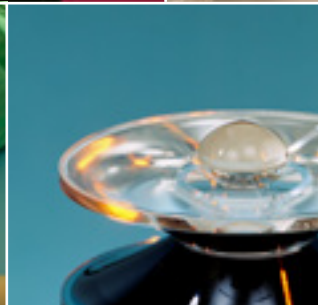
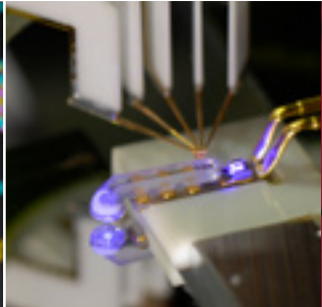
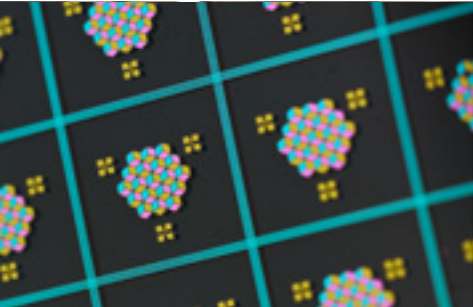
Germany's Photon Science, but also its tradition to implement visionary breakthrough science in joint projects“ Prof. Andreas Tünnermann adds. The new network is coordinated by the Abbe School of Photonics, based at the Friedrich Schiller University Jena, where it has become one of the world's prime locations for education on Photonics. The MPSP connects existing national and international graduate programs, such as the International Max Planck Research Schools (IMPRS), the DFG Graduate Schools, the PIER Helmholtz Graduate Schools as well as the graduate school of the federal Excellence Initiative.

The Max Planck School of Photonics is supported by the Federal Ministry of Education and Research with a sum of 15 million Euros and by the Fraunhofer-Gesellschaft with additional funding of 4 million Euros.

TOP *MPSP – Spitzenforschung fördern. |*

MPSP – Promote cutting-edge research.

25 JAHRE IOF



25 JAHRE FRAUNHOFER IOF

25 YEARS OF FRAUNHOFER IOF

Ein Vierteljahrhundert ist seit der Gründung des Fraunhofer IOF vergangen. Das Institut ist eines von 19 Instituten, die nach der Wiedervereinigung von der Fraunhofer-Gesellschaft in den neuen Bundesländern etabliert wurden. Vor dem Hintergrund des traditionsreichen Optikstandorts Jena sollte ein neues Forschungszentrum entstehen, dessen Schwerpunkt die Optik und Mikrostrukturtechnik bilden. Die ersten Mitarbeiter wurden von Institutsleiter Prof. Dr. Wolfgang Karthe aus den Instituten der Universität und der Akademie der Wissenschaften sowie dem Forschungszentrum des damaligen VEB Carl Zeiss Jena ausgewählt.

1992 startete das Fraunhofer IOF mit 60 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und einer Erstausrüstung von 2,7 Mio. DM in einem Forschungsgebäude im Jenaer Stadtzentrum. 2002 folgte der Umzug an den Beutenberg Campus und weitere zehn Jahre später die Einweihung des ersten Erweiterungsbaus, der Raum für zahlreiche neue Büros und Labore schaffte.

Seitdem hat sich das Institut nachhaltig positiv entwickelt: Heute beschäftigt das Fraunhofer IOF mehr als viermal so viele Mitarbeiter wie zu Beginn und auch der Betriebshaushalt hat sich seit der Institutsgründung verzehnfacht. Insgesamt konnten in den vergangenen 25 Jahren mehr als 2400 Projekte durchgeführt und mit ihnen zahlreiche herausragende Ergebnisse erzielt werden. Die enge Vernetzung mit der Friedrich-Schiller-Universität und der Ernst-Abbe-Hochschule Jena sowie mit zahlreichen regionalen Unternehmen ermöglicht einen schnellen Transfer von Forschungsergebnissen in die Anwendung.

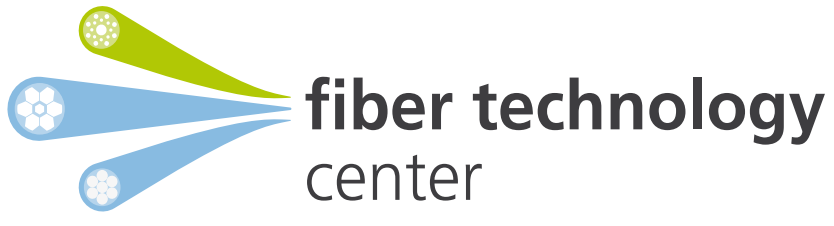
Am 3. Juli 2017 wurde das 25-jährige Bestehen des Institutes gefeiert und gleichzeitig das neue Fasertechnologiezentrum am Fraunhofer IOF in Jena eingeweiht. Als prominente Gäste erschienen dazu unter anderem Thüringens Ministerpräsident Bodo Ramelow, Thüringens Minister für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft, Wolfgang Tiefensee sowie der Vorsitzende der STIFT (Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen) Prof. Werner Bornkessel.

A quarter of a century has passed since the Fraunhofer IOF was founded in Jena. The institute is one of 19 that were established after the reunification by the Fraunhofer Society in the new federal states. Against the backdrop of Jena's long-standing optics tradition, a new research facility was founded to focus on optics and on microtechnology. Then in 1992, the Fraunhofer IOF started with 60 employees and basic equipment of DM 2.7 million in a research building in the center of Jena. The first coworkers became selected from the institutes of the university, the academy and the research center of Zeiss by the founding director Prof. Dr. Wolfgang Karthe.

Ever since, the institute has continued to develop: employing more than four times as many staff members and acquiring an operating budget that has increased ten times since the founding of the institute. More than 2400 projects have been carried out and numerous outstanding results have been achieved in the past 25 years. A decade after moving in, "The Owl" had become too small and the institute moved to Beutenberg Campus and, another ten years later, opened a new extension building which provided space for new laboratories. The development of a regional network including both universities in Jena, as well as local companies, facilitated a close cooperation with fundamental research while at the same time allowing for a fast transfer into applications.

In cooperation with partners from economics and science, including the Leibniz-Institute for Photonic Technologies, the institute celebrated its 25th anniversary on July 3rd, 2017. At the same time, the new fiber technology center at Fraunhofer IOF in Jena was inaugurated. Among prominent guests were Thuringia's Prime Minister, Mr. Bodo Ramelow, Thuringian Minister of Economics, Science and Digital Society, Wolfgang Tiefensee, and the chair of the STIFT (Foundation for Technology, Innovation and Research) Prof. Werner Bornkessel.

LEFT *Impressionen aus 25 Jahren Forschung am Fraunhofer IOF. | Impressions from 25 years of research at the Fraunhofer IOF.*



FASERTECHNOLOGIEZENTRUM ERÖFFNET

FIBER TECHNOLOGY CENTER INAUGURATED

Im Rahmen der Feierlichkeiten zum 25-jährigen Institutsjubiläum wurde am 3. Juli 2017 das neu errichtete Fasertechnologiezentrum auf dem Gelände des Fraunhofer IOF eröffnet. Neben Speziallaboren für die Fertigung von aktiven und passiven mikro- und nanostrukturierten optischen Fasern, entstand dort einer der leistungsfähigsten Faserziehtürme der Welt. In der Anlage werden zukünftig Fasern für die nächste Generation von Hochleistungslasern entstehen, welche unter anderem für Werkzeugmaschinen und in der industriellen Fertigung zum Einsatz kommen.

Der Institutsleiter des Fraunhofer IOF, Prof. Andreas Tünnermann, verwies in seiner Eröffnungsrede auf die wirtschaftliche Bedeutung von Fasertechnologien für die Region Jena. »Mit Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, des Freistaates Thüringen und der Fraunhofer-Gesellschaft konnten wir Jena in den vergangenen Jahren zu einem der weltweit führenden Standorte für optische Fasern machen. Das heute eröffnete Technologiezentrum mit seiner einzigartigen Infrastruktur wird uns dabei helfen, noch besser zu werden.«

Ermöglicht wurde die Errichtung des neuen Fasertechnologiezentrums u. a. durch die Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen – kurz STIFT. Insgesamt 13 Millionen Euro wurden für die Fertigstellung des Forschungsbaus investiert. »Die Errichtung des Fasertechnologiezentrums war eine der anspruchsvollsten Bauaktivitäten der STIFT. Mit diesem Zentrum entsteht eine zukunftsweisende Forschungsinfrastruktur, die eine Vielzahl an Kooperationen möglich macht«, so Prof. Werner Bornkessel, Vorsitzender der STIFT, bei der Eröffnungsveranstaltung.

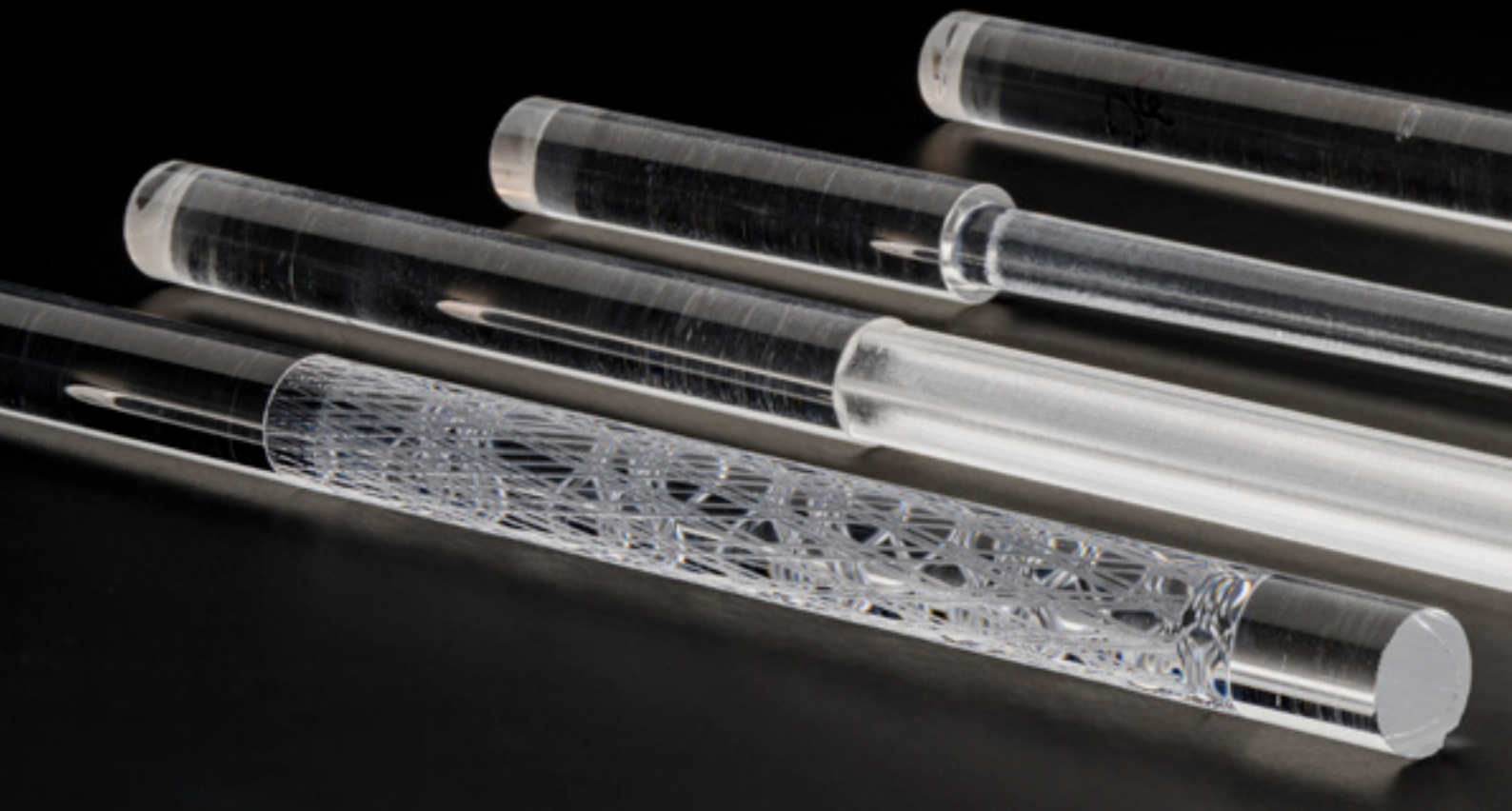
Weiterhin wurde das Fasertechnologiezentrum durch Investitionen des BMBF (Bundesministeriums für Bildung und Forschung), des Landes Thüringen, des EFRE (Europäischer Fonds für regionale Projekte), des Leibniz-IPHT sowie durch Eigenmittel des Fraunhofer IOF finanziert.

Within the context of the festivities for the institute's 25th anniversary, the newly built fiber technology center on the site of Fraunhofer IOF was officially opened on July 3rd 2017. In addition to special laboratories for the production of active and passive micro- and nanostructured optical fibers, one of the world's most powerful fiber drawing towers was developed. The facility is capable of producing fibers for the next generation of high-performance lasers, which will then be used, amongst other things, for machine tools and in industrial production.

Prof. Andreas Tünnermann, director of the Fraunhofer IOF, referred to the economic importance of fiber technologies for the Jena region in his opening speech, "With the support of the Federal Ministry of Education and Research, the Free State of Thuringia and the Fraunhofer Society, we have made Jena one of the world's leading locations for optical fibers in recent years. The technology center with its unique infrastructure will help us to become even better".

The construction of the new fiber technology center was made possible by the Thuringian Foundation for Technology, Innovation and Research Thuringia – shortened to STIFT. 13 million Euros were invested into the research facility. "The construction of the fiber technology center was one of the STIFT's most challenging building activities. With this center, a future-oriented research infrastructure is being created, which makes numerous cooperations possible", said Prof. Werner Bornkessel, chairman of the STIFT, at the opening event. Furthermore, the fiber technology center was financed by investments from the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), the state of Thuringia, the EFRE (the European Fund for Regional Projects), the Leibniz-IPHT, and the Fraunhofer IOF.

LEFT *Wissenschaftler des Fraunhofer IOF testen erstmals den Betrieb der neuen Faserziehanlage. | Scientist of the Fraunhofer IOF while testing the operation of the new fiber drawing plant.*



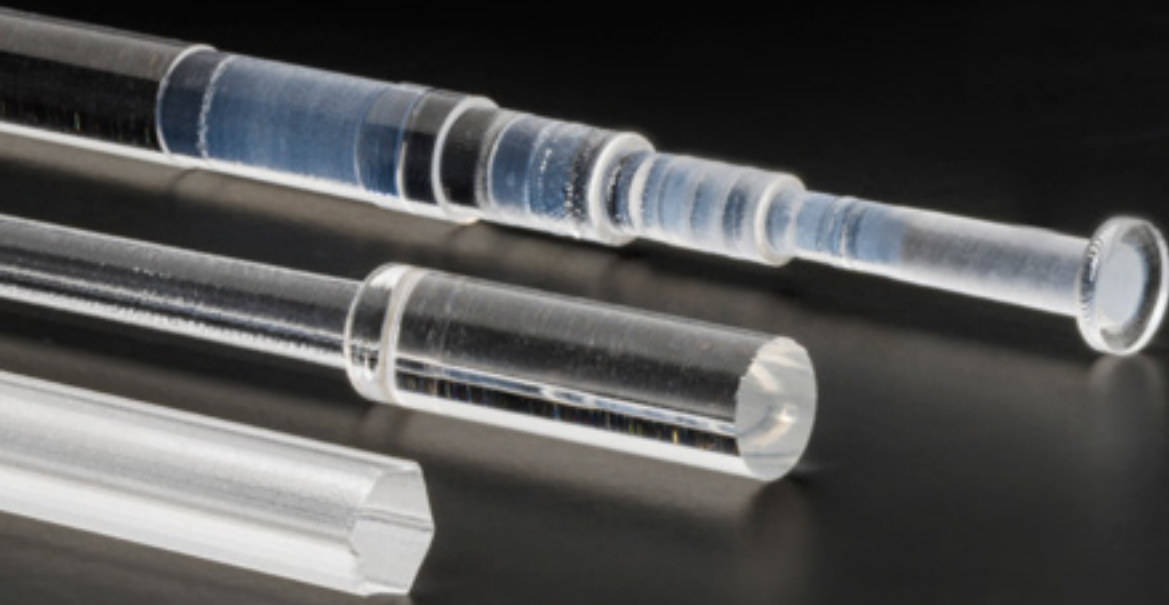
TOF – MASSGESCHNEIDERTE OPTISCHE FASERN TOF – TAILORED OPTICAL FIBERS

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), startete der regionale Wachstumskern TOF (tailored optical fibers) im Januar 2017 mit seiner dreijährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Das Bündnis aus 18 Unternehmen und drei Forschungseinrichtungen des Thüringer Photonik-Sektors entwickelt die Grundlagen für die Nutzung maßgeschneiderter optischer Fasern und Fasersysteme. Ziel ist die Etablierung einer innovativen Technologieplattform mit den Komponenten: Materialien, Faserpreform/-ziehen, Beschichtung, Strukturierung und Systemintegration. Die Tauglichkeit dieser Prozesskette für die industrielle Verwertung nach Projektende wird anhand von beispielhaften Anwendungen in den Bereichen Beleuchtung, Lasermaterialbearbeitung, Textilherstellung, Medizintechnik und Sensorik demonstriert.

Im Rahmen des Wachstumskerns werden vier Verbundprojekte bearbeitet. Im ersten Verbundprojekt werden neue Materialien und Technologien zur Herstellung robuster Lichtwellenleiter auf Quarzglasbasis entwickelt. Die Fasern sollen insbesondere bei Temperaturen von über 500°C stabil sein und chemischen und mechanischen Belastungen widerstehen können. Das

The regional growth core TOF (tailored optical fibers) is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The three-year research and development work started in January 2017. Eighteen companies and three research institutes of the Thuringian photonics sector have formed this alliance to establish a process chain for tailor-made optical fibers and fiber systems. The aim is to accomplish an innovative technology platform with the components: materials, fiber preforming / drawing, coating, structuring, and system integration. TOF will demonstrate the prospective capabilities of the new process chain for industrial use. Therefore, the partners will build up exemplary applications in the areas of lighting, laser materials processing, textile production, medical technology, and optical sensor technology.

TOF organizes the R&D work in four joint projects. The first joint project focuses on the development of new materials and technologies for the production of robust optical fibers based on fused silica. Newly developed fibers should be stable, especially at temperatures above 500 °C while withstanding high chemical and mechanical stress. The second collaborative



zweite Verbundprojekt konzentriert sich auf die Entwicklung neuer, breitbandiger Lichtquellen und Laserquellen für Ultrakurzpulsanwendungen. Für die Kraft- und Lagesensorik sowie die spektroskopische Bildgebung und Gassensorik werden im dritten Projekt faserbasierte Sensorsysteme auf Basis von strukturierten Multikernfasern entwickelt. Darüber hinaus beschäftigt sich der Wachstumskern mit der Integration licht-abstrahlender Fasern in flächig leuchtende textile Gewebe für z.B. flächige Beleuchtungssysteme im Innenbereich (Fahrzeuginterieur) und für den medizinischen Einsatz im Bereich der Lichttherapie. Das Fraunhofer IOF engagiert sich maßgeblich in allen vier Verbundprojekten.

Wir danken dem BMBF für die Finanzierung (FKZ 03WKC-V01B, 03WKC-V02D, 03WKC-V03B und 03WKC-V04C) im Rahmen der Initiative »Unternehmen Region – Innovative Regionale Wachstumskerne«.

project emphasizes on the development of new broadband light sources and laser sources for ultrashort pulse applications. New sensors based on structured multi-core fibers will be developed in the third project, for example sensors for force, gas and position detection as well as sensors for spectroscopic imaging. In addition, the growth core deals with the integration of light-emitting fibers into luminescent textile fabrics for flexible and extensive light sources. Potential applications are indoor ambient lighting systems (vehicle interior) and for medical use in the field of light therapy. The Fraunhofer IOF is involved significantly in all four joint projects.

Funding (grant no. 03WKC-V01B, 03WKC-V02D, 03WKC-V03B, and 03WKC-V04C) within the framework »Unternehmen Region – Innovative Regional Growth Core« of the BMBF is gratefully acknowledged.

TOP *CO₂-Laser-Ablation an Kieselglasstäben mit dem Ziel einer maßgeschneiderten Faserpreform-Bearbeitung. | CO₂ laser ablation on silica glass rods with the aim of tailor-made preform machining.*



3Dsensation

Mensch · Maschine · Umwelt · ZUKUNFT



DIE ALLIANZ 3DSENSATION

THE ALLIANCE 3DSENSATION

Die mit insgesamt 45 Mio. Euro aus dem Förderprogramm Zwanzig20 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung geförderte Allianz »3Dsensation« stellt sich der Herausforderung, Durchbruchinnovationen in den Bereichen Datenerfassung, -verarbeitung und -wiedergabe für die Mensch-Maschine-Interaktion zu entwickeln. Indirekte und ineffiziente Ein- und Ausgabegeräte zwingen den Nutzer, sich auf eine unnatürliche Form der Interaktion einzustellen. Dabei erfolgt Kommunikation größtenteils über visuelle Wahrnehmung. Für Assistenzroboter ist es unabdingbar, visuelle und kognitive Fähigkeiten zu besitzen, die es erlauben, intuitiv und natürlich zu reagieren. Der korrekte Umgang mit der Maschine erfordert zudem einen Großteil der Aufmerksamkeit zu Lasten der eigentlichen Kommunikationsinhalte. Resultat ist ein ineffizientes Miteinander von Mensch und Maschine.

Derzeitige technische Lösungen ermöglichen zwar (teil-) autonomes Interagieren der Maschinen mit ihrer Umgebung und dem Menschen, dieses ist jedoch auf spezifische Bedingungen beschränkt. Hinsichtlich der Aufnahme und Interpretation von komplexen Szenarien liegen die technischen Systeme gegenwärtig weit hinter den Fähigkeiten des Menschen zurück. Die Vision von 3Dsensation sind kognitive Systeme aufgrund optischer Technologien, die den Menschen in seinen Lebens- und Arbeitswelten als echte Assistenten und Partner unterstützen.

Aktuell widmen sich 91 Kooperationspartner aus Natur- und Technikwissenschaften, Arbeits- und Kreativwissenschaften, Kognitions- und Neurowissenschaften sowie Rechts- und Sozialwissenschaften der Umsetzung der 2013 definierten Strategieroadmap. 3Dsensation fokussiert seine Aktivitäten auf die Bereiche Kommunikation und Transfer, Qualifizierung und Nachwuchsförderung, Organisation und Vernetzung sowie Technologie und Applikation und arbeitet in mehr als 210 Projekten an der erfolgreichen Realisierung der strategischen Ziele, und der Beantwortung ethischer Fragen.

With 45 million Euros from the Federal Ministry of Education and Research's funding program Zwanzig20, the alliance "3Dsensation" aims to fundamentally redefine data entry, data processing, and data reporting for Man-Machine-Interaction (MMI). MMI still uses indirect input and output devices, forcing users to learn new and unusual communication skills to operate a machine. Considering that over 80 % of human communication is determined by visual perception, it's logical that robots need to possess the same visual skills and cognitive capabilities that allow for natural and intuitive human-machine interaction. Therefore, a large amount of concentration is lost – interaction is yet to be organized more naturally, intuitively, securely, and efficiently. For this, it is necessary to match man-machine-interaction to human needs and experiences.

Current technological solutions allow machines' autonomous interaction with their surroundings and humans, but this is only possible under specified conditions. The analysis of complex scenarios can not yet be achieved with machines. 3Dsensation aims to develop cognitive systems with the aid of optical technologies, which support humans in their work and life environment as true assistants and partners.

Currently 91 interdisciplinary partners from natural and social sciences, technology and creative sciences, ergonomics and neuroscience, cognitive science and law are working on the roadmap which was defined in 2013. 3Dsensation focusses on communication, transfer, qualification of junior researchers, and networking, as well as technology and its application. After three calls for alliance and innovation projects, there are currently more than 210 projects working towards the realization of strategic goals and addressing ethical and usability concerns.

LEFT *Waferprober zur elektro-optischen Charakterisierung rückseitig beleuchteter Sensorelemente. | Wafer prober for the electro-optical characterization of backside-illuminated sensor elements.*



»MEET THE DUTCH« IN JENA

Am 7. und 8. Februar 2017 waren der niederländische König Willem-Alexander und Königin Maxima zu Gast in Thüringen. Den zweiten Tag ihres Aufenthaltes verbrachten sie am Beutenberg Campus in Jena. Das Königspaar begleitete eine Wirtschaftsdelegation, die in Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt für vier Tage Halt machte, um die Handels- und Investitionsbeziehungen zwischen Deutschland und den Niederlanden zu vertiefen und die Zusammenarbeit in den Branchen Photonik, Halbleitertechnologien und Chemie zu fördern.

Das Königspaar erhielt bei einem Ausstellungsrundgang am Jenaer Leibniz-Institut für Photonische Technologien (Leibniz-IPHT) einen Einblick in die Thüringer Forschungs- und Industrielandschaft. Vier niederländische und vier Thüringer Unter-

On 7th and 8th February 2017, the Dutch royal couple, King Willem-Alexander and Queen Maxima, paid a visit to Thuringia, spending the second day of their stay at the Beutenberg Campus in Jena. The King and Queen were accompanying a business delegation, whose four-day trip to Thuringia, Sachsen, and Sachsen-Anhalt aimed to strengthen trade and investment relations between Germany and the Netherlands, as well as to support cooperation in the sectors of photonics, semiconductor technologies, and chemistry.

During an exhibition tour at Leibniz Institute of Photonic Technology (Leibniz-IPHT) Jena, the royal couple gained an insight into Thuringian research and industry. Four Dutch and four Thuringian companies, as well as research facilities from

1 *Der niederländische König Willem-Alexander und Ministerpräsident Bodo Ramelow im Gespräch mit Andreas Tünnermann zu den Herausforderungen der Mensch-Maschine-Interaktion. |*

The Dutch King Willem-Alexander and Prime Minister Bodo Ramelow in conversation with Andreas Tünnermann on the challenges of man-machine-interaction.

2 *Speed-Dating der niederländischen und deutschen Delegation im Fraunhofer IOF. |*

Speed dating of the Dutch and German delegation at the Fraunhofer IOF.



2

nehmen sowie Forschungseinrichtungen aus der Optik- und Mikroelektronikbranche präsentierten neueste Produkte und Forschungsarbeiten. Die deutsche Ausstellerseite war vertreten durch das Fraunhofer IOF, das Leibniz-Institut für Photonische Technologien (Leibniz-IPHT), die Carl Zeiss AG sowie die BLINK AG aus Jena.

Beim Rundgang des Königspaares durch die Ausstellung waren neben den Direktoren des Leibniz-IPHT und des Fraunhofer IOF, Prof. Jürgen Popp und Prof. Andreas Tünnermann, Thüringens Ministerpräsident Bodo Ramelow, Thüringens Wirtschafts- und Wissenschaftsminister Wolfgang Tiefensee, Jenas Oberbürgermeister Dr. Albrecht Schröter, und Prof. Walter Rosenthal, Präsident der Friedrich-Schiller-Universität Jena, anwesend.

Anschließend unterzeichneten Vertreter von Forschungseinrichtungen aus Jena und den Niederlanden im Beisein von König und Königin eine Absichtserklärung (MoU) für die Intensivierung zukünftiger Forschungskooperationen.

the optics and microelectronics sector, presented cutting-edge products and research results. The German exhibitors were Fraunhofer IOF, Leibniz Institute of Photonic Technology (Leibniz-IPHT), Carl Zeiss AG, and BLINK AG from Jena.

Alongside the institute directors of Leibniz-IPHT and Fraunhofer IOF, Prof. Jürgen Popp und Prof. Andreas Tünnermann respectively, the tour was attended by Thuringia's Minister President Bodo Ramelow, and Thuringia's Minister for Economic Affairs and Science Wolfgang Tiefensee, Jena's Mayor Dr. Albrecht Schröter, as well as Prof. Walter Rosenthal, President of Friedrich Schiller University Jena.

In the presence of King and Queen, representatives of research institutes from Jena and the Netherlands signed a Memorandum of Understanding to further strengthen future research collaborations.

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

THE INSTITUTE IN FIGURES

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2017 ist gegenüber dem Vorjahr um 9 % gestiegen, wobei die Aufwendungen für Personal und Sachausgaben beide gleich um 9 % stiegen. Basis ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag erreichte erstmals über 12,5 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten 11 Millionen Euro.

Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist eine notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2017 wurden insgesamt 5,6 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

Personal

Die Zahl der Mitarbeiter ist gegenüber 2017 nahezu konstant geblieben. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Ernst-Abbe Hochschule Jena.

Operating budget

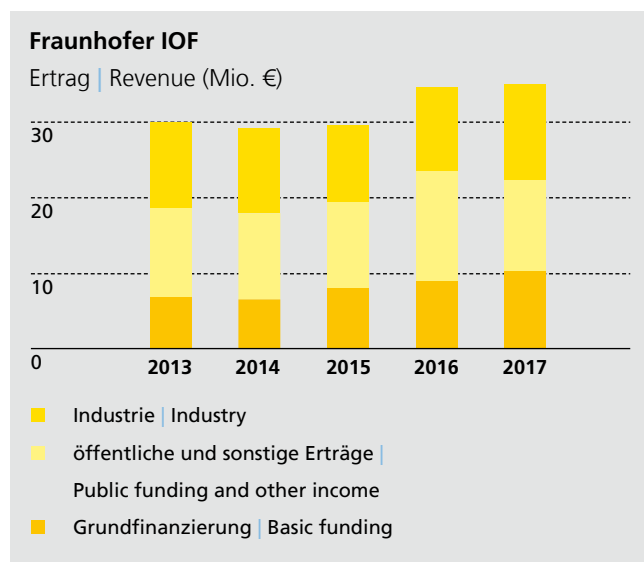
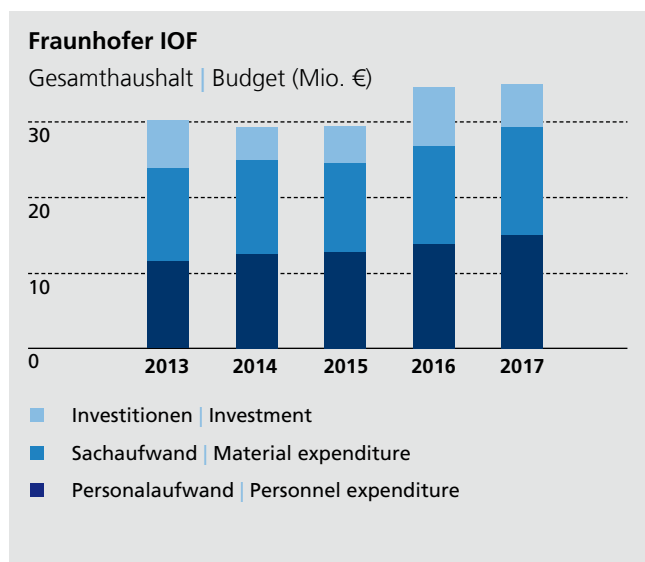
Compared with the previous year the operating budget increased in 2017 by 9 %, with expenditures for staff keeping and material costs grow both by 9 %. The basis is still the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached for the first time more than 12.5 million euros. The received public funding reached 11 million euros.

Investments

The continuous investment in infrastructure is the basis for the development of innovative solutions for our customers. A total of 5.6 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2017.

Staff

The number of employees nearly remained constant compared to 2017. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher education, in particular the Friedrich Schiller University Jena and the Ernst-Abbe University Jena.



Das FSU-IAP 2017 in Zahlen

Die Mitarbeiter des FSU-IAP konnten für 2017 Drittmittel in Höhe von 9,4 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2017 9 Professoren, 30 wissenschaftliche und 17 technische Mitarbeiter sowie 104 Doktoranden und 60 Studenten.

Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

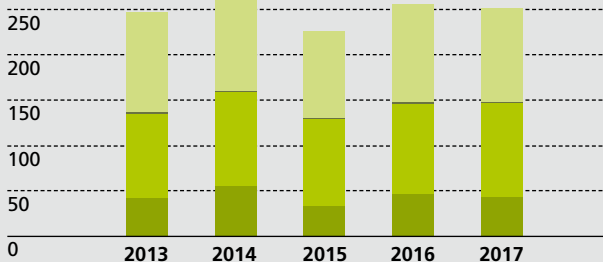
The FSU-IAP in figures 2017

Employees at IAP acquired external funds worth 9.4 million euros in 2017 (see table). A total staff of 9 professors, 30 research assistants, 17 technical assistants, 104 doctoral candidates, and 60 students were working at IAP in 2017.

The majority of completed theses are listed in the attachment.

Fraunhofer IOF

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



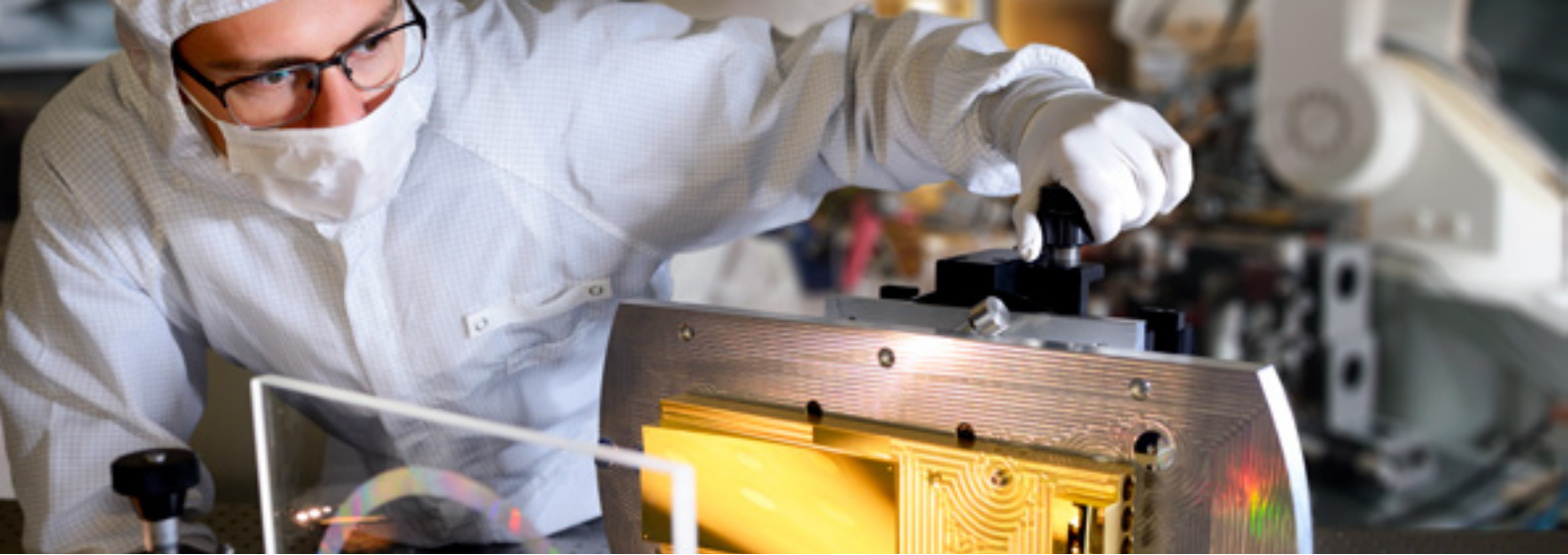
- Wissenschaftler | Scientists
- Techniker | Technicians
- Schüler und Studenten | Students
- Sonstige | Temporary Contracts

FSU-IAP

Drittmittleinnahmen IAP 2017 |

Contract research revenue IAP 2017

Fördergeber Contracts with	Zuwendung Funds T€
BMBF	2.427
DFG	1.782
EU	997
Thüringen Thuringia	424
Stiftungen Foundations	603
Industrie Industry	3.172



FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

FRAUNHOFER GROUP LIGHT & SURFACES

Kompetenz durch Vernetzung

Sechs Fraunhofer-Institute kooperieren im Verbund Light & Surfaces. Aufeinander abgestimmte Kompetenzen gewährleisten eine schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an die Erfordernisse in den verschiedensten Anwendungsfeldern zur Lösung aktueller und zukünftiger Herausforderungen, insbesondere in den Bereichen Energie, Umwelt, Produktion, Information und Sicherheit. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Marktes ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten zum Nutzen der Kunden.

Kernkompetenzen des Verbunds

- Beschichtung und Oberflächenfunktionalisierung
- Laserbasierte Fertigungsverfahren
- Laserentwicklung und nichtlineare Optik
- Materialien der Optik und Photonik
- Mikromontage und Systemintegration
- Mikro- und Nanotechnologien
- Kohlenstofftechnologie
- Messverfahren und Charakterisierung
- Ultrapräzisionsbearbeitung
- Werkstofftechnologien
- Plasma- und Elektronenstrahlquellen

Geschäftsfelder

- Abtragen und Trennen
- Bildgebung und Beleuchtung
- Fügen und Generieren
- Lichtquellen und Lasersysteme
- Lithographie
- Materialprüfung und Analytik
- Medizintechnik und Biophotonik

Competence by networking

Six Fraunhofer institutes cooperate in the Fraunhofer Group Light & Surfaces. Coordinated competences allow quick and flexible alignment of research work on the requirements of different fields of application to answer actual and future challenges, especially in the fields of energy, environment, production, information and security. This market-oriented approach ensures an even wider range of services and creates synergetic effects for the benefit of our customers.

Core competences of the group

- Surface and coating functionalization
- Laser-based manufacturing processes
- Laser development and nonlinear optics
- Materials in optics and photonics
- Microassembly and system integration
- Micro and nano technology
- Carbon technology
- Measurement methods and characterization
- Ultra precision engineering
- Material technology
- Plasma and electron beam sources

Business Fields

- Ablation and cutting
- Imaging and illumination
- Additive manufacturing
- Light sources and laser systems
- Lithography
- Material testing and analytics
- Medical engineering and biophotonics
- Micro systems and sensors



- Mikrosysteme und Sensoren
- Optische Systeme und Instrumentierung
- Werkzeuge und Formenbau

Kontakt

Prof. Dr. Reinhard Poprawe (Verbundvorsitzender)
Telefon +49 241-8906-110

Gabriela Swoboda (Verbundassistentin)
Telefon +49 241-8906-8347
gabriela.swoboda-barthel@ilt.fraunhofer.de

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative optische Systeme zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zu dessen Anwendung. Unser Leistungsangebot umfasst die gesamte photonische Prozesskette vom optomechanischen und optoelektronischen Systemdesign bis zur Herstellung von kundenspezifischen Lösungen und Prototypen. Das Institut ist in den fünf Geschäftsfeldern Optische Komponenten und Systeme, Feinmechanische Komponenten und Systeme, Funktionale Oberflächen und Schichten, Photonische Sensoren und Messsysteme sowie Lasertechnik aktiv.

www.iof.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP

Das Fraunhofer FEP bearbeitet die Themen Vakuumbeschichtung, Oberflächenbearbeitung und -behandlung mit Elektronen und Plasmen und organische Elektronik. Grundlage der Arbeiten sind die Kernkompetenzen Elektronenstrahltechnologie, Sputtern und plasmaaktivierte sowie PECVD-Hochratebeschichtung, Technologien für organische Elektronik

- Optical systems and instrumentation
- Tooling and mold making

Contact

Prof. Dr. Reinhard Poprawe (Group Chairman)
Phone +49 241-8906-110

Gabriela Swoboda (Group Assistant)
Phone +49 241-8906-8347
gabriela.swoboda-barthel@ilt.fraunhofer.de

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF

The Fraunhofer IOF develops innovative optical systems to control light from the generation to the application. Our service range covers the entire photonic process chain from optomechanical and opto-electrical system design to the manufacturing of customized solutions and prototypes. The institute works in the five business fields of Optical Components and Systems, Precision Engineering Components and Systems, Functional Surfaces and Layers, Photonic Sensors and Measuring Systems and Laser Technology.

www.iof.fraunhofer.com

Fraunhofer Institute for Electron Beam and Plasma Technology FEP

Fraunhofer Technology FEP works on innovative solutions in the fields of vacuum coating, surface treatment as well as organic semiconductors. The core competences electron beam technology, sputtering, plasma-activated deposition and high-rate PECVD as well as technologies for organic electronics and IC/system design provide a basis for these activities.



und IC-/ Systemdesign. Es bietet ein breites Spektrum an Forschungs-, Entwicklungs- und Pilotfertigungsmöglichkeiten, insbesondere zur Behandlung, Sterilisation, Strukturierung und Veredelung von Oberflächen an. Außerdem werden OLED-Mikrodisplays, Sensoren, optische Filter und flexible OLED-Beleuchtung entwickelt. Unsere Technologien und Prozesse finden Anwendung im Maschinenbau, in Transportwesen, der Biomedizintechnik, der Architektur und für den Kulturguterhalt, in der Verpackungsindustrie, im Bereich Umwelt und Energie, der Optik, Sensorik und Elektronik sowie in der Landwirtschaft.

www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Mit über 400 Patenten seit 1985 ist das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT ein gefragter FuE-Partner der Industrie für die Entwicklung innovativer Laserstrahlquellen, Laserverfahren und Lasersysteme. Unsere Technologiefelder umfassen Laser und Optik, Lasermesstechnik, Medizintechnik und Biophotonik sowie Lasermaterialbearbeitung. Hierzu zählen u. a. das Schneiden, Abtragen, Bohren, Schweißen und Löten sowie die Oberflächenbearbeitung, die Mikrofertigung und das Rapid Manufacturing. Übergreifend befasst sich das Fraunhofer ILT mit Laseranlagentechnik, Prozessüberwachung und -regelung, Modellierung sowie der gesamten Systemtechnik.

www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Das Fraunhofer IST bündelt als industrienahes FuE-Dienstleistungszentrum Kompetenzen auf den Gebieten Schichtherstellung, Schichtanwendung, Schichtcharakterisierung und Oberflächenanalyse. Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure arbeiten daran, Oberflächen der verschiedensten Grundmaterialien neue oder verbesserte Funktionen zu verleihen, um auf diesem Wege innovative, marktgerechte Produkte zu schaffen. Das Institut ist in folgenden Geschäftsfeldern tätig: Maschinen

Fraunhofer FEP continuously enhances them and makes them available to a wide range of industries: mechanical engineering, transport, biomedical engineering, architecture and preservation, packaging, environment and energy, optics, sensor technology and electronics as well as agriculture.

www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT

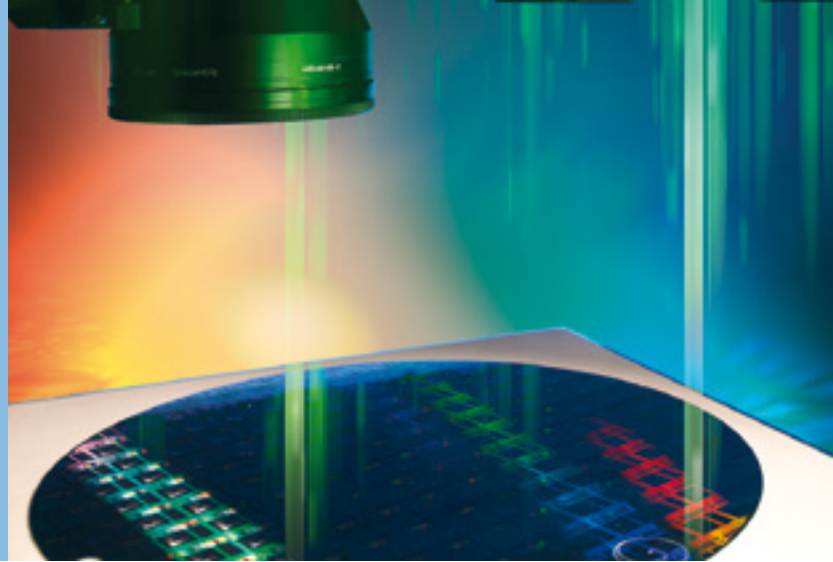
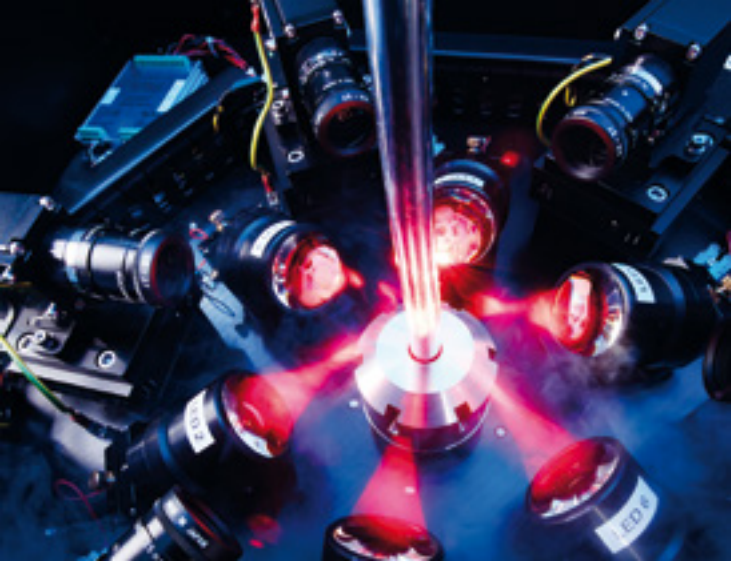
With more than 400 patents since 1985 the Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT develops innovative laser beam sources, laser technologies, and laser systems for its partners from the industry. Our technology areas cover the following topics: laser and optics, medical technology and biophotonics, laser measurement technology and laser material processing. This includes laser cutting, caving, drilling, welding and soldering as well as surface treatment, micro processing and rapid manufacturing. Furthermore, the Fraunhofer ILT is engaged in laser plant technology, process control, modeling as well as in the entire system technology.

www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST

As an innovative R&D partner, the Fraunhofer IST offers complete solutions in surface engineering, which are developed in cooperation with customers from industry and research. The IST's "product" is the surface, optimized by modification, patterning, and/or coating for applications in the business units mechanical engineering, tools and automotive technology, aerospace, energy and electronics, optics, and also life science and ecology. The extensive experience of the Fraunhofer IST with thin film deposition and film applications is complemented by excellent capabilities in surface analysis and in simulating vacuum-based processes.

www.ist.fraunhofer.de



und Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrt, Werkzeuge, Energie, Glas und Fassade, Optik, Information und Kommunikation, Mensch und Umwelt.

www.ist.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM entwickelt maßgeschneiderte Messtechniken, Systeme und Materialien für die Industrie. Dadurch ermöglichen wir unseren Kunden, den Energie- und Ressourceneinsatz zu minimieren und gleichzeitig Qualität und Zuverlässigkeit zu maximieren. Fraunhofer IPM macht Prozesse ökologischer und gleichzeitig ökonomischer. Langjährige Erfahrungen mit optischen Technologien und funktionalen Materialien bilden die Basis für Hightech-Lösungen in der Produktionskontrolle, der Materialcharakterisierung und -prüfung, der Objekt- und Formerkennung, der Gas- und Prozesstechnologie sowie im Bereich Funktionelle Materialien und Systeme.

www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

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

www.iws.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM

The Fraunhofer IPM develops tailor-made measuring techniques, systems and materials for industry. In this way we enable our customers to minimize their use of energy and resources while at the same time maximizing quality and reliability. Fraunhofer IPM makes processes more ecological and at the same time more economical. Many years of experience with optical technologies and functional materials form the basis for high-tech solutions in the fields of production control, materials characterization and testing, object and shape detection, gas and process technology as well as functional materials and systems.

www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS

The Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology is known for its innovations in the business units joining and cutting as well as in the surface and coating technology. Across all business units our interdisciplinary topics include energy storage systems, energy efficiency, additive manufacturing, lightweight construction and big data. Our special feature is the expertise of our scientists in combining the profound know-how in materials engineering with the extensive experience in developing system technologies. Every year, numerous solutions with regard to laser material processing and coating technology have been developed and have found their way into industrial applications.

www.iws.fraunhofer.de

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

THE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 72 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 25 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,3 Milliarden Euro. Davon fallen knapp 2 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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

Research of practical utility lies at the heart of all activities pursued by the Fraunhofer-Gesellschaft. Founded in 1949, the research organization undertakes applied research that drives economic development and serves the wider benefit of society. Its services are solicited by customers and contractual partners in industry, the service sector and public administration.

At present, the Fraunhofer-Gesellschaft maintains 72 institutes and research units. The majority of the more than 25 000 employees are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of 2.3 billion euros. Of this sum, almost 2 billion euros is generated through contract research. Around 70 percent of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. Around 30 percent is contributed by the German federal and state governments in the form of base funding, enabling the institutes to work ahead on solutions to problems that will not become acutely relevant to industry and society until five or ten years from now.

International collaborations with excellent research partners and innovative companies around the world ensure direct access to regions of the greatest importance to present and future scientific progress and economic development.

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

die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

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

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.

www.fraunhofer.de

technologies, and helping to train the urgently needed future generation of scientists and engineers.

As an employer, the Fraunhofer-Gesellschaft offers its staff the opportunity to develop the professional and personal skills that will allow them to take up positions of responsibility within their institute, at universities, in industry and in society. Students who choose to work on projects at the Fraunhofer Institutes have excellent prospects of starting and developing a career in industry by virtue of the practical training and experience they have acquired.

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

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE NAMES, DATA, ACTIVITIES



Besondere Gäste | Special Guests

Ministerpräsident Bodo Ramelow

Freistaat Thüringen, Germany

Minister Wolfgang Tiefensee

Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft, Germany

Niederländisches Königspaar mit Wirtschaftsdelegation,
Netherlands

Delegation des Auswärtigen Amtes der Bundesrepublik,
Germany

Delegation des Bundesministeriums für Wirtschaft und
Energie der Bundesrepublik, Germany

Delegation der Europäischen Zentralbank

Landtagsdirektorenkonferenz, Germany

Reimund Neugebauer

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, Germany

Dr. Felix Holzner

SwissLitho AG, Zürich, Switzerland

Gerd Leuchs

Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen,
Germany

LEFT *Langen Nacht der Wissenschaften – mehr als 3600 Menschen kamen am 24. November 2017 ans Fraunhofer IOF und konnten an vielen Stationen »Forschung mit Licht« erleben. | Long Night of Sciences – On November 24, 2017, more than 3,600 people came to the Fraunhofer IOF and were able to experience "research with light".*

Paul Urbach

Technische Universität Delft, Netherlands

Karsten Danzmann

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Hannover, Germany

Giulio Cerullo

Politecnico di Milano, Italy

Internationale Kooperationen | International Co-operations

Australia

Sydney University | Australian National University Canberra

Austria

Fachhochschule Wien

Brazil

University of Porto Alegre

Canada

University of Toronto | Laval University, Quebec
Montreal McGill University

Czech Republic

Brno University of Technology

Denmark

Aarhus University | RISO National Lab, Roskilde

Finland

University of Eastern Finland, Kuopio

France

ESA, Paris | Institut Fresnel, Marseille | Université Bordeaux
Université de Limoges | Université de Rennes
Université Paris Sud

Great Britain

Durham University | Heriot Watt University Glasgow
EURAMET - European Association of National Metrology
Institutes, London | Imperial College London
NPL National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex
University of Southampton

Hungaria

ELI-ALPS, Budapest

Italy

University of Bari | ENEA, Rom
Sapienza Università di Roma

Japan

University of Tokio

People's Republic of China

Tongji University, Shanghai | CIOMP, Changchun
University Beijing, Peking | Xi'an Technological University

Republic of Korea

Gwangju University | Seoul National University

Russia

Space Research Institute Moscow

Spain

CSIC, Madrid | ICFO Barcelona

Switzerland

ETH Zürich

The Netherlands

ESTEC, Noordwijk | TNO TPD, Delft

Ukraine

Kharkiv State Polytechnic University

United States of America

Houston Rice University | Lawrence Livermore Laboratory
Stanford University California | Yale University, New Haven, CT

Messebeteiligungen | Fairs Participations

Consumer Electronics Show CES

5.–8.1.2017, Las Vegas, USA

SPIE Photonics West

31.1.–2.2.2017, San Francisco, USA

Mobile World Congress MWC

27.2.–2.3.2017, Barcelona, Spain

SID-ME – Spring Meeting 2017

13.–14.3.2017, Dresden, Germany

Hannover Messe, "Research&Technology"

24.–28.4.2017, Hannover, Germany

Control

9.–12.5.2017, Stuttgart, Germany

International Paris Air Show

19.–25.6.2017, Paris - Le Bourget, France

LASER World of PHOTONICS

26.–29.6.2017, München, Germany

Space Tech Expo

24.–26.10.2017, Bremen, Germany

Compamed

13.–16.11.2017, Düsseldorf, Germany

Aus- und Weiterbildung | Education and further training

Die umfangreichen Aktivitäten des Fraunhofer IOF auf dem Gebiet der Aus- und Weiterbildung erstrecken sich von der Ausbildung von Physiklaboranten und Industriemechanikern über die Betreuung von Praktikanten, von Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten sowie von Doktoranden, das Halten von Vorlesungen, die Durchführung von Seminaren und Praktika an den Jenaer Hochschulen bis zur Organisation von Workshops und internationalen Konferenzen.

Comprehensive activities of Fraunhofer IOF in the field of education and further training range from professional training of laboratory technicians and industrial mechanics over the supervision of interns, graduates and postgraduates, giving lectures and seminars at the Jena universities up to the organization of workshops and international scientific conferences.

Vorlesungen I Lectures

Dr.-Ing. Erik Beckert

Optikmontage

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Norbert Kaiser

Beschichtungstechnik

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Gunther Notni

Systemtechnik und Systemtheorie der Bildverarbeitung

Qualitätsmanagement

Bildverarbeitung für die Qualitätssicherung

Aufnahme und Verarbeitung von 3D Daten

Technische Universität Ilmenau

Prof. Dr. Andreas Tünnermann/ Dr. habil. Olaf Stenzel

Thin Film Optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. habil. Olaf Stenzel

Structure of matter

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann/ Dr. Adriana Szeghalmi

Analytical Instrumentation

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann/ Prof. Dr. Stefan Nolte

Atome und Moleküle II

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Stefan Nolte

Lasers in Medicine, Ultrafast optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Jens Limpert/ Prof. Dr. Stefan Nolte

Laser Physics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Jens Limpert

Grundlagen der Laserphysik

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Robert Brunner

Grundlagen Optik, Mikrooptik, Digitale Projektion

Spektrale Sensorik, Geometrische Optik, Mikroskopie

Optische Instrumente, Optical Instrumentation

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Herbert Gross

Design & correction of optical systems, Lens design I, II

Imaging and aberration theory, Optical Engineering

Optical Metrology and Sensing, Microscopy

Physical Optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Thomas Pertsch

Quantum optics, Computational photonics

Computational Physics, Fundamentals of modern optics

Introduction to nanooptics, Introduction to applications

of modern optics and photonics in astronomy

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Uwe Detlef Zeitner

Micro- and Nano-Technology

Introduction to Optical Modeling

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Conferences – Workshops – Events

Niederländische Wirtschaftsdelegation und Königspaar am Beutenberg Campus

8.2.2017, „Meet the Dutch“ – Matching Session am Fraunhofer IOF, Jena, Germany

OptoNet Seminar „Advanced Lens Design“

22.–24.3.2017, Freyburg, Germany

Ausstellung und Festveranstaltung 25 Jahre Fraunhofer in den Neuen Bundesländern

29.-31.5.2017, Dresden, Germany

Optonet Workshop „Präzisionsbearbeitung mit ultrakurzen Laserimpulsen“

31.5.2017, Beutenberg Campus, Jena, Germany

25 Jahre Fraunhofer IOF und

Eröffnung des Fasertechnologiezentrums

3.7.2017, Jena, Germany

Innovationsforum Mensch-Maschine-Interaktion [3Dsensation]

23.–25.10.2017, Fraunhofer IOF, Jena, Germany

MIMAS-Workshop

12.–14.11.2017, Abbe Center of Photonics, Jena, Germany

Öffentlicher Projektworkshop des Wachstumskern
„Tailored Optical Fibers“
15.11.2017, Abbe Zentrum Beutenberg, Jena, Germany

Advanced Lens Design:
Freeform Optics – OptoNet Praxisseminar
21.11.2017, Jena, Germany

Lange Nacht der Wissenschaften
24.11.2017, Beutenberg Campus, Jena, Germany

Bachelorarbeiten | Bachelor Theses

Norman Böhm
Untersuchen und Optimieren verschiedener Einflussparameter zur Anpassung der Oberflächeneigenschaften beim schichtweisen Tintenstrahldruck von 3D-Optikkomponenten
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Colin Froidevaux
Entwicklung eines Single-Shot-M²-Messgeräts
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Julius Heik
Präzisionsfügen mikro-optischer Baugruppen mittels silikatischem Bonden
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Alexandra Maria Hufnagel
Charakterisierung der Erwärmung von Faser-Bragg-Gittern für monolithische Hochleistungsfaserlaser
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Manuel Kirsche
Optimierung eines Siebdruckverfahrens
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Johanna Kölbl
Measurement of laser-induced damage and degradation of optical components
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Julius Klenner
Streulichtreduzierende Ni/P-Schichten
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Sebastian Matte
Aufbau und Automatisierung eines Messplatzes zur Bestimmung lichtinduzierter Verluste in Yb-dotierten Fasern
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Johannes Melle
Entwicklung eines Maschinensetups zum Justierdrehen gefasster Linsen mit synchronisierten Werkzeugen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Elisabeth Montag
Charakterisierung einer Multispektralkamera
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Florian Müller
Konzeption und Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung des Einflusses von Blenden auf das Auftreten von Fringes bei 2f-Spektroskopie
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Niklas Müller
Entwicklung einer ultrapräzisen Fertigungstechnologie zur Herstellung von Gittern auf gekrümmten Substraten
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Tino Ritz
Laserinduzierte Ablation von Kieselglas
Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg

Daniel Scheufler
Charakterisierung eines 3D-NIR-Systems zur Erfassung großflächiger Mensch-Maschine-Interaktionen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Malte Spiekermann
Untersuchung des Photodarkening in Yb³⁺-dotierten Glasfasern für Hochleistungsfaserlaser
Hochschule Hamm-Lippstadt

André Steinbach
Konzeptionierung, Realisierung und Charakterisierung eines Leuchtdichte Messplatzes mit Leuchtdichtekamera zur Charakterisierung von Abbildungen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Masterarbeiten | Master Theses

Elizaveta Akhmadeeva

Thin films characterization in the UV to MIR spectral range

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Tobias Albert

Nachbehandlung von Oberflächen hergestellt durch Selektives Laserschmelzen

HTWK Leipzig

Pooya Aminjavaheri

Physical and Chemical Characterisation of Printable Functional Materials for Semiconductor Applications

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Vivek Beladiya

Effect of substrate biasing on Al₂O₃ and SiO₂ thin films deposited by PEALD

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Justus Bohn

Coupling of quantum dot emission to dielectric metasurfaces integrated in to a liquid crystal cell

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Thomas Bolz

Entwicklung, Integration und Charakterisierung eines Versuchsstandes zur Validierung eines Fügeprozesses mit Messunsicherheiten im sub- μm -Bereich

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Xun Brückner

Development and Characterization of a Burst-Mode Ultrafast Fiber Laser

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Adrian Bubholz

Untersuchung analytischer Methoden zur Vorhersage von Streulicht in optischen Systemen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Tobias Bucher

Integration of MoS₂ monolayers with dielectric nanoantennas

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Jana Budde

Charakterisierung von gesputterten Si-, SiO₂- und Ge-Schichten für Anwendungen im IR-Bereich

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Danyun Cai

Investigations on high-NA objective lenses with narrow bandwidth including a diffractive element

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Alexej Dmitriev

Glätten diamantgedrehter NiP-Substrate für optische Anwendungen von VIS bis EUV

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Wilhelm Eschen

High Resolution Coherent Imaging by Laserdriven XUV-Sources

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Gerrit Feldkamp

Fluorescence lifetime and micro spectroscopy of ytterbium doped material

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Philipp Gierschke

Aufbau und Untersuchung des Amplitudenrauschens einer Ytterbium-dotierten Faserverstärkerkette

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Paul Harrison

Nanoparticle enhanced second harmonic generation in molybdenum disulfide

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Erik Henker

Evaluierung eines organischen Materials für die Ko-Verdampfung mit SiO₂

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Dave Horn

Konzeption und Charakterisierung eines monolithischen Getriebes für aktive Metallspiegel

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Martin Hubold

Characterization and Optimization of Stray Light in a Miniaturized Multi-Aperture Imaging System

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Tobias Jahn

Weiterentwicklung der Justierdrehtechnologie zur Fertigung von Referenzflächen an einer Laserdioden-Fassung
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Alexander Kirsche

Erzeugung hoher Harmonischer mit einem ringförmigen Strahl und Trennung der verschiedenen Strahlkomponenten
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Pawan Kumar

Temporal manipulation of single photon wavepackets generated by spontaneous parametric down-conversion
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Kim Alina Lammers

Untersuchungen des Proximity-Effekts in der Elektronenstrahlolithografie für optische Anwendungen
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Vojtěch Maňkowski

Time-resolved polarization microscopy of plasma-generated birefringent modifications
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Sebastian Merx

Phase retrieval of micro-optical gradient-index components by intensity measurements
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Younesi Mohammadreza

Scattering properties of scanning near-field optical microscopy tips
Friedrich-Schiller-Universität Jena

David Müller

Reaktivgesputtertes SiO_2 , SiO_xN_y , Si_3N_4 und Al_2O_3 . Beständigkeitsuntersuchungen an optischen Schichten
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Heike Müller

Reservoirsysteme zur Realisierung von Antifog-Eigenschaften
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Tanja Niederhausen

Untersuchungen zur Klassifizierbarkeit von Oberflächenunvollkommenheiten auf Basis winkelaufgelöster Streulichtmessungen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Tobias Pelgen

Beschreibung und technologiebedingte Optimierung von Freiformlinsen für Projektionsscheinwerfer im Automotivbereich
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Tom Pertermann

Analyse der Ortsfrequenzen verschiedener Oberflächenfehler auf Metallspiegeln
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Roman Posselt

Entwicklung und Evaluierung eines Verfahrens zur schnellen Kalibrierung photogrammetrischer Stereokameras
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Karl Reichwald

Untersuchungen zur aktiven, binokularen Stereokonstruktion aus mosaikartigen Hyperspektralkameradaten
Technische Universität Ilmenau

Maximilian Reif

Untersuchung ausgewählter Prozessparameter zur Herstellung inkjet-gedruckter Mikrolinsenarrays aus anorganisch-organischem Hybridpolymer
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Christian Rulff

Charakterisierung eines Multi-Apertur-Projektionsystems im nahen Infrarotbereich für die optische 3D-Messtechnik
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Olga Rusyakina

Fabrication and characterization of fiber-optical micro probes
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Paul Schenk

Untersuchung der Mikrostruktur von Aluminiumschichten und ihres Einflusses auf die optischen Eigenschaften
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Simon Schindwolf

Aufbau und Charakterisierung eines 3D-MWIR-Messsystems
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

David Schmelz

**Konzeptionierung und Realisierung einer diffusen
Lichteinkoppelstruktur für Ge-on-Si-Bildsensoren**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Anja Schöneberg

**Aufbau und Kalibrierung eines kamerabasierenden
Messplatzes zur Charakterisierung von Strahlformern**

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Yusuf Sekman

Freeform system tolerance evaluation

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Brian Seyfahrt

**Spatial beam shaping of ultrashort laser pulses for glass
processing applications**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Florian Siegmund

**Algorithmik-Entwicklung eines 2D/3D-Hybriden-
Featuredetectors für die 3D-Punktwolkenregistrierung
unterstützend durch ein projiziertes Lichtmuster**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Malte Per Siems

**Untersuchung und Anpassung der Eigenschaften
ultrakurzpulsgeschriebener Volumen-Bragg-Gitter in
Kieselglas**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Kevin Srokos

**Entwicklung und Realisierung einer hochdynamischen
Linearaktormatrix zur Visualisierung von 3D-Messdaten**

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Carsten Stock

**Design und Herstellung von nanooptischen Verzöge-
rungsplatten**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Marianne Suffner

**Beständigkeit und Schutzwirkung von Fluoriden auf
Aluminium-Schichten**

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Johannes Wilde

**Theoretical Investigation of the Optical Properties of
Coupled Nano-Waveguides**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dissertationen | Dissertations

Dr.-Ing. Matthias Beier

**Fertigung und Kompensation von metalloptischen
Hochleistungsspiegelsystemen für den visuellen Spektral-
bereich**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Lilit Ghazaryan

**Nanoporöse dünne Schichten mittels Atomlagenabschei-
dung und Molekülagensabscheidung**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Thomas Gottschall

**Fiber-based Light Sources for Coherent Raman Scattering
and Multi-Photon Imaging**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Stefan Heist

**Hochgeschwindigkeits-3D-Formvermessung mittels aperi-
odischer Sinus-Muster**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Mario Held

**Präparation und Eigenschaften elektronenstrahlge-
dampfter Mischschichten für die Optik**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Jan Kinast

**Dimensional stabile Spiegelträger für kryogene Anwen-
dungen**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Marco Kienel

**Power Scaling of Ultrashort Pulses by Spatial and Tempo-
ral Coherent Combining**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Rossá MacCiarnain

**Emission Properties of small molecule Phosphor Emitters
in Organic Light Emitting Diodes**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Zhe Shu

**Solution-processed organic light sources for microfluidic
Lab-on-a-Chip systems**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Minyi Zhong

Propagation of partially coherent light in optical systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Felix Zimmermann

Ultrashort pulse induced nanostructures in transparent materials

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Habilitation I State doctorate

Dr. rer. nat. habil. César Jáuregui Misas

Mode instabilities in high-power fiber laser systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Schutzrechte I Intellectual Property

Patentoffenlegungen I Patent First Publications

Beier, M.; Stumpf, D.; Gebhardt, A.; Risse, S.; Zeitner, U.

Verfahren und Vorrichtung zur interferometrischen Prüfung

EP 3 224 570 A1

Böhme, S.; Schreiber, T.; Harnisch, G.; Nold, J.; Liem, A.

Anordnung zur Modifizierung von Glaserzeugnissen

DE 10 2016 112 588 A1

Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.

Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung eines Objektbereichs

US 02017 0118388 A1; TW 2016 07317 A

JP 2017 526002 A; CN 10 6576144 A

Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.

Vorrichtung und Verfahren zur relativen Positionierung einer Multiaperturoptik mit mehreren optischen Kanälen relativ zu einem Bildsensor

EP 3 162 045 A1; CN 10 6716486 A

Danz, N.; Wächter, C.

Anordnung zur orts- und wellenlängenaufgelösten Erfassung von Lichtstrahlung, die von mindestens einer OLED oder LED emittiert wird

US 02017 0248463 A1

von Finck, A.; Schröder, S.; Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Duparré, A.; Notni, G.

Optische Beschichtung und Verfahren zur Herstellung einer optischen Beschichtung mit verminderter Lichtstreuung

DE 10 2016 103 339 A1; WO 2017/144684 A1

Gottschall, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.;

Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung von Laserpulsen

DE 10 2016 103 093 A1

Jáuregui, C. (IAP); Tünnermann, A.; Limpert, J.; Gaida, C. (IAP)

Lichtwellenleiter

EP 3 201 999 A1; US 02017 0302047 A1

Kley, B.; Szeghalmi, A.; Schulz, U.; Ghazaryan, L.

Verfahren zur Herstellung einer porösen Brechzahlgradientenschicht

DE 10 2016 100 914 A1

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Müller, M. (FSU); Kienel, M. (FSU); Klenke, A. (FSU)

Optische Anordnung

WO 2017/108825 A1

Michaelis, D.; Schreiber, P.

Projektionsvorrichtung und Verfahren zur Projektion mit optischen Freiformflächen

DE 10 2015 216 985 A1; WO 2017/037101 A1

Munkelt, C.; Lippmann, U.; Satzer, B.

Autofokussierende optische Vorrichtung und Verfahren zur optischen Autofokussierung

DE 10 2015 214 671 A1

Naujok, P.; Yulin, S.; Murray, K.; Kaiser, N.

Spiegel zur Reflexion von EUV-Strahlung mit Spannungskompensation und Verfahren zu dessen Herstellung

DE 10 2016 107 969 A1; EP 3 239 745 A1

Oberdörster, A.

Mehrkanaloptik-Bildaufnahmevorrichtung

JP 2017 509175 A

Plötner, M.; de Vries, O.; Schreiber, T.

Herstellung eines Faserkopplers

DE 10 2015 118 010 A1

Reinlein, C.; Kamm, A.; Lange, N. (IAP); Mohaupt, M.; Damm, C.
Vorrichtung zur Deformation eines optischen Elements und optisches Element mit der Vorrichtung
DE 10 2016 103 660 A1; EP 3 214 479 A1

Schulz, U.; Szeghalmi, A.; Ghazaryan, L. (IAP); Kley, E.-B. (IAP)
Verfahren zur Herstellung eines reflexionsmindernden Schichtsystems und reflexionsminderndes Schichtsystem
DE 10 2016 100 907 A1

Schürmann, M.; Kaiser, N.; Schwinde, S. (IAP)
Optisches Element mit einer reflektierenden Beschichtung
EP 3 158 370 A1; US 02017 0139085 A1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Vorrichtung mit einer Multikanalabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Herstellen derselben
WO 2017/029375 A1; TW 2017 13993 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, tragbare Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
TW 2017 12399 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem
DE 10 2015 215 837 A1; WO 2017/029376 A1
TW 2017 13992 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit einer reflektierende Facetten aufweisenden Strahlumlenkvorrichtung
DE 10 2015 215 836 A1; WO 2017/029365 A1
TW 2017 13988 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit kanalindividueller Einstellbarkeit
WO 2017/029380 A1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit Optiksubstrat
DE 10 2015 215 833 A1; WO 2017/029372 A1
TW 2017 10727 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
WO 2017/029329 A1; US 02017 264825 A1
TW 2017 13991 A; CN 10 7223331 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
3D-Multiaperturabbildung
DE 10 2015 216 140 A1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs
DE 10 2016 200 285 A1; WO 2017/121609 A1
TW 2017 34571 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Reimann, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtungen, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem
WO 2017/121762 A1; TW 2017 34570 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs
DE 10 2016 204 148 A1; TW 2017 40161 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.;
Datenformat für Multiaperturabbildungssysteme mit kanalweiser Aufteilung des Gesichtsfeldes
DE 10 2016 208 210 A1

Wippermann, F.; Lange, N.; Pabst, O.
Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Verfahren zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes
DE 10 2015 220 566 A1; WO 2017/067977 A1
TW 2017 27315 A

Yulin, S.; Naujok, P.; Kaiser, N.; Bergmann, K. (ILT); von Wezyk, A. (ILT)
Spiegel zur Reflexion von EUV-Strahlung in Strahlung im Spektralbereich zwischen 6 nm und 10 nm und optische Anordnung mit dem Spiegel
DE 10 2015 122 300 A1; EP 3 190 437 A2

Zeitner, U.; Höfer, B.; Eckstein, H.-C.
Optische Anordnung für einen Scheinwerfer und Scheinwerfer mit der optischen Anordnung
DE 10 2016 107 011 A1; WO 2017/178266 A1

Zeitner, U.; Weichelt, T.; Bourgin, Y.

Beleuchtungseinheit und Vorrichtung zur lithographischen Belichtung

DE 10 2015 115 064 A1; EP 3 141 961 A2; JP 2017 54123 A

Patenterteilungen | Patent Assignations

Berlich, R.; Reinlein, C.

Vorrichtung zur Messung einer Aberration, Abbildungssysteme und Verfahren zur Messung einer Aberration

DE 10 2016 211 310 B3

Brahm, A.; Notni, G.; Kühmstedt, P.

Verfahren und Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche

DE 10 2015 211 954 B4

Bruchmann, C.; Beckert, E.; Peschel, T., Damm, C.

Adaptiver Spiegel und Verfahren zu dessen Herstellung

EP 2 257 844 B1

Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Bräuer, A.

Method for manufacturing wafer lens and the manufactured wafer lens

EP 2 437 928 B1

Hartung, J.; Damm, C.; Risse, S.; Satzer, B.; Beier, M. (FSU)

Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines optischen Bauteils mit mindestens drei monolithisch angeordneten optischen Funktionsflächen und optisches Bauteil

DE 10 2015 120 853 B3

Heist, S. (IAP); Kühmstedt, P.; Notni, G.

Verfahren und Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen von Oberflächenkonturen

EP 3 033 588 B1

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

Verfahren zur Herstellung von Leichtbaustrukturelementen

US 9,550,696 B2

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

Verfahren zum Fügen von Substraten

US 9,815,262 B2

Lange, N.; Wippermann, F.

Elektrostatischer Aktor und Verfahren zum Herstellen desselben

EP 2 984 032 B1

Limpert, J.; Röser, F.; Eidam, T.; Jauregui, C.; Tünnermann, A.

Einzelmodenpropagation in mikrostrukturierten Fasern

EP 2 406 674 B1

Limpert, J.; Tünnermann, A.

Gepulste Lichtquelle

EP 2 572 413 B1

Naujok, P.; Yulin, S.; Kaiser, N.

Multilayer-Spiegel zur Reflexion von EUV-Strahlung und Verfahren zu dessen Herstellung

DE 10 2016 118 940 B3

Nolte, S. (IAP); Gabor, M. (IAP); Bergner, K. (IAP)

Verfahren und System zum Bearbeiten eines Objekts mit einem Laserstrahl

DE 10 2013 204 222 B4

Oberdörster, A.

Mehrkanaloptik-Bildaufnahmevorrichtung

KR 10 1810154 B1

Oberdörster, A.; Brückner, A.; Wippermann, F.

Bildaufnahmevorrichtung und Verfahren zum Aufnehmen eines Bildes

EP 2 596 642 B1

Scheidung, S. (IAP); Risse, S.; Peschel, T.; Gebhardt, A.; Damm, C.; Steinkopf, R.

Spiegelanordnung von mehreren Spiegeln in definierbaren Lagebeziehungen und Verfahren zur Herstellung

EP 2 470 328 B1

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

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

EP 2 739 998 B1; US 9,599,756 B1

Schreiber, P.; Sieler, M.; Kraus, M.

Projektionsdisplay und Verfahren zum Projizieren eines Gesamtbildes

US 9,746,673 B2

Schulz, U.; Kaiser, N.; Munzert, P.; Rickelt, F.

Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht

DE 10 2013 106 392 B4; EP 3 011 370 B1

Sieler, M.; Schreiber, P.

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

KR 10 1798122 B; CN 10 3688219 B; JP 6104236 B2

Sieler, M.; Schreiber, P.; Riedel, A.;

Multiapertur-Projektionsdisplay und Einzelbilderzeugung für ein solches

EP 2 984 819 B1; US 9,826,204 B2; KR 10 1796367 B
CN 10 5409209 B

Sieler, M.; Schreiber, P.

Projektionsdisplay mit Mehrkanaloptik mit nicht kreisförmiger Gesamtapertur

US 9,800,850 B2; JP 6200491 B2

Tünnermann, A.; Kalkowski, G.; Eberhardt, R.; Nolte, S. (IAP)

Verfahren zum Lasergestützten Bonden, derart gebundene Substrate und deren Verwendung

EP 2 130 213 B1

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.

Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben

KR 10 1799493 B; JP 6254688 B

Wippermann, F.; Reimann, A.; Dunkel, J.; Bräuer, A.

Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung einer Struktur aus aushärtbarem Material durch Abformung

EP 2 988 914 B1; CN 10 5263686 B; JP 6173565 B

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.

Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen einer Struktur, Abformwerkzeug

EP 2 427 314 B1; JP 5819828 B

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.

Optischer Schichtstapel und Verfahren zu dessen Herstellung

EP 2 653 900 B1; JP 6182179 B

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.

Verfahren zum Herstellen einer Struktur, optisches Bauteil, optischer Schichtstapel

US 9,551,814 B2

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.

Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben

CN 10 104937473 B; KR 10 1805689 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.

Multiaperturvorrichtung und Verfahren zur Erfassung eines Objektbereichs

US 9,769,458 B2; JP 6228306 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.

Vorrichtung mit einer Multikanalabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Herstellen derselben

DE 10 2015 215 841 B4

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.

Multiaperturabbildungsvorrichtung, tragbare Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung

DE 10 2015 215 844 B4

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.

Multiaperturabbildungsvorrichtung mit kanalindividueller Einstellbarkeit

DE 10 2015 215 845 B4

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.

Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung

DE 10 2015 215 840 B4

Wissenschaftliche Publikationen | Scientific Publications

Zeitschriften | Journals

Abass, A.; M. Zilk, S. Nanz, S. Fasold, S. Ehrhardt, T. Pertsch, C. Rockstuhl

A Green's function based analytical method for forward and inverse modeling of quasi-periodic nanostructured surfaces

Journal of Applied Physics 122 (18) (2017) p. 183103, ISSN 0021-8979

Alvarez-Rodriguez, U.; A. Perez-Leija, I.L. Egusquiza, M. Gräfe, M. Sanz, L. Lamata, A. Szameit, E. Solano

Advanced-Retarded Differential Equations in Quantum Photonic Systems Scientific Reports 7 (2017) p. 42933, ISSN 20145-2322

Arslan, D.; K.E. Chong, A.E. Miroshnichenko, D.Y. Choi, D.N. Neshev, T. Pertsch, Y.S. Kivshar, I. Staude

Angle-selective all-dielectric Huygens' metasurfaces

Journal of Physics D-applied Physics 50 (43) (2017) p. 434002, ISSN 0022-3727

Bartels, B.; P. Kulkarni, N. Danz, S. Böcker, H.P. Saluz, A. Svatoš

Mapping metabolites from rough terrain: laser ablation electrospray ionization on non-flat samples

Rsc Advances 7 (2017) p. 9045-9050, ISSN 2046-2069

Becker, N.C.; S. Hädrich, T. Eidam, F. Just, K. Osvay, Z. Varallyay, J. Limpert, A. Tünnermann, T. Pertsch, F. Eilenberger

Adaptive pre-amplification pulse shaping in a high-power, coherently combined fiber laser system

Optics Letters 42 (19) (2017) p. 3916-3919, ISSN 0146-9592

Beier, F.; C. Hupel, S. Kuhn, S. Hein, J. Nold, F. Proske, B.

Sattler, A. Liem, C. Jauregui, J. Limpert, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann

Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier

Optics Express 25 (13) (2017) p. 14892-14899, ISSN 1094-4087

Beier, F.; M. Plötner, B. Sattler, F. Stutzki, T. Walbaum, A. Liem, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann

Measuring thermal load in fiber amplifiers in the presence of transversal mode instabilities

Optics Letters 42 (21) (2017) p. 4311-4314, ISSN 0146-9592

Berner, A.; T. Nobis, H. Gross

Induced axial and lateral color surface contributions

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 34 (5) (2017) p. 685-695, ISSN 1084-7529

Blumröder, U.; H. Hempel, K. Füchsel, P. Hoyer, A. Bingel, R. Eichberger, T. Unold, S. Nolte

Investigating subsurface damages in semiconductor-insulator-semiconductor solar cells with THz spectroscopy

Physica Status Solidi A-applications and Materials Science 214 (5) (2017) p. 1600590, ISSN 1862-6300

Blumröder, U.; M. Zilk, H. Hempel, P. Hoyer, T. Pertsch, R. Eichberger, T. Unold, S. Nolte

Influence of structure geometry on THz emission from Black Silicon surfaces fabricated by reactive ion etching

Optics Express 25 (6) (2017) p. 6604-6620, ISSN 1094-4087

Bock, V.; M. Plötner, O. De Vries, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann

Light scattering in poly(vinyl alcohol) hydrogels reinforced with nanocellulose for ophthalmic use

Optical Materials Express 7 (8) (2017) p. 2824-2837, ISSN 2159-3930

Bock, V.; M. Plötner, O. De Vries, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann

Modal content measurements (S-2) of negative curvature hollow-core photonic crystal fibers

Optics Express 25 (4) (2017) p. 3006-3012, ISSN 1094-4087

Bösel, C.; H. Gross

Single freeform surface design for prescribed input wavefront and target irradiance

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 34 (9) (2017) p. 1490-1499, ISSN 1084-7529

Bösel, C.; N. Worku, H. Gross

Ray mapping approach in double freeform surface design for collimated beam shaping beyond the paraxial approximation

Applied Optics 56 (13) (2017) p. pp. 3679-3688, ISSN 1559-128X

Bourgin, Y.; D. Voigt, T. Käsebier, T. Siefke, E.-B. Kley, U. D. Zeitner

175 nm period grating fabricated by i-line proximity mask-aligner lithography

Optics Letters 42 (19) (2017) p. 3816-3819, ISSN 0146-9592

Brady, A.; R. Berlich, N. Leonhard, T. Kopf, P. Böttner, R. Eberhardt, C. Reinlein
Experimental validation of phase-only pre-compensation over 494 m free-space propagation
Optics Letters 42 (14) (2017) p. 2679-2682, ISSN 0146-9592

Brömel, A.; U. Lippmann, H. Gross
Freeform surface descriptions. Part I: Mathematical representations
Advanced Optical Technologies 6 (5) (2017) p. 327-336, ISSN 2192-8576

Brömel, A.; C. Liu, Y. Zhong, H. Gross
Freeform surface descriptions. Part II: Application benchmark
Advanced Optical Technologies 6 (5) (2017) p. 337-347, ISSN 2192-8576

Buldt, J.; M. Müller, R. Klas, T. Eidam, J. Limpert, A. Tünnermann
Temporal contrast enhancement of energetic laser pulses by filtered self-phase-modulation-broadened spectra
Optics Letters 42 (19) (2017) p. 3761-3764, ISSN 0146-9592

Chemnitz, M.; M. Gebhardt, C. Gaida, F. Stutzki, J. Kobelke, J. Limpert, A. Tünnermann, M.A. Schmidt
Hybrid soliton dynamics in liquid-core fibres
Nature Communications 8 (2017) p. 42, ISSN 2041-1723

Decker, M.; T. Pertsch, I. Staude
Strong coupling in hybrid metal-dielectric nanoresonators
Philosophical Transactions of the Royal Society A-mathematical Physical and Engineering Sciences 375 (2090) (2017) p. 20160312, ISSN 1364-503X

Diener, R.; J. Tepper, L. Labadie, T. Pertsch, S. Nolte, S. Minardi
Towards 3D-photonic, multi-telescope beam combiners for mid-infrared astrointerferometry
Optics Express 25 (16) (2017) p. 19262-19274, ISSN 1094-4087

Fasel, J.; A.S. Knoepfli, D. Millan, R. Ramm, P. Kühmstedt
Quantitative Evaluation of 3D Printed Anatomical Objects: A Comparison of Optical Surface Scanning and Micro-Computed Tomography
SM Journal of Biomedical Engineering 3 (3) (2017) p. 102, ISSN 2573-3702

Felde, N.; L. Coriand, S. Schröder, A. Duparre, A. Tünnermann
Defined wetting properties of optical surfaces
Advanced Optical Technologies 6 (5) (2017) p. 387-394, ISSN 2192-8576

Finck, A.v.; S. Wilbrandt, O. Stenzel, S. Schröder
Reducing light scattering from surface contaminations by thin film design
Advanced Optical Technologies 6 (5) (2017) p. 371-378, ISSN 2192-8576

Franke, C.; O. Stenzel, S. Wilbrandt, S. Schröder, L. Coriand, N. Felde, A. Tünnermann
Porosity and optical properties of zirconia films prepared by plasma ion assisted deposition
Applied Optics 56 (13) (2017) p. 3913-3922, ISSN 1559-128X

Gebhardt, M.; C. Gaida, F. Stutzki, S. Hadrich, C. Jauregui, J. Limpert, A. Tünnermann
High average power nonlinear compression to 4 GW, sub-50 fs pulses at 2 μ m wavelength
Optics Letters 42 (4) (2017) p. 747-750, ISSN 0146-9592

Gebhardt, M.; C. Gaida, T. Heuermann, F. Stutzki, C. Jauregui, J. Antonio-Lopez, A. Schulzgen, R. Amezcua-Correa, J. Limpert, A. Tünnermann
Nonlinear pulse compression to 43 W GW-class few-cycle pulses at 2 μ m wavelength
Optics Letters 42 (20) (2017) p. 4179-4182, ISSN 0146-9592

Goebel, T.A.; C. Voigtländer, R.G. Kramer, D. Richter, M. Heck, M.P. Siems, C. Matzdorf, C. Reinlein, M. Appelfelder, T. Schreiber, J.U. Thomas, A. Tünnermann, S. Nolte
Flexible femtosecond inscription of fiber Bragg gratings by an optimized deformable mirror
Optics Letters 42 (20) (2017) p. 4215-4218, ISSN 0146-9592

Gottschall, T.; J. Limpert, A. Tünnermann
Ultra-short pulse fiber optical parametric oscillator
Optics Letters 42 (17) (2017) p. 3423-3426, ISSN 0146-9592

Gräfe, M.; D.A. Antonosyan, A.S. Solntsev, A.A. Sukhorukov, A. Szameit
Optical emulation of photon-pair generation in nonlinear lossy waveguides
Europhysics Letters 118 (5) (2017) p. 54001, ISSN 0295-5075

- Guo, R.; M. Decker, F. Setzpfandt, X. Gai, D.Y. Choi, R. Kiselev, A. Chipouline, I. Staude, T. Pertsch, D.N. Neshev, Y.S. Kivshar
High-bit rate ultra-compact light routing with mode-selective on-chip nanoantennas
 Science Advances 3 (7) (2017) p. e1700007, ISSN 2375-2548
- Heist, S.; P. Kühmstedt, A. Tünnermann, G. Notni
BRDF-dependent accuracy of array-projection-based 3D sensors
 Applied Optics 56 (8) (2017) p. 2162-2170, ISSN 1559-128X
- Heusinger, M.; M. Banasch, U.D. Zeitner
Rowland ghost suppression in high efficiency spectrometer gratings fabricated by e-beam lithography
 Optics Express 25 (6) (2017) p. 6182-6190, ISSN 1094-4087
- Huber, M.; W. Schweinberger, F. Stutzki, J. Limpert, I. Pupeza, O. Pronin
Active intensity noise suppression for a broadband mid-infrared laser source
 Optics Express 25 (19) (2017) p. 22499-22509, ISSN 1094-4087
- Kaden, L.; G. Matthäus, T. Ullsperger, H. Engelhardt, M. Rettenmayr, A. Tünnermann, S. Nolte
Selective laser melting of copper using ultrashort laser pulses
 Applied Physics A-materials Science & Processing 123 (9) (2017) p. 596, ISSN 0947-8396
- Kalkowski, G.; K. Grabowski, G. Harnisch, T. Flügel-Paul, U. Zeitner, S. Risse
Fused silica GRISMs manufactured by hydrophilic direct bonding at moderate heating
 Ceas Space Journal 9 (4) (2017) p. 433-440, ISSN 1868-2502
- Kemper, F.; E. Beckert, R. Eberhardt, A. Tünnermann
Light filter tailoring - the impact of light emitting diode irradiation on the morphology and optical properties of silver nanoparticles within polyethylenimine thin films
 Rsc Advances 7 (66) (2017) p. 41603-41609, ISSN 2046-2069
- Kemper, F.; E. Beckert, R. Eberhardt, A. Tünnermann
Novel solution-processable light filter approaches for light detection purpose in Lab-on-Chip-Systems
 Materials Today-proceedings 4 (4) (2017) p. 5023-5029, ISSN 2214-7853
- Kerstan, M.; I. Makos, S. Nolte, A. Tünnermann, R. Ackermann
Two-beam femtosecond coherent anti-Stokes Raman scattering for thermometry on CO₂
 Applied Physics Letters 110 (2) (2017) p. 021116, ISSN 0003-6951
- Klein, A.; N. Janunts, S. Schmidt, S. Bin Hasan, C. Etrich, S. Fasold, T. Kaiser, C. Rockstuhl, T. Pertsch
Dual-SNOM investigations of multimode interference in plasmonic strip waveguides
 Nanoscale 9 (20) (2017) p. 6695-6702, ISSN 2040-3364
- Komar, A.; Z. Fang, J. Bohn, J. Sautter, M. Decker, A. Miroshnichenko, T. Pertsch, I. Brener, Y.S. Kivshar, I. Staude, D.N. Neshev
Electrically tunable all-dielectric optical metasurfaces based on liquid crystals
 Applied Physics Letters 110 (7) (2017) p. 071109, ISSN 0003-6951
- Kozak, M.; P. Beck, H. Deng, J. McNeur, N. Schonenberger, C. Gaida, F. Stutzki, M. Gebhardt, J. Limpert, A. Ruehl, I. Hartl, O. Solgaard, J.S. Harris, R.L. Byer, P. Hommelhoff
Acceleration of sub-relativistic electrons with an evanescent optical wave at a planar interface
 Optics Express 25 (16) (2017) p. 19195-19204, ISSN 1094-4087
- Kuster, F.; P. Nikrityuk, M. Junghanns, S. Nolte, A. Tünnermann, R. Ackermann, A. Richter, S. Guhl, B. Meyer
In-situ investigation of single particle gasification in a defined gas flow applying TGA with optical measurements
 Fuel 194 (2017) p. 544-556, ISSN 0016-2361
- Legesse, F.B.; T. Meyer, S. Heuke, T. Gottschall, T. Pascher, J. Limpert, A. Tünnermann, M. Schmitt, J. Popp
Dual-focus coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy using a compact two-beam fiber laser source
 Optics Letters 42 (2) (2017) p. 183-186, ISSN 0146-9592
- Liu, C.; C. Straif, T. Flügel-Paul, U.D. Zeitner, H. Gross
Comparison of hyperspectral imaging spectrometer designs and the improvement of system performance with freeform surfaces
 Applied Optics 56 (24) (2017) p. 6894-6901, ISSN 1559-128X

- Mac Ciarnain, R.; D. Michaelis, T. Wehlius, A.F. Rausch, N. Danz, A. Brauer, A. Tünnermann
Emission from outside of the emission layer in state-of-the-art phosphorescent organic light-emitting diodes
Organic Electronics 44 (2017) p. 115-119, ISSN 1566-1199
- Mac Ciarnain, R.; D. Michaelis, T. Wehlius, A.F. Rausch, S. Wehrmeister, T.D. Schmidt, W. Brutting, N. Danz, A. Brauer, A. Tünnermann
Plasmonic Purcell effect reveals obliquely ordered phosphorescent emitters in Organic LEDs
Scientific Reports 7 (2017) p. 1826, ISSN 20145-2322
- Maczewsky, L.J.; J. M. Zeuner, S. Nolte, A. Szameit
Observation of photonic anomalous Floquet Topological Insulators
Nature Communications 8 (2017) p. 13756, ISSN 2041-1723
- Matz, G.; B. Messerschmidt, W. Goebel, S. Filser, C. Betz, M. Kirsch, O. Uckermann, M. Kunze, S. Flaemig, A. Ehrhardt, K.-M. Irion, M. Haack, J. Herms, H. Gross
Chip-on-the-tip compact flexible endoscopic epifluorescence video-microscope for in-vivo imaging in medicine and biomedicine
Biomedical Optics Express 8 (7) (2017) p. 3329-3342, ISSN 2156-7085
- Michelotti, F.; R. Rizzo, A. Sinibaldi, P. Munzert, C. Wächter, N. Danz
Design rules for combined label-free and fluorescence Bloch surface wave biosensors
Optics Letters 42 (14) (2017) p. 2798-2801, ISSN 0146-9592
- Müller, M.; A. Klenke, T. Gottschall, R. Klas, C. Rothhardt, S. Demmler, J. Rothhardt, J. Limpert, A. Tünnermann
High-average-power femtosecond laser at 258 nm
Optics Letters 42 (14) (2017) p. 2826-2829, ISSN 0146-9592
- Müller, R.; S. Yulin, P. Naujok, N. Kaiser, A. Tünnermann
Optical properties and oxidation resistance of different transition metals for soft X-ray and EUV applications
Thin Solid Films 624 (2017) p. 1-6, ISSN 0040-6090
- Müller, H. Knopf, H.; U. Schulz
Organisch modifizierte poröse Schichten für Antifog-Anwendungen
Vakuum in Forschung und Praxis 29 (5) (2017) p. 31-35, ISSN 1522-2454
- Munzert, P.; N. Danz, A. Sinibaldi, F. Michelotti
Multilayer coatings for Bloch surface wave optical biosensors
Surface & Coatings Technology 314 (2017) p. 79-84, ISSN 0257-8972
- Naujok, P.; K. Murray, S. Yulin, C. Patzig, N. Kaiser, A. Tünnermann
Thermal stability of B-based multilayer mirrors for next generation lithography
Thin Solid Films 642 (2017) p. 252-257, ISSN 0040-6090
- Nie, Y.; H. Gross, Y. Zhong, F. Duerr
Freeform optical design for a non-scanning corneal imaging system with a convexly curved image
Applied Optics 56 (20) (2017) p. 5630-5638, ISSN 1559-128X
- Occhicone, A.; A. Sinibaldi, F. Sonntag, P. Munzert, N. Danz, F. Michelotti
A novel technique based on Bloch surface waves sustained by one-dimensional photonic crystals to probe mass transport in a microfluidic channel
SENSORS AND ACTUATORS B-CHEMICAL 247 (2017) p. 532-539, ISSN 0925-4005
- Oleszko, M.; R. Hambach, H. Gross
Decomposition of the total wave aberration in generalized optical systems
Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 34 (10) (2017) p. 1856-1864, ISSN 1084-7529
- Pfeiffer, K.; U. Schulz, A. Tünnermann, A. Szeghalmi
Antireflection Coatings for Strongly Curved Glass Lenses by Atomic Layer Deposition
Coatings 7 (8) (2017) p. 118, ISSN 2079-6412
- Plötner, M.; V. Bock, T. Schultze, F. Beier, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann
High power sub-ps pulse generation by compression of a frequency comb obtained by a nonlinear broadened two colored seed
Optics Express 25 (14) (2017) p. 16476-16483, ISSN 1094-4087

- Ribes-Pleguezuelo, P.; B. Septriani, S. Zhang, E. Beckert, R. Eberhardt, F. Wyrowski, A. Tünnermann
Solderjet bumping packaging technique optimization for the miniaturization of laser devices
 Journal of the European Optical Society-rapid Publications 13 (2017) p. 34, ISSN 1990-2573
- Ribes-Pleguezuelo, P.; S. Zhang, E. Beckert, R. Eberhardt, F. Wyrowski, A. Tünnermann
Method to simulate and analyse induced stresses for laser crystal packaging technologies
 Optics Express 25 (6) (2017) p. 5927-5940, ISSN 1094-4087
- Richter, D.; M.P. Siems, W.J. Middents, M. Heck, T.A. Göbel, C. Matzdorf, R.G. Kramer, A. Tünnermann, S. Nolte
Minimizing residual spectral drift in laser diode bars using femtosecond-written volume Bragg gratings in fused silica
 Optics Letters 42 (3) (2017) p. 623-626, ISSN 0146-9592
- Rothhardt, J.; S. Hädrich, J.C. Delagnes, E. Cormier, J. Limpert
High Average Power Near-Infrared Few-Cycle Lasers
 Laser & Photonics Reviews 11 (4) (2017) p. 1700043, ISSN 1863-8880
- Saravi, S.; A.N. Poddubny, T. Pertsch, F. Setzpfandt, A.A. Sukhorukov
Atom-mediated spontaneous parametric down-conversion in periodic waveguides
 Optics Letters 42 (22) (2017) p. 4724-4727, ISSN 0146-9592
- Saravi, S.; T. Pertsch, F. Setzpfandt
Generation of Counterpropagating Path-Entangled Photon Pairs in a Single Periodic Waveguide
 Physical Review Letters 118 (18) (2017) p. 183603, ISSN 0031-9007
- Saule, T.; S. Holzberger, O. De Vries, M. Plötner, J. Limpert, A. Tünnermann, I. Pupeza
Phase-stable, multi- μ J femtosecond pulses from a repetition-rate tunable Ti:Sa-oscillator-seeded Yb-fiber amplifier
 Applied Physics B-lasers and Optics 123 (1) (2017) p. 17, ISSN 0946-2171
- Schmidt, S.; S. Thiele, A. Herkommer, A. Tünnermann, H. Gross
Rotationally symmetric formulation of the wave propagation method-application to the straylight analysis of diffractive lenses
 Optics Letters 42 (8) (2017) p. 1612-1615, ISSN 0146-9592
- Schmidt, S.; T. Tiess, S. Schrotter, A. Schwuchow, M. Jager, H. Bartelt, A. Tünnermann, H. Gross
Noninvasive characterization of optical fibers
 Optics Letters 42 (23) (2017) p. 4946-4949, ISSN 0146-9592
- Schreiber, T.; A. Tünnermann, A. Thoss
High-power, single-mode fiber lasers advance
 Laser Focus World 53 (6) (2017) p. 37-42, ISSN 1043-8092
- Schwinde, S.; M. Schürmann, N. Kaiser, A. Tünnermann
Investigation of SiO₂-Al₂O₃ nanolaminates for protection of silver reflectors
 Applied Optics 56 (4) (2017) p. C41-C46, ISSN 1559-128X
- Seiboth, F.; A. Schropp, M. Scholz, F. Wittwer, C. Rodel, M. Wunsche, T. Ullsperger, S. Nolte, J. Rahomaki, K. Parfeniukas, S. Giakoumidis, U. Vogt, U. Wagner, C. Rau, U. Boesenberg, J. Garrevoet, G. Falkenberg, E
Perfect X-ray focusing via fitting corrective glasses to aberrated optics
 Nature Communications 8 (2017) p. 14623, ISSN 2041-1723
- Shcherbakov, M.R.; S. Liu, V.V. Zubyuk, A. Vaskin, P.P. Vabishchevich, G. Keeler, T. Pertsch, T.V. Dolgova, I. Staude, I. Brener, A.A. Fedyanin
Ultrafast all-optical tuning of direct-gap semiconductor metasurfaces.
 Nature communications 8 (1) (2017) p. 17, ISSN 2041-1723
- Shestaeva, S.; A. Bingel, P. Munzert, L. Ghazaryan, C. Patzig, A. Tünnermann, A. Szeghalmi
Mechanical, structural, and optical properties of PEALD metallic oxides for optical applications
 Applied Optics 56 (4) (2017) p. C47-C59, ISSN 1559-128X
- Shu, Z.; E. Beckert, R. Eberhardt, A. Tünnermann
ITO-free, inkjet-printed transparent organic light-emitting diodes with a single inkjet-printed Al:ZnO:PEI interlayer for sensing applications
 Journal of Materials Chemistry C 5 (44) (2017) p. 11590-11597, ISSN 2050-7526
- Shu, Z.; F. Kemper, E. Beckert, R. Eberhardt, A. Tünnermann
Highly sensitive on-chip fluorescence sensor with integrated fully solution processed organic light sources and detectors
 Rsc Advances 7 (2017) p. 26384 - 26391, ISSN 2046-2069

- Shu, Z.; F. Kemper, E. Beckert, R. Eberhardt, A. Tünnermann
ITO-Free, Fully Solution Processed Transparent Organic Light-Emitting Electrochemical Cells on Thin Glass
Materials Today-proceedings 4 (4) (2017) p. 5039-5044, ISSN 2214-7853
- Sinibaldi, A.; C. Sampaoli, N. Danz, P. Munzert, F. Sonntag, F. Centola, A. Occhicone, E. Tremante, P. Giacomini, F. Michelotti
Bloch Surface Waves Biosensors for High Sensitivity Detection of Soluble ERBB2 in a Complex Biological Environment
Biosensors 7 (3) (2017) p. 33, ISSN 2079-6374
- Sinibaldi, A.; C. Sampaoli, N. Danz, P. Munzert, L. Sibilio, F. Sonntag, A. Occhicone, E. Falvo, E. Tremante, P. Giacomini, F. Michelotti
Detection of soluble ERBB2 in breast cancer cell lysates using a combined label-free/fluorescence platform based on Bloch surface waves
BIOSENSORS & BIOELECTRONICS 92 (2017) p. 125-130, ISSN 0956-5663
- Stark, F.; M. Rosenberger, P.G. Dittrich, R. Celestre, M. Hänsel, G. Notni
Geometrical and spectral data stitching for combining hyperspectral imaging systems
At-automatisierungstechnik 65 (6) (2017) p. 381-395, ISSN 0178-2312
- Stark, H.; M. Müller, M. Kienel, A. Klenke, J. Limpert, A. Tünnermann
Electro-optically controlled divided-pulse amplification
Optics Express 25 (12) (2017) p. 13494-13503, ISSN 1094-4087
- Stenzel, O.; S. Wilbrandt, J. Wolf, M. Schürmann, N. Kaiser, D. Ristau, H. Ehlers, F. Carstens, S. Schippel, L. Mechold, R. Rauhut, M. Kennedy, M. Bischoff, T. Nowitzki, A. Zoller, H. Hagedorn, H. Reus, T. Hegeman
Investigation of the refractive index repeatability for tantalum pentoxide coatings, prepared by physical vapor film deposition techniques
Applied Optics 56 (4) (2017) p. C193-C200, ISSN 1559-128X
- Stenzel, O.;
Simplified expression for estimating the nonlinear refractive index of typical optical coating materials
Applied Optics 56 (4) (2017) p. C21-C23, ISSN 1559-128X
- Stock, J.; A. Brömel, J. Hartung, D. Ochse, H. Gross
Description and reimplementation of real freeform surfaces
Applied Optics 56 (3) (2017) p. 391-396, ISSN 1559-128X
- Stock, J.; N. G. Worku, H. Gross
Coherent field propagation between tilted planes
Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 34 (10) (2017) p. 1849-1855, ISSN 1084-7529
- Stützer, S.; A.S. Solntsev, S. Nolte, A.A. Sukhorukov, A. Szameit
Observation of Bloch oscillations with a threshold
Apl Photonics 2 (5) (2017) p. 051302, ISSN 2378-0967
- Tepper, J.; L. Labadie, R. Diener, S. Minardi, J.U. Pott, R. Thomson, S. Nolte
Integrated optics prototype beam combiner for long baseline interferometry in the L and M bands
Astronomy & Astrophysics 602 (2017) p. A66, ISSN 14320746
- Tugchin, B.N.; N. Janunts, M. Steinert, K. Dietrich, E.B. Kley, A. Tünnermann, T. Pertsch
Quasi-linearly polarized hybrid modes in tapered and metal-coated tips with circular apertures: understanding the functionality of aperture tips
New Journal of Physics 19 (2017) p. 063024, ISSN 1367-2630
- Ullsperger, T.; G. Matthäus, L. Kaden, H. Engelhardt, M. Rettenmayr, S. Risse, A. Tünnermann, S. Nolte
Selective laser melting of hypereutectic Al-Si40-powder using ultra-short laser pulses
Applied Physics A-materials Science & Processing 123 (12) (2017) p. 798, ISSN 0947-8396
- Weichelt, T.; Y. Bourgin, U.D. Zeitner
Mask aligner lithography using laser illumination for versatile pattern generation
Optics Express 25 (18) (2017) p. 20983-20992, ISSN 1094-4087
- Weimann, S.; M. Kremer, Y. Plotnik, Y. Lumer, S. Nolte, K.G. Makris, M. Segev, M.C. Rechtsman, A. Szameit
Topologically protected bound states in photonic parity-time-symmetric crystals
Nature Materials 16 (4) (2017) p. 433-438, ISSN 1476-1122

Wendler, E.; M. Bischoff, E. Schmidt, F. Schrepel, K. Ellmer,
M. Kanis, R. van de Krol

Ion beam modification of single crystalline BiVO_4

Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section
B-beam Interactions with Materials and Atoms 409 (2017) p.
133-137, ISSN 0168-583X

Zhang, J.; H. Wu, H. Jiao, S. Schröder, M. Trost, Z. Wang,
X. Cheng

**Reducing light scattering in high-reflection coatings
through destructive interference at fully correlated
interfaces**

Optics Letters 42 (23) (2017) p. 5046-5049, ISSN 0146-9592

Zhong, Y.; H. Gross

**Initial system design method for non-rotationally
symmetric systems based on Gaussian brackets and Nodal
aberration theory**

Optics Express 25 (9) (2017) p. 10016-10030, ISSN 1094-4087

Zimmermann, F.; M. Lancry, A. Plech, S. Richter, T. Ullsperger,
B. Poumellec, A. Tünnermann, S. Nolte

**Ultrashort pulse laser processing of silica at high repetiti-
on rates from network change to residual strain**

International Journal of Applied Glass Science 8 (2) (2017) p.
233-238, ISSN 2041-1286

IMPRESSUM IMPRINT

Herausgeber | Editor

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
Albert-Einstein-Straße 7
07745 Jena
Telefon +49 3641 807-0
info@iof.fraunhofer.de
www.iof.fraunhofer.de

Institutsleiter | Director

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Telefon +49 3641 807-201
andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de

Redaktion | Editorial staff

Dr. Kevin Füchsel
Dr. Stefan Riehemann
Walter Oppel
Dr. Falk Eilenberger
Annika Höft
Sylvia Bathke
Dr. Stephanie Hesse-Ertelt
Anne Groß
Lara Hartung
Bettina Puhlfürß
Franziska Ewald

Redaktionsschluss | Editorial deadline

31.03.2018

Gestaltung | Graphic design

Walter Oppel

Druck | Print

Förster & Borries GmbH & Co. KG
Industrierandstraße 23
08060 Zwickau
www.foebo.de

Bildnachweis | Photo Acknowledgements

Seite | page: 3: © Fotostudio Arlene Knipper
Seite | page: 18, 23, 24(2), 26(1), 38, 44(2), 46(2),
57, 59, 61, 63, 74:
© Die Autoren / the authors / Fraunhofer IOF
Seite | page: 20, 22, 24(1), 26(2), 28, 30, 85, 96:
© Michael Weimer / Fraunhofer IOF
Seite | page: 27, 32, 33, 55, 58, 69, 102:
© Christian Süß / Fraunhofer IOF
Seite | page: 85: © Bernd Müller / Fraunhofer
Seite | page: 90: © Jan-Peter Kasper / FSU
Seite | page: 92: © Kevin Füchsel / Fraunhofer IOF
Seite | page: 101: © Fraunhofer FEP
Seite | page: 102(3): © Fraunhofer ILT
Seite | page: 102(4): © Fraunhofer IST
Seite | page: 103(5): © Fraunhofer IPM
Seite | page: 103(6): © Fraunhofer IWS
Seite | page: 102(3): © Fraunhofer FEP
Seite | page: Titel / Cover, 4, 8, 12, 14, 16, 36(2), 40, 42,
44(1), 46(1), 48, 50, 52, 54, 56, 60, 62, 64, 66,
68, 69, 70, 72, 76, 78, 80, 82, 86, 88, 93:
© Walter Oppel / Fraunhofer IOF