

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2019**

A stylized sunburst or starburst graphic with several thin lines radiating from a central point, positioned behind the word 'photonics' in the title.

we love photonics

COVER *Tropfen auf dem Weg zur Analyse. Wir entwickeln das gedruckte Labor für die Hosentasche, damit Untersuchungen in der Medizin und anderen Lebenswissenschaften für alle schneller, genauer und günstiger werden. Unser Prototyp demonstriert wie der Transport der zu analysierenden Proben innerhalb des Mikrolabors von einem Detektor zum nächsten realisiert werden kann. Ziel ist es, die Funktionalität eines biochemischen Labors auf der Größe einer Chipkarte zu realisieren. |*

Drops on the way to analysis. We are currently developing the miniaturized laboratory so that health care and other life sciences will be faster, more accurate and cheaper for everyone. Our prototype shows how the fluid sample can be transported from one detector to the next within the printed laboratory. The aim is to release the functionality of a biochemical laboratory in the size of a chip card.

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2019**

VORWORT

PREFACE

Im vergangenen Jahr 2019 feierte die Fraunhofer-Gesellschaft ihr 70-jähriges Bestehen. Unter dem Motto »What's next?« schauten wir zurück auf die großen und kleinen Erfolge unseres Instituts und richteten zugleich unseren Blick auf die bedeutenden Fragen unserer heutigen Gesellschaft. Die globalen Herausforderungen der Zukunft, formuliert durch die Vereinten Nationen als »Ziele für nachhaltige Entwicklung«, werden zu umfassenden Veränderungen in vielen unserer vertrauten Arbeits- und Lebensbereiche führen. Mit der Weiterentwicklung unseres Instituts und der Fokussierung auf Zukunftsthemen schreiten wir entschlossen voran, um aktiv Lösungen für die Gesellschaft von morgen zu gestalten.

Mit der Vergabe des Physik-Nobelpreises an James Peebles, Michel Mayor und Didier Queloz für die Erforschung des Universums und die Entdeckung von Exoplaneten wurden erneut große Errungenschaften der Optik und Photonik gewürdigt. Erst leistungsfähige Teleskope und hochpräzise Spektrometer ermöglichen es, unser Universum mit noch nie dagewesener Genauigkeit zu vermessen und immer tiefergehender zu verstehen. Es erfüllt mich mit großem Stolz, dass unser Institut über vielfältige Projekte an der Erforschung der Erde und unseres Sonnensystems beteiligt ist. Nach der Inbetriebnahme des Erdbeobachtungsinstruments DESIS im Jahr 2018 konnte das abbildende Spektrometer 2019 erfolgreich den Regelbetrieb aufnehmen. Das in unserem Haus gefertigte optische System liefert fortan hochaufgelöste hyperspektrale Bilder der Erdoberfläche, die für Umweltschutz, Landwirtschaft und Wissenschaft von essentieller Bedeutung sind. Für den ausdauernden Einsatz und die große Kreativität in der Umsetzung solch visionärer und herausfordernder Vorhaben danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unseres Instituts herzlich.

Photonische Quantentechnologien sind eine der wesentlichen Schlüsseltechnologien der Zukunft. Die zweite Quantenrevolution verspricht neuartige Ansätze für die sichere Kommunika-

In 2019 the Fraunhofer-Gesellschaft celebrated its 70th anniversary. Under the slogan "What's next?", we looked back on the great and small achievements of our institute and at the same time focused our attention on the important issues facing our society today. The global challenges of the future, described by the United Nations as Sustainable Development Goals, will lead to comprehensive changes in many of our familiar areas of work and life. As we continue to develop our institute and focus on issues of the future, we are taking important steps to actively shape solutions for the society of tomorrow.

With the awarding of the Nobel Prize in Physics to James Peebles, Michel Mayor, and Didier Queloz for their exploration of the universe and the discovery of exoplanets, great achievements in optics and photonics have been appreciated once again. In particular, powerful telescopes and high-precision spectrometers make it possible to measure our universe with unprecedented accuracy and to understand it in ever greater depth. It fills me with great pride that our institute is involved in the exploration of the Earth and our solar system through a variety of projects. After the initial commissioning of the Earth observation instrument DESIS in 2018, the imaging spectrometer successfully went into regular operation in 2019. From now on, the optical system developed at our institute will provide high-resolution hyperspectral images of the Earth's surface, which are essential for environmental protection, agriculture, and science. I would like to express my sincere thanks to all employees of our institute for their persistent commitment and great creativity in the implementation of such visionary and challenging projects.

Photonic quantum technologies are one of the essential key technologies of the future. The second quantum revolution promises novel approaches for safe communication and information interchange, access to exotic wavelength ranges, and the development of innovative imaging methods. As



tion und Übertragung von Informationen, das Nutzbarmachen exotischer Wellenlängenbereiche und die Entwicklung innovativer Verfahren für die Bildgebung. In vielgestaltigen Vorhaben, wie der BMBF-Initiative »QuNET«, dem EU-Projekt »AQTION« und den »Quantum Photonics Labs QPL«, entwickeln wir gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft innovative quantenoptische Technologien und Anwendungen. Auch über vielfältige Initiativen und Forschungsvorhaben, wie das Leitprojekt »EVOLOPRO«, das Fraunhofer »Cluster of Excellence Advanced Photon Sources CAPS« und die Wachstumskerne »Tailored Optical Fibers« und »Freeform Optics Plus«, konnten unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Exzellenz unseres Leistungszentrums Photonik stetig ausbauen. Ihre Forschungsergebnisse fanden international große Anerkennung: Dr. Stefan Heist erhielt für seine Arbeiten zur optischen Messtechnik den SPIE »Rising Researcher Award«, Dr. César Jáuregui-Misas ein Heisenberg-Stipendium als Auszeichnung seiner Beiträge in Wissenschaft und Lehre. Der European Research Council zeichnete Prof. Jens Limpert mit einem »ERC Advanced Grant« aus und fördert hiermit die Entwicklung eines Hochleistungsfaserlasersystems zur Erzeugung kohärenter Laserpulse im Infrarot-, Terahertz- und weichen Röntgenbereich. Auf internationalen Messen und Konferenzen wurden zahlreiche unserer Beiträge mit »Best Paper Awards« ausgezeichnet. Ich gratuliere zu diesen herausragenden Erfolgen und danke allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern für ihre beeindruckenden Leistungen.

Im vergangenen Jahr konnte unser Institut erneut seine öffentliche Wahrnehmung als exzellente Forschungseinrichtung festigen. Mit der feierlichen Eröffnung der Max Planck Schools durch Bundesforschungsministerin Anja Karliczek ist die »Max Planck School of Photonics« erfolgreich in die Umsetzung gestartet. Sie wird zukünftig international herausragende Nachwuchsforschende einwerben und in den Bereichen Optik und Photonik zur Promotion führen. Ebenso standen die »Photonics Days 2019« ganz im Fokus des wissenschaftlichen Nachwuchses: Keynote-Vorträge des

part of diverse projects, such as the BMBF »QuNET« initiative, the EU »AQTION« project, and the »Quantum Photonics Labs« (QPL), we are developing innovative quantum optical technologies and applications in cooperation with partners from science and industry. Moreover, our scientists have been able to expand steadily the expertise of our Center of Excellence in Photonics through a variety of initiatives and research projects, such as the »EVOLOPRO« lighthouse project, the Fraunhofer »Cluster of Excellence Advanced Photon Sources« (CAPS), and the »Tailored Optical Fibers« growth cores and »Freeform Optics Plus«. Their research results have received great international recognition: Dr. Stefan Heist received the SPIE »Rising Researcher Award« for his work on optical metrology and Dr. César Jáuregui-Misas received a Heisenberg scholarship in recognition of his contributions to science and teaching. The European Research Council awarded Prof. Jens Limpert with an ERC Advanced Grant supporting the development of a high-power fiber laser system for the generation of coherent laser pulses in the infrared, terahertz, and soft X-ray ranges. Additionally, many of our contributions have been honored with the »Best Paper Awards« at international exhibitions and conferences. I congratulate these outstanding results and thank all scientists for their impressive achievements.

In the past year, our institute was able to extend its public perception once again as an excellent research institution. With the opening of the Max Planck Schools by Federal Minister of Education and Research, Anja Karliczek, the »Max Planck School of Photonics« has started on the right foot. In the future, it will attract internationally outstanding young scientists and lead them to doctorates in the fields of optics and photonics. »Photonics Days 2019« also focused on junior researchers: keynote speeches by ZEISS CEO, Prof. Michael Kaschke, and Nobel Prize winner Prof. Gérard Mourou, a variety of workshops and elevator pitches, as well as the conferring of the Applied Photonics Awards, provided a great stage for exchange for people from industry, science, and

LÖSUNGEN MIT LICHT SOLUTIONS WITH LIGHT

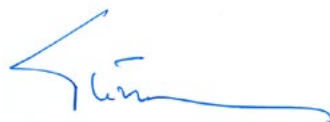


ZEISS-Vorstandsvorsitzenden Prof. Michael Kaschke und des Physik-Nobelpreisträgers Prof. Gérard Mourou, vielfältige Workshops und Elevator-Pitches sowie die Verleihung der Applied Photonics Awards boten eine großartige Plattform des Austauschs für Interessierte aus Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft. Mit der Startup-Plattform »Digital Innovation Hub Photonics« bieten wir Gründerinnen und Gründern beste Bedingungen und Unterstützung für die erfolgreiche Umsetzung ihrer innovativen Geschäftsideen. Auch bei der »Langen Nacht der Wissenschaften« zählte das Fraunhofer IOF wieder zu den Besuchermagneten am Beutenberg Campus: Über eintausend kleine und große Gäste kamen in das Fraunhofer IOF und das Institut für Angewandte Physik und gewannen spannende Einblicke in die Welt der Optik und Photonik. Ich freue mich außerordentlich über die unzähligen positiven Rückmeldungen und möchte allen Unterstützerinnen und Unterstützern meinen großen Dank aussprechen!

Mit der Entwicklung einer neuen Geschäftsstruktur für unser Institut, dem Spatenstich zum dritten Bauabschnitt für weitere Labor- und Büroflächen und der Reaktivierung unseres traditionsvollen »Eulenhauses«, sowie dem Ausbau unserer Aktivitäten am Erfurter Projektzentrum MEOS stellen wir die Weichen für die zukunftsfähige strategische Ausrichtung des Fraunhofer IOF. Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, Partnereinrichtungen, Unternehmen sowie Stiftungen und Förderern für die umfassende Unterstützung in der Umsetzung der zahlreichen Vorhaben. Mit vielfältigen, kreativen und visionären Projekten wollen wir weiterhin großen Herausforderungen entgegentreten und im engen Austausch mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft innovative Lösungen für die großen Fragestellungen der Gesellschaft gestalten.

society. With the "Digital Innovation Hub Photonics" start-up platform, we offer founders the best conditions and support for the successful implementation of their innovative business ideas. During the "Long Night of Sciences", the Fraunhofer IOF was once again one of the magnets for visitors at the Beutenberg Campus: more than one thousand young and old guests came to the Fraunhofer IOF and the Institute of Applied Physics and gained exciting insights into the world of optics and photonics. I am highly delighted about the innumerable positive feedback and would like to express my sincere thanks to all supporters!

With the development of a new business structure for our institute, the ground-breaking ceremony for the third building section for additional laboratory and office space, the reopening of our traditional "Eulenhaus", and the expansion of our activities at the project center MEOS in Erfurt, we are setting the course for the sustainable strategic orientation of the Fraunhofer IOF. My sincere gratitude goes to all employees, partner institutions, companies, foundations, and funders for their comprehensive support in the implementation of the numerous projects. With creative and visionary projects and in close collaboration with our partners from science and industry, we will continue to face great challenges and design innovative solutions for essential issues of our society.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Leiter des Fraunhofer IOF | Director of the Fraunhofer IOF

LEFT *Neuer Forschungsbau für das Fraunhofer IOF: Hoher Besuch bei Spatenstich zum 3. Bauabschnitt am 29. Mai 2019. | First cut of the spade for the new research building of the Fraunhofer IOF.*

INHALT

Das Institut im Profil	8
Ausgewählte Forschungsergebnisse 2019	14
Optische Systeme für Weltraumforschung	16
Optische und feinmechanische Komponenten und Systeme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	18
Kompakte Multispektralkamera mit lateral strukturiertem Filter-Array	20
Kompakte Quantenbildgebung mit nicht-detektierten Photonen	22
AQTION – Adressieroptik für Quantencomputer	24
Photonenquellen für hochdimensionale Quantenkommunikation	26
Deformierbare Spiegel zur hochdynamischen Strahloszillation	28
Beugungsgitter für die Sentinel-5 NIR Spektrometer Optik	30
Resonante Subwellenlängenstrukturen für hochreflektive Spiegel	32
Additive Fertigung metalloptischer Systeme	34
Ameisenstaat – Optikdesignoptimierung	36
Funktionale Oberflächen und Schichten – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	38
HFO ₂ und SiO ₂ ALD-Schichten für Laseranwendungen	40
AR-plas® zur Entspiegelung 3D-gedruckter Hybridpolymere	42
Hochreflektierende, streulichtarme VUV-Reflektorschichten	44
Optische Eigenschaften ultradünner Aufdampf-Metallschichten	46
Photonische Sensoren und Messsysteme – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	48
Streulichtmesssysteme nach Maß	50
Highspeed-3D-Sensor für die Innenraumerfassung in Crashtests	52
Hochgeschwindigkeits-3D-Thermographie	54
3D-Scan von Tatortspuren und Kulturgütern vor Ort	56
Musik aus Körperbewegungen – ein therapeutischer 3D-Scanner	58
Array von integrierten Mikrospektrometern	60
Messvorrichtung für doppelseitige optische Freiformelemente	62
Lasertechnik – wissenschaftliche Ergebnisse aus dem Geschäftsfeld	64
Grundlegende Entwicklungen zur Technologie für Hochleistungsfaserlaser	66
> 1 kW Ultrakurzpuls laser basierend auf Tm-dotierten Fasern	68
Selektive spektrale Filterung durch komplexe Gitter in Fasern	70
Strategische Projekte des Fraunhofer IOF	72
Das Institut in Zahlen	90
Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces und die Fraunhofer-Gesellschaft	92
Namen, Daten, Ereignisse	98

CONTENT

Profile of the institute	8
Selected results 2019	14
Optical systems for space projects	16
Optical and precision engineering components and systems – scientific results from the business field	18
Compact multispectral camera with lateral structured filter-array	20
Compact quantum imaging with undetected photons	22
AQTION – addressing optics for a quantum computer	24
Photon sources for high-dimensional quantum communication	26
Deformable mirrors for highly dynamic beam oscillation	28
Grating for the Sentinel-5 NIR spectrometer optic	30
Resonant sub-wavelength structures for highly reflective mirrors	32
Additive manufacturing of metal optics and systems	34
Ant colony optimization in lens design	36
Functional surfaces and layers – scientific results from the business field	38
HFO ₂ and SiO ₂ ALD coatings for laser applications	40
AR-plas® antireflection of 3D-printed hybrid polymers	42
High-reflective, low-scatter VUV reflector layers	44
Optical properties of ultrathin evaporated metal films	46
Photonic sensors and measuring systems – scientific results from the business field	48
Customized light scattering tools for every application	50
High-speed 3D sensor for interior detection in crash tests	52
High-speed 3D thermography	54
On-site 3D scanning of crime traces and cultural heritage	56
From body movement to music – 3D-scanning for therapeutics	58
Integrated micro spectrometer array	60
Measurement equipment for twosided freeform optical elements	62
Laser technology – scientific results from the business field	64
Fundamental developments in technology for high-performance fiber lasers	66
> 1 kW ultrafast laser based on Tm-doped fibers	68
Selective spectral filtering through complex gratings in fibers	70
Strategic projects of the Fraunhofer IOF	72
The institute in figures	90
Fraunhofer Group Light & Surfaces and Fraunhofer-Gesellschaft	92
Names, dates, activities	98



DAS INSTITUT IM PROFIL

PROFILE OF THE INSTITUTE

Das Fraunhofer IOF betreibt anwendungsorientierte Forschung auf dem Gebiet der Photonik und entwickelt innovative optische Systeme zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zu deren Anwendung. Das Leistungsangebot des Instituts umfasst die gesamte photonische Prozesskette vom optomechanischen und optoelektronischen Systemdesign bis zur Herstellung von kundenspezifischen Lösungen und Prototypen. Forschungsschwerpunkte sind unter anderem Freiformtechnologien, Mikro- und Nanotechnologien, Faserlasersysteme, quantenoptische Systeme sowie optische Technologien für die sichere Mensch-Maschine-Interaktion.

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 komplexen Systemlösungen für unsere Kunden. Im Abschnitt der wissenschaftlichen Beiträge werden ausgewählte Forschungsinhalte der einzelnen Geschäftsfelder vorgestellt.

Fraunhofer IOF conducts applied research in the field of photonics and develops innovative optical systems to control light – from generation and manipulation to its application. The services offered by the institute cover the entire photonic process chain from optomechanical and optoelectronic system design to the manufacturing of custom-specific solutions and prototypes. Current focuses of our research activities include freeform technologies, micro- and nanotechnologies, fiber laser systems, quantum optical systems, and optical technologies for safe human-machine-interaction.

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, knowledge transfers, and spin-off ventures. At the same time, Fraunhofer IOF is both national and international in its orientation and maintains a network of partners in Europe, North America, and Asia. 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 complex system solutions for customers. The business fields at Fraunhofer IOF are separately presented and described in the 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. Hierfür stehen umfangreiche Design- und Modellierungswerkzeuge zur Verfügung.

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. Diese Materialien werden unter anderem im Zentrum für Innovationskompetenz »ultra optics®« erforscht.

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 sowie in der Charakterisierung von Oberflächen und Schichten.

Ultrapräzisionsbearbeitung

Das Fraunhofer IOF stellt mittels Ultrapräzisionsbearbeitung Metallspiegel, Gitter, kunststoffbasierte Linsen und Linsen-Arrays her. Eingesetzt werden Diamantwerkzeuge zur Bearbeitung von Metall-, Kristall- und Kunststoffoptiken für die Anwendung im Wellenlängenbereich von 14 μm bis 13,5 nm.

Design and simulation

The core area of expertise and the basis of all development at Fraunhofer IOF is optical and mechanical design as well as the simulation and analysis of optical and optomechanical systems, including thermal and thermo-optical effects. Wide-ranging design and modelling tools are available.

Micro- and nanostructuring

The generation and replication of optical micro- and nanostructures are the 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 the highest resolution on substrates up to 12".

Optics and photonics materials

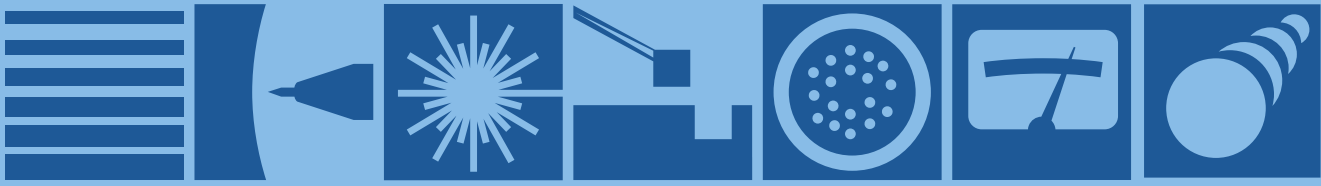
Nanostructure technology enables the development of new materials for optics and photonics, such as photonic crystals and metamaterials. The investigation of these materials is carried out at the Center for Innovation Competence "ultra optics®".

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

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.



Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung

Ultrakurzpulslaser mit Pulsdauern von wenigen Piko- oder Femtosekunden besitzen hohes Einsatzpotenzial zur hochpräzisen Strukturierung verschiedener Materialien. Aufgrund der kurzen Energiedeposition 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 Integration komplexer optomechanischer und optoelektronischer Mikro- und Makrosysteme. Dies umfasst Montagetechnologien (Positionieren, Justieren), Fügetechnologien (Kleben, Laserlöten, Plasmabonden, Laserspleißen, Justierdrehen) und die Systemintegration.

Laserentwicklung und nichtlineare Optik

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

Messverfahren und Charakterisierung

Das Fraunhofer IOF entwickelt optische Messverfahren und -systeme nach kundenspezifischen Anforderungen. Schwerpunkte sind die 3D-Formerkennung sowie die Charakterisierung optischer und nicht-optischer Oberflächen, Schichten, Komponenten und Systemen im Mikrometer- und Subnanometerbereich.

Optische Quantentechnologie

Das Fraunhofer IOF ist ein Pionier in der angewandten Forschung zur optischen Quantentechnologie. Entwickelt werden aktuell abhörsicherer Komponenten für die Quantenkommunikation, Quantenabbildungssysteme und Ionenfallen für Quantencomputer. Das Fraunhofer IOF integriert, optimiert, miniaturisiert und realisiert quantentechnologische Systeme.

Materials processing using ultrashort laser pulses

Ultrashort pulse lasers with pulse durations of a few pico- 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

Fraunhofer IOF has extensive expertise in the integration 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 system integration.

Laser development and non-linear optics

For the development of high-power fiber lasers with diffraction-limited beam quality, Fraunhofer IOF has expertise in fiber design, optics design, 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

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

Optical quantum technologies

Fraunhofer IOF is a pioneer in applied research on optical quantum technology. Developments in tap-proof quantum communication, low-noise quantum imaging systems, or ion traps for quantum computers are currently in focus. The Fraunhofer IOF integrates, optimizes, miniaturizes, and realizes quantum technology systems.

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 Fücksel

BUSINESS FIELDS



**Optical components
and systems**
Prof. Dr. Uwe Detlef
Zeitner



**Precision engineering
components and
systems**
Dr. Ramona
Eberhardt



**Functional optical
surfaces and layers**
Dr. Sven
Schröder



**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



Materials for optics
and photonics
Prof. Dr. Thomas
Pertsch

TOF – Tailored
optical fibers

Dr. Ramona
Eberhardt



VORSITZENDER | CHAIR

- Dr. Michael Mertin | CeramTech Gruppe, Plochingen

MITGLIEDER | MEMBERS

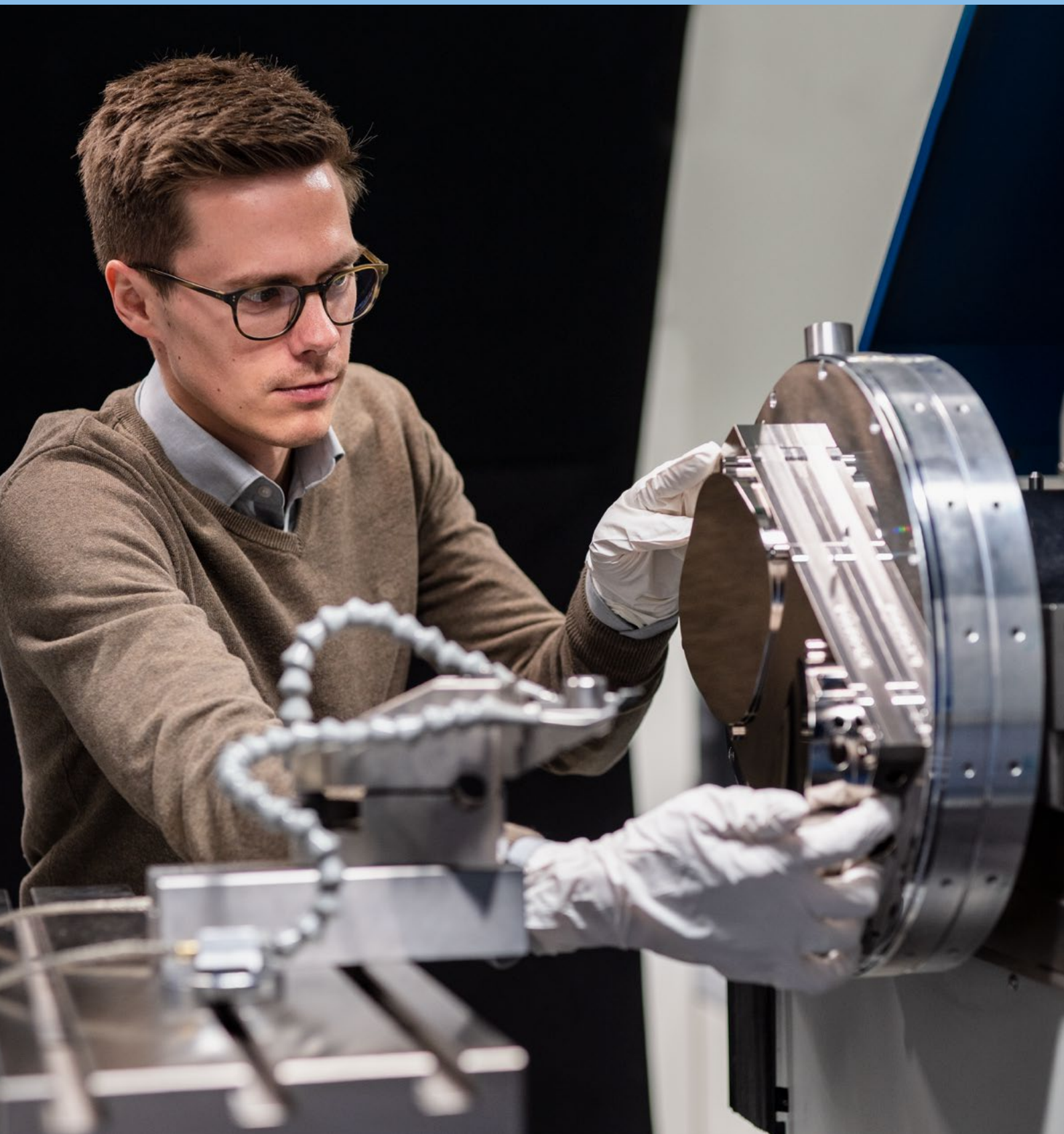
- Christian Amann | BMW Group, München
- Dr. Klaus Bartholmé | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena
- Petra Bogdanski | Mahr GmbH, Jena
- Robert Fetter | Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft, Erfurt
- Gabi Grützner | micro resist technology GmbH, Berlin
- Dr. Roland Langfeld | Schott AG, Mainz
- Manfred Lieke | Airbus Defence & Space, 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. Werner Wilke | VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

EHRENMITGLIEDER | HONORARY MEMBERS

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

AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2019

SELECTED RESULTS 2019



Das Fraunhofer IOF betreibt seit 1992 anwendungsorientierte Forschung und hat sich in den vergangenen 27 Jahren als eine weltweit führende Forschungseinrichtung für Photonik und optische Systemtechnik etabliert. Gemeinsam mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (IAP), das Grundlagenforschung im Bereich der Optik und Photonik betreibt, bilden beide Forschungsinstitute ein gemeinsames Leistungszentrum für Photonik. Es verknüpft die herausragenden und komplementären Kompetenzen in den Bereichen Lasertechnologie, Freiformoptik, Mikro- und Nanooptik, optische Sensorik und Quantentechnologie und fördert hierdurch die einrichtungsübergreifende Entwicklung innovativer Lösungen mit Licht – von der ersten Idee bis zur Integration in das finale Produkt. Kunden und Forschungspartnern kann so bei Bedarf die komplette Prozesskette – von der Grundlagenforschung und anwendungsorientierten Forschung bis hin zur Realisierung der finalen Anwendung – angeboten werden.

Die enge Verbindung beider Institute schafft die ideale Umgebung, um bahnbrechende und zukunftsweisende Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Photonik zu realisieren. Die Vielzahl an exzellenten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und die hervorragende technische Ausstattung gebündelt am Standort Jena, verschaffen unseren Kunden und Forschungspartnern einen klaren Wettbewerbsvorteil bei der Verwirklichung von innovativen optischen Technologien und herausragenden Projekten – bspw. komplexe Komponenten für verschiedene Missionen zur satellitengestützten Erkundung unseres Sonnensystems oder Systeme zur Qualitätskontrolle im laufenden Fertigungsprozess in Industrieanlagen.

Nachfolgend präsentieren wir einige ausgewählte wissenschaftliche Ergebnisse aus 2019. Die ausgewählten Fachbeiträge stehen dabei exemplarisch für die Bandbreite unserer Forschung auf dem Gebiet Optik und Photonik. Sie geben auch einen Einblick in die Aktivitäten der Geschäftsfelder des Fraunhofer IOF.

Since 1992, Fraunhofer IOF has been conducting application-oriented research and, over the past 27 years, has established itself as one of the world's leading research institutions for photonics and optical systems technology. Together with the Institute of Applied Physics of the Friedrich Schiller University Jena (IAP), which conducts basic research in the field of optics and photonics, both jointly form the Center of Excellence in Photonics. The center combines the outstanding and complementary competences in the fields of laser technology, freeform optics, micro- and nano-optics, optical sensor technology, and quantum technology, thus promoting the development of innovative solutions with light – from the initial idea to integration into the final product. Customers and research partners, therefore, can be offered the complete process chain – from basic and application-oriented research to the realization of the final application.

The close connection of both institutes creates an ideal environment to realize groundbreaking and future-oriented research projects in the field of photonics. The large number of excellent scientists and the outstanding technical equipment bundled in Jena grant our customers and research partners a clear competitive advantage in the realization of innovative optical technologies and projects – e. g. complex components for various missions for satellite-supported exploration of our solar system or systems for quality control in the ongoing manufacturing process in industrial plants.

In the following, we present a selection of scientific results from 2019. The selected contributions are exemplary for the range of our research in the field of optics and photonics. They also provide an insight into the activities of Fraunhofer IOF's business fields.

LEFT *Ultrapräzise Bearbeitungsmaschine für Freiformoptiken. |*
Ultra-precise processing machine for freeform optics.



OPTISCHE SYSTEME FÜR WELTRAUMFORSCHUNG OPTICAL SYSTEMS FOR SPACE PROJECTS

Das Fraunhofer IOF verfügt über vielfältige Kompetenzen, um auf dem Gebiet der Raumfahrt und Astronomie neue innovative Lösungen zu generieren. Mit seiner Mitgliedschaft in der Fraunhofer-Allianz Space steht dem Institut ein schlagkräftiges Netzwerk an Partnern zur Verfügung. Mit der Forschergruppe SpaceOptics ist zudem ein eigenes Spezialistenteam zur Entwicklung von Fügetechniken für spektroskopische Weltraumanwendungen ins Leben gerufen worden.

Seine Expertise in der Entwicklung von Optiken und optischen Systemen für die Weltraumforschung hat das Fraunhofer IOF in diesem Jahr u. a. in folgenden Projekten erfolgreich unter Beweis gestellt:

EXOMARS

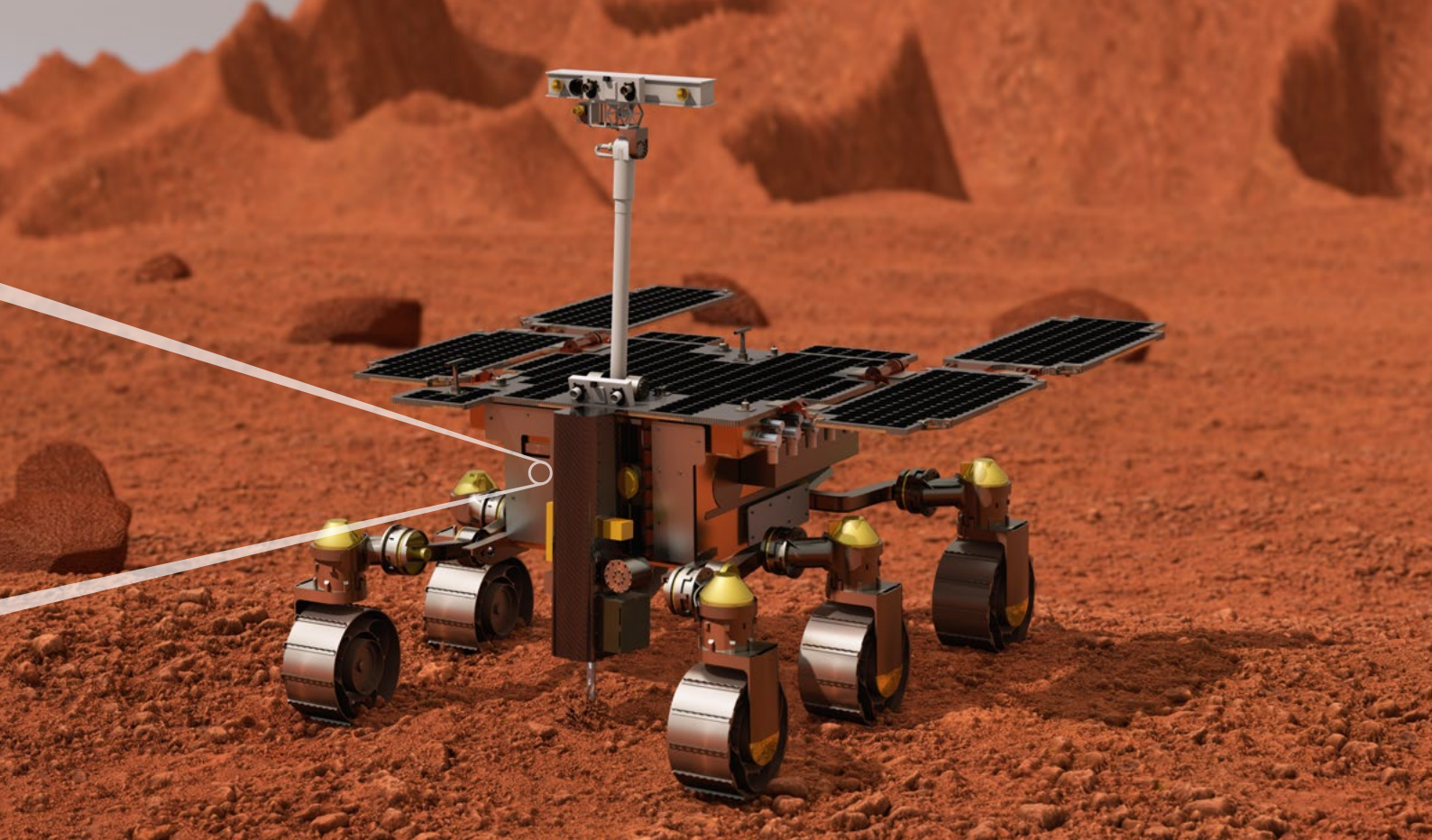
Gibt es Leben auf dem Mars? Um die Geheimnisse des roten Planeten zu lüften, startet im Sommer 2020 die ESA-Mission »ExoMars«. Die Mission hat das Ziel, die Marsoberfläche auf ihre mineralogische Zusammensetzung hin zu untersuchen und somit biologische Aktivitäten auf dem Mars nachzuweisen.

The Fraunhofer IOF has a wide range of competences to generate new innovative solutions in the field of space research and astronomy. With its membership in the Fraunhofer Alliance Space, the institute has a powerful network of partners at its disposal. With the SpaceOptics research group, a separate team of specialists for the development of joining techniques for spectroscopic space applications has also been established.

Fraunhofer IOF has successfully demonstrated its expertise in the development of optics and optical systems for space research in the following projects:

EXOMARS

Is there life on Mars? To unravel the mysteries of the red planet, ESA's ExoMars mission will be launched in summer 2020. The aim of the mission is to examine the Martian surface for its mineralogical composition and, thus, detect biological activities on Mars. For this purpose, a diode-pumped, green solid-state laser has been developed at Fraunhofer IOF. It is installed in the rover as part of a



Dazu wurde am Fraunhofer IOF ein diodengepumpter, grüner Festkörperlaser entwickelt. Dieser ist als Teil eines Raman-Spektrometers im Rover verbaut. Die Aufgabe: Das vom Laser ausgesendete Licht wird von der Atmosphäre oder Gesteinsproben an das Spektrometer zurückgestreut, analysiert und auf seine Zusammensetzung untersucht.

CRIRES

Weiter Blick in die Ferne: Die sogenannte »In-Transit-Spektroskopie« bietet derzeit die einzige Möglichkeit, exoplanetare Atmosphären zu untersuchen. Für das Projekt »CRIRES« wurden am Fraunhofer IOF Spiegel entwickelt, die dank einer speziellen Goldlegierung besonders viel Sternenlicht reflektieren. Dafür kam ein eigens am Fraunhofer IOF entwickeltes Polierverfahren zum Einsatz.

Der Spektrograf »CRIRES« wird zukünftig vom Paranal-Observatorium der Europäischen Südsternwarte (Chile) Aufnahmen von Exoplaneten liefern. Das Instrument wurde gemeinsam mit der Thüringer Landessternwarte Tautenburg entwickelt.

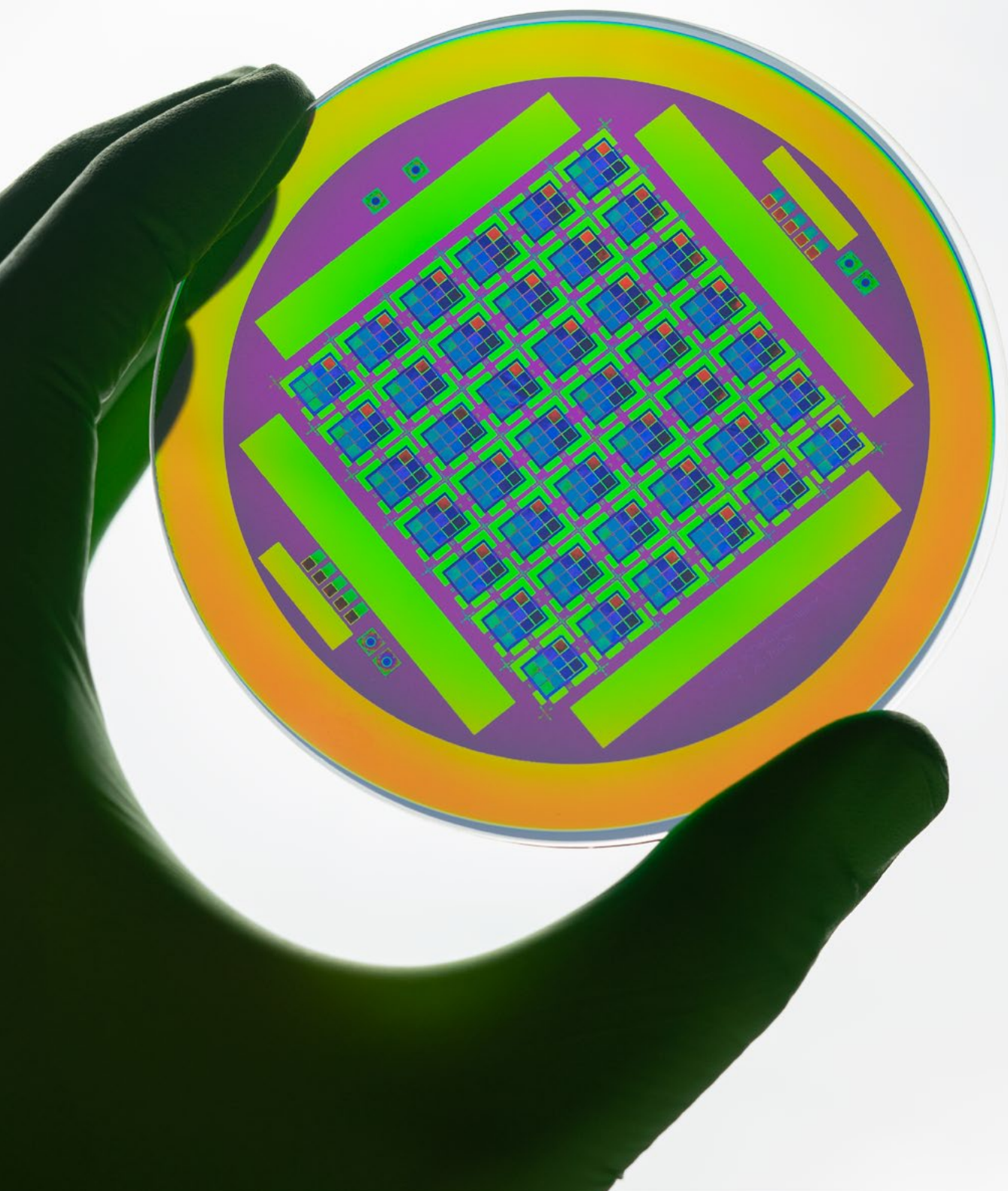
Raman spectrometer. The task: light emitted by the laser is scattered back to the spectrometer from the atmosphere or rock samples, analyzed and examined for its composition.

CRIRES

A far-reaching view into the distance: "in-transit spectroscopy" currently offers the only possibility of studying exoplanetary atmospheres. For the "CRIRES" project, mirrors were developed at Fraunhofer IOF that reflect a particularly large amount of starlight thanks to a special gold alloy. A polishing process developed at Fraunhofer IOF was used for this purpose. The "CRIRES" spectrograph will provide images of exoplanets from the Paranal Observatory of the European Southern Observatory (Chile) in the future. The instrument was developed together with the Thuringian State Observatory Tautenburg.

TOP *Diodengepumptes Festkörperlasermodul (DPSSL) für die ExoMars Mission. | Diode-pumped solid-state laser module (DPSSL) for the ExoMars mission.*

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



OPTISCHE UND FEINMECHANISCHE SYSTEME

OPTICAL AND PRECISION ENGINEERING SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF entwickelt kundenspezifische optische, mikrooptische und feinmechanische Komponenten und Systeme. 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. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist die Beherrschung der kompletten photonischen Prozesskette – vom Design und der Simulation über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung.

So werden unter anderem sphärische, asphärische und freiformoptische Komponenten und Systeme für Objektive, Teleskope und Spektrometer – auch für extreme Anforderungen in der Raumfahrt – entwickelt und gefertigt. Ebenso werden refraktive, diffraktive, faseroptische und quantenoptische Komponenten, Gitter, Mikrolinsen-Arrays bis hin zu Faserlaser hergestellt. Die Fertigung von mechanischen Baugruppen und Maschinen für verschiedene Anwendungen rundet das Portfolio ab.

Die nachfolgenden Beiträge zeigen die in diesem Geschäftsfeld in 2019 abgeschlossenen Projekte. Bearbeitet wurden unter anderem Themen wie Multispektralkameras in kompakter Bauweise, Quantenbildgebung und -kommunikation, Optiken für Quantencomputer, Beugungsgitter für Weltraumanwendungen, als auch additiv gefertigte Optiken.

Fraunhofer IOF develops customer-specific optical, micro-optical, and precision mechanical components and systems. The combination of precision engineering and optics is a unique, strategic selling point of Fraunhofer IOF within the German and European research landscape and continues the tradition of Jena as one of the leading optical locations. Another unique selling point is the mastery of the entire photonic process chain - from design and simulation to manufacturing and characterization.

Among other things, spherical, aspherical, and free-form optical components and systems for lenses, telescopes, and spectrometers - even for extreme requirements in space travel - are developed and manufactured. Refractive, diffractive, fiber optic, and quantum optical components, gratings, microlens arrays, and even fiber lasers are also manufactured. The production of mechanical assemblies and machines for various applications completes the portfolio.

The following articles show the projects completed in this business field in 2019. Among other things, topics such as multi-spectral cameras in a compact design, quantum imaging and communication, optics for quantum computers, diffraction gratings for space applications, and additively manufactured optics were investigated.

LEFT *Prozessierter Wafer mit 42 Filterkachelarrays für die kompakte Multispektralkamera. | Processed wafer with 42 filter tile arrays for the compact multispectral camera.*



KOMPAKTE MULTISPEKTRALKAMERA MIT LATERAL STRUKTURIERTEM FILTER-ARRAY

COMPACT MULTISPECTRAL CAMERA WITH LATERAL STRUCTURED FILTER-ARRAY

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 zunehmender 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.

Im Rahmen eines Eigenforschungsprojekts wurde hierfür am Fraunhofer IOF ein neuartiger Arrayfilter entwickelt, welcher in Kombination mit einem mikrooptischen Multiapertur-Objektiv die Realisierung einer ultrakompakten Multispektralkamera ermöglicht. Dabei wird, durch eine Array-Anordnung von zwölf individuellen Spektralkanälen, eine parallelisierte Detektion in Echtzeit ermöglicht. Herzstück des neuartigen Kamerademonstrators ist ein monolithisches Filter-Array bestehend aus 4 x 3 ausgedehnten Filterkacheln. Es handelt sich dabei um einen speziellen Fabry-Pérot-Filter, welcher durch eine Kombination von Grautonlithographie und eines Trockenätzprozesses lateral strukturiert wird. Durch die

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

Within an internal research project at Fraunhofer IOF, a novel array-filter architecture was developed, which is used in combination with a micro-optical multi-aperture objective to establish/arrange an ultra-compact multispectral imaging system. Due to the array architecture of twelve individual spectral channels, parallelized real-time detection is possible. The centerpiece of the new imaging system is the monolithic filter-array consisting of 4 x 3 extended filter tiles. These customized Fabry-Pérot-filters are structured laterally through a combination of grayscale lithography and dry etching. The independent choice of the transmission band for each filter was enabled by the high flexibility of the Fraunhofer IOF's own grayscale lithographic system,

1 Kamera-Demonstrator für multispektrale Bildaufnahmen. |

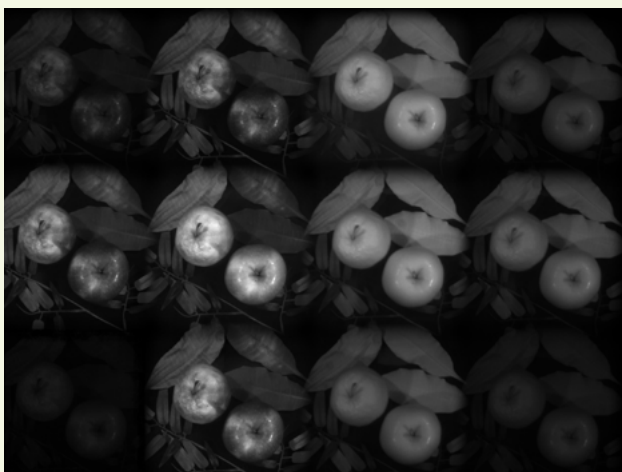
Demonstration system with 4 x 3 filter array for multispectral imaging.

hohe Flexibilität des Lithographie-Systems »HighFive« vom Fraunhofer IOF lässt sich dabei für jede Kachel das Transmissionsfenster individuell festlegen. Mittels einer durchgehend im Wafer-Level-Maßstab basierenden Prozesskette lassen sich eine Vielzahl von Filter-Arrays parallel herstellen.

Die auf Basis der neuartigen Filter umgesetzte Multispektralkamera besitzt eine räumliche Auflösung von 610 x 610 Pixeln pro Kanal bei einem Gesichtsfeld von 32°. Die zwölf Spektralbänder lassen sich individuell in einem Bereich von 500 bis 950 nm auswählen und besitzen eine typische Bandbreite von 20 bis 30 nm. Eine Rekonstruktion des kompletten multispektralen Datenwürfels erfolgt anschließend durch eine Überlagerung der Einzelkanäle basierend auf einer spektralen Kalibrierung jedes Pixels sowie einer räumlichen Kalibrierung der relativen Einzelbildkoordinaten.

»HighFive«. Additionally, the complete wafer-scale technology chain enables the fabrication of several filter arrays in parallel.

Based on this novel filter element, a multispectral camera system was designed with a spatial resolution of 610 x 610 pixels per channel and a field of view of 32°. The twelve spectral bands can be chosen individually within 500 to 950 nm and show typical spectral bandwidths of about 20 to 30 nm. After a spectral calibration of each pixel and a spatial calibration between the intrinsic parameters of the individual channels, a superposition of all channels is performed to reconstruct the final multispectral cube.



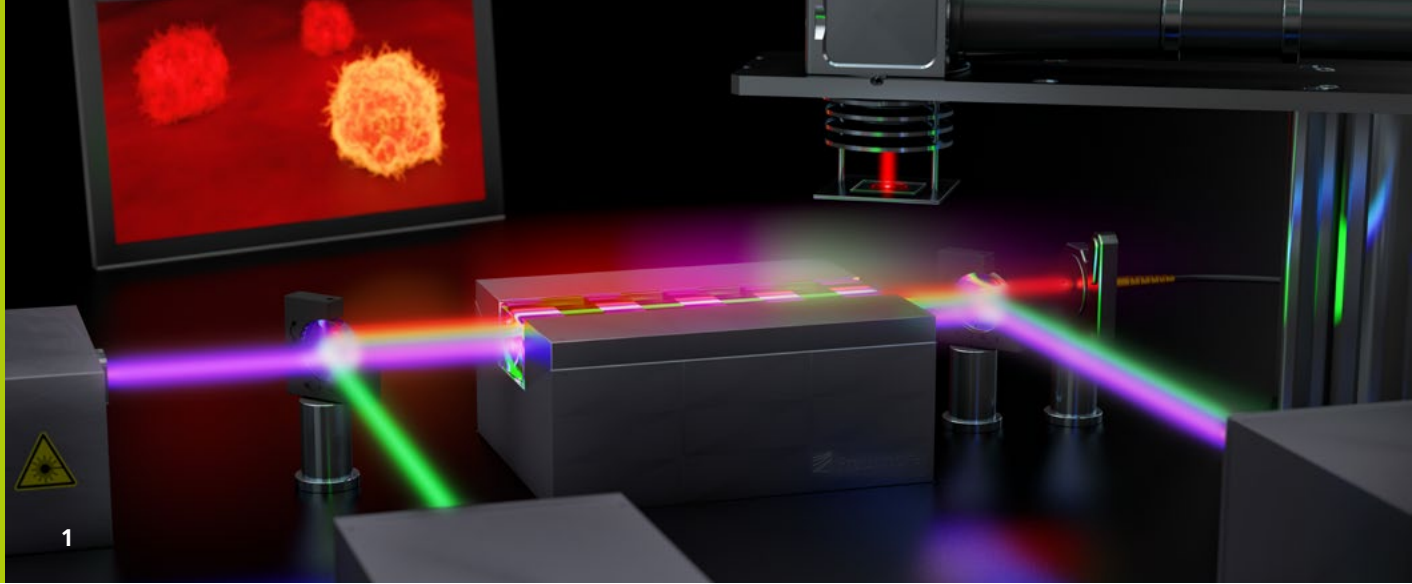
2 Messszene – Kamerabild der multispektralen Array-Kamera. |
Camera image of the multispectral array-camera.

AUTHORS

Robert Brüning
Martin Hubold
Christin Gassner
Robert Leitel
Robert Brunner

CONTACT

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



KOMPAKTE QUANTENBILDGEBUNG MIT NICHT-DETEKTIERTEN PHOTONEN COMPACT QUANTUM IMAGING WITH UNDETECTED PHOTONS

Die quantenoptische Bildgebung ist ein sehr vielversprechendes Forschungsfeld, welches heutige Limitierungen der optischen Bildgebung überwinden kann. Besonders im Bereich der Lebenswissenschaften liegen interessante Probencharakteristika in »exotischen« Spektralbereichen (tiefes UV oder mittleres IR), in denen die Detektion entweder unmöglich oder nur in unzureichender Qualität möglich ist.

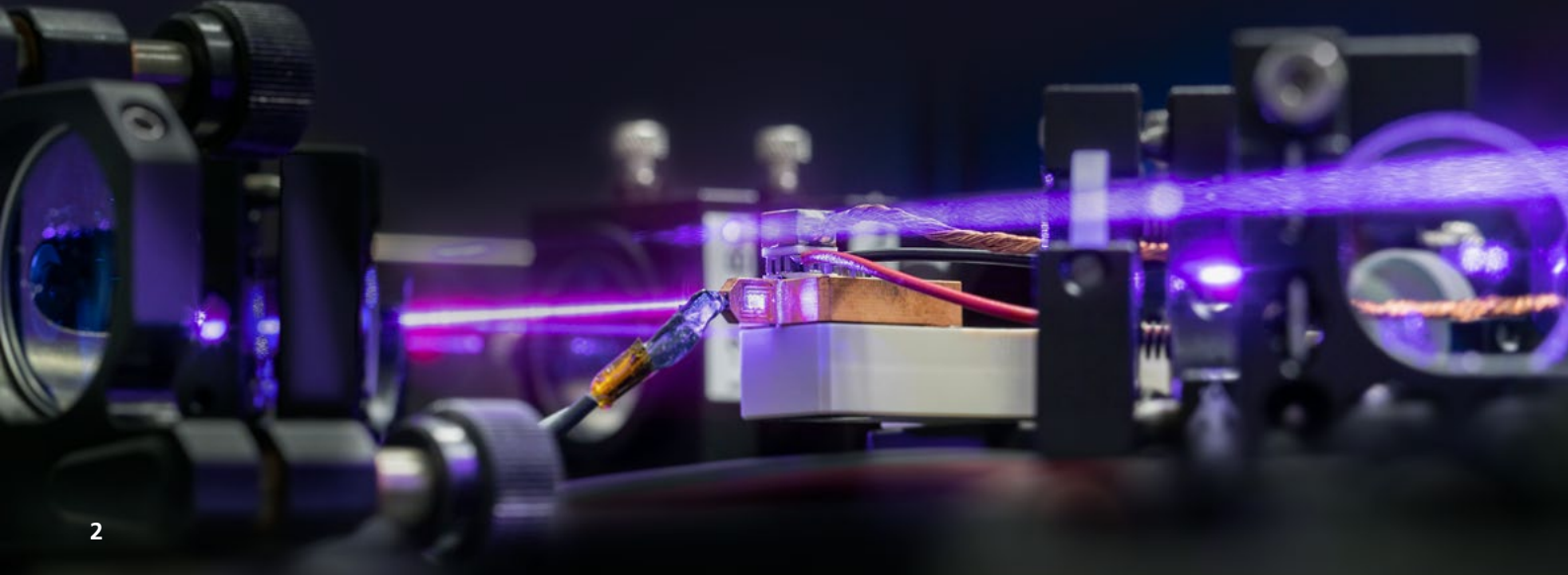
Mit Hilfe von Quantenkorrelationen, die tief in der Quantenmechanik verwurzelt sind, ist es möglich, Bilder mit Photonen aufzunehmen, welche nie mit dem Objekt wechselgewirkt haben und damit das oben genannte Detektionsproblem zu umgehen. Dieses fantastisch anmutende Phänomen beruht auf dem Effekt der induzierten Kohärenz /1/ in nichtlinearen Interferometern (Abb. 2) und wurde zuerst von der Zeilinger-Gruppe für Bildgebung angewandt /2/. Unter Ausnutzung nicht-degenerierter spontaner parametrischer Fluoreszenz können korrelierte Photonenpaare mit großer spektraler Spreizung genutzt werden. Somit kann die Wellenlänge der mit der Probe interagierenden Idlerphotonen passend zum interessanten Bereich des Objektes gewählt werden. Gleichzeitig bleiben die Signalphotonen im VIS-Bereich, in dem siliziumbasierte

Quantum-enhanced imaging is a very promising research field to overcome today's limitations in optical imaging. Especially within the field of life science, interesting sample characteristics lie in "exotic" spectral ranges (deep UV or mid-IR) where light detection becomes either impossible or very intricate with poor quality.

Based on quantum correlations, which are rooted in the very heart of quantum mechanics, the imaging of samples with photons that have never interacted with the object is feasible and thus, can solve the above detection issue. This science fiction like phenomenon is based on the effect of induced coherence /1/ in a non-linear interferometer (Fig. 1). It was first implemented for imaging purposes in the Zeilinger group /2/. By exploiting non-degenerated spontaneous parametric down conversion, correlated photon pairs with large wavelength difference can be harnessed. The obvious advantage of this technique is that the wavelength of the idler photons can be tailored to match the interesting spectral range of the object. At the same time, the signal photons, which are actually detected, can stay in the VIS range where, e. g., Si-based detectors are optimized. This way, photons that never interacted with the sample will form images on the camera (Fig. 2).

1 **Visualisierung eines Quanten-Imaging-Aufbaus für die mikroskopische Untersuchung von Zellen.** | Visualization of a quantum imaging setup for the microscopic examination of cells.

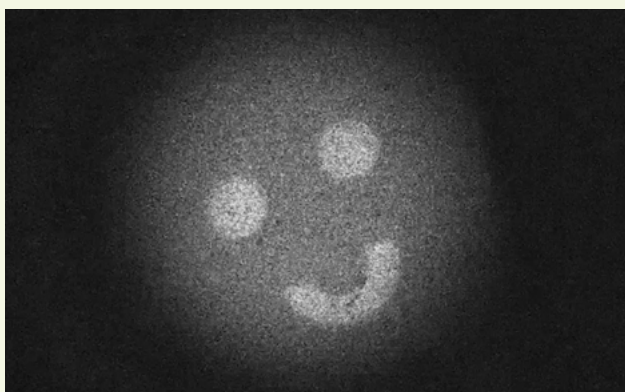
2 **Kompakter Quantenbildgebungs Aufbau.** | Demonstrator of a quantum imaging setup.



2

Detektoren optimiert sind. Auf diese Art und Weise formen Photonen, welche nie mit der Probe interagiert haben, das Bild auf der Kamera (Abb. 3).

Im Rahmen des Fraunhofer Leitprojektes »Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions« (QUILT) wird dieses Konzept in anwendbare Quantentechnologie überführt. Basierend auf einem Michelson-artigen nichtlinearen Interferometer wurde ein kompakter, stabiler und portabler Quantenbildgebungs Aufbau implementiert. Die Entwicklung des Demonstrators zielte auf Stabilität anstatt exotischer Spektralbereiche, sodass er bei ~730 nm Idler- und ~910 nm Signalwellenlänge läuft, welche beide über ca. 20 nm durchstimmbare sind, in dem die Temperatur des nichtlinearen Kristalls (ppKTP) angepasst und so die Phasenanpassungsbedingung geändert wird. Der Aufbau funktionierte so gut, sodass Quantenbildgebung mit nicht-detektierten Photonen erstmals in Videorate gezeigt werden konnte (Abb. 3). Dies zeigt bereits das Potenzial zur Live-Bildgebung in exotischen Spektralbereichen mit zukünftigen Demonstratoren.



3 Standbild des ersten aufgenommenen Quantenvideos am Fraunhofer IOF. | Still image of the first quantum video recorded at Fraunhofer IOF.

Within the framework of the Fraunhofer Key Research Initiative "Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions" (QUILT), this concept was transferred into applicable quantum technology. Based on a single-crystal Michelson-type non-linear interferometer a compact, stable, and portable quantum imaging setup was implemented. It was exhibited at the "Laser World of Photonics" fair in Munich this year (Fig. 3). The development focus of the demonstrator lied on stability rather than spectral ranges. It runs on ~730 nm for idler wavelength and ~910 nm for signal. Both are tunable within ~20 nm range by the temperature of the non-linear (ppKTP) crystal, which sets the phase-matching conditions. The setup performed so well that for the very first time, quantum imaging with undetected photons in video rate was possible. This indicates the live sample imaging capabilities for further demonstrators that cover more exotic spectral ranges.

References / Literatur

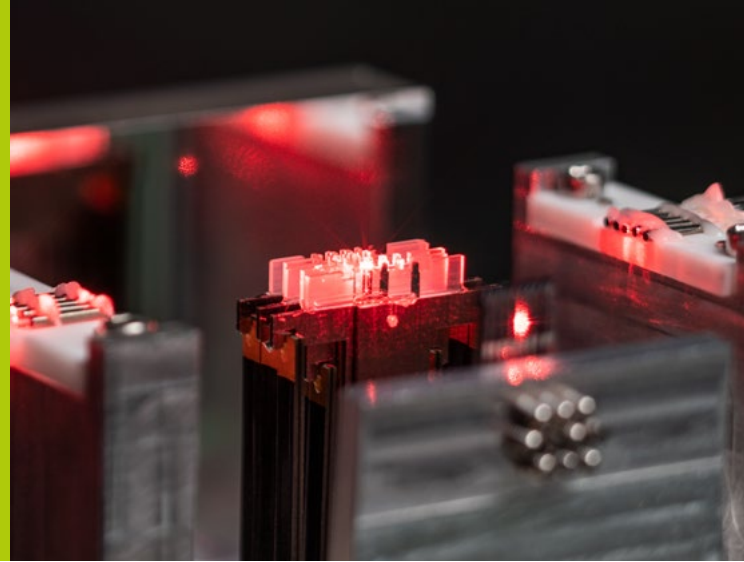
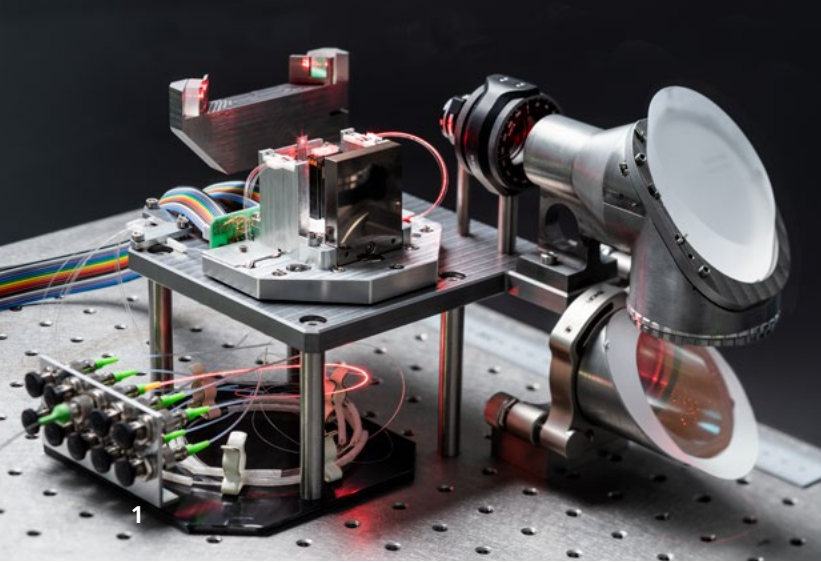
- /1/ L. J. Wang, X. Y. Zou, and L. Mandel: Induced coherence without induced emission, Phys. Rev. A 44(7), 4614 (1991).
- /2/ G. B. Lemos, V. Borish, G. D. Cole, S. Ramelow, R. Lapkiewicz, and A. Zeilinger: Quantum imaging with undetected photons, Nature 512, 409 (2014).

AUTHORS

Marta Gilaberte Basset
 Josué R. León Torres
 Uta Schmidt
 Markus Gräfe

CONTACT

Dr. Markus Gräfe
 Phone +49 3641 807-361
markus.graefe@iof.fraunhofer.de



AQTION – ADRESSIEROPTIK FÜR QUANTENCOMPUTER

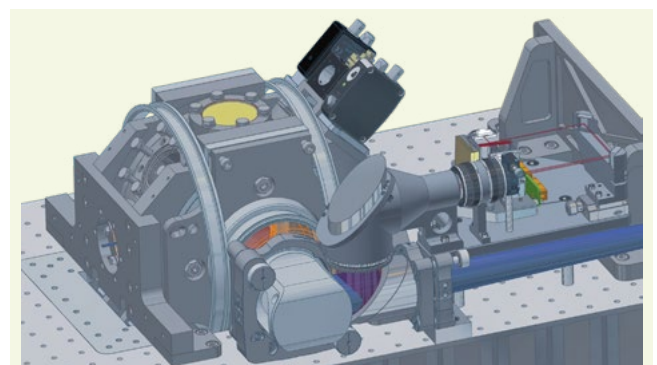
AQTION – ADDRESSING OPTICS FOR A QUANTUM COMPUTER

Im Projekt »Advanced quantum computing with trapped ions« (AQTION), einem Bestandteil des Quanten-Flaggschiffprogramms der EU, wird ein skalierbarer Quantencomputer realisiert. Dieser wird an der Universität Innsbruck, dem Konsortialführer des AQTION-Verbunds, aufgebaut. In diesem Quantenrechner werden die Quantenbits durch in einer Ionenfalle gefangene Ca^+ -Ionen repräsentiert. Zur Präparation der Quantenzustände und zur Bewerkstelligung der Rechenoperationen auf dem Quantengatter wird Laserlicht verschiedener Wellenlängen eingesetzt. Dazu werden u. a. Einzelionen mit einem Adressierstrahl mit der Wellenlänge 729 nm beleuchtet (Abb. 3). Das Ergebnis der Rechenoperationen wird anhand des Zustands der Ionen, die in der Falle als lineare Kette angeordnet sind, »ausgelesen«. Der Zustand des Ions zum Zeitpunkt der Messung ergibt sich daraus, ob bei dieser ein Fluoreszenzsignal erzeugt wird oder nicht.

Für die zuverlässige Adressierung der Ionen, die in der Fallenmitte einen Abstand von etwa $3 \mu\text{m}$ haben, sind beugungsbegrenzte Spots der Adressierstrahlen notwendig, die zudem in der Richtung der Fallenachse mit Submikrometergenauigkeit nachführbar sein müssen. Dazu wurde eine opto-mechanische Einheit entwickelt, bei der in einer Anordnung von Festkörpergelenken Piezosteller Mikroprismen bewegen (Abb. 1 rechts). Damit wird aus einer starren Anordnung von eingangsseitigen Fasern eine dynamisch regelbare

The goal of the "Advanced Quantum Computing with Trapped Ions" (AQTION) project – part of the EU Quantum Flagship Initiative – is to realize a scalable quantum computer. This computer will be assembled at the University of Innsbruck (UIBK), which leads the AQTION consortium.

Within the AQTION quantum computer, the quantum bits (Qbits) are represented by Ca^+ -ions, which are confined within a Paul trap. In order to prepare the quantum states and execute calculations at the quantum gate, different laser wavelengths are used. This includes to illuminate single ions with a laser spot of a wavelength of 729 nm (Fig. 3). The result of the calculations is "read out" from the status of the ions that are arranged in a linear chain within the trap.

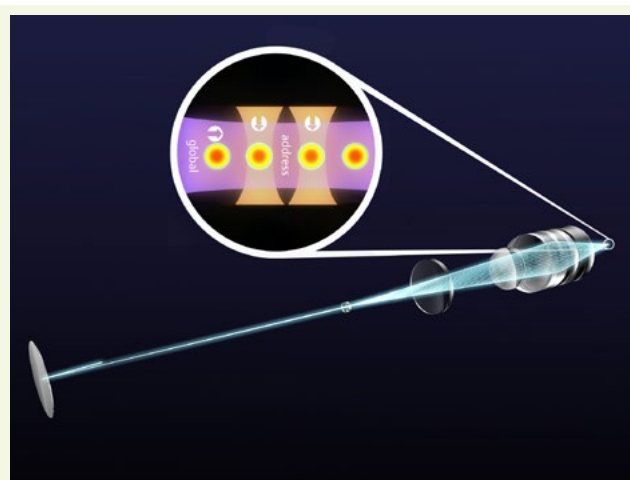


2 Konstruktionszeichnung 19"-Rack mit Ionenfalle und gefalteter Adressieroptik. | Design of 19" rack with ion-trap and folded addressing optics.

1 Laboraufbau und Detailaufnahme von Adressieroptik. | Laboratory setup and detailed view of addressing optics.

Anordnung von Quellen. Die weitere Optik sorgt einerseits für die notwendige Verkleinerung der eingangsseitigen Quellabstände auf den Ionenabstand und andererseits für die notwendigen Spotgrößen in der Fallenebene. Neben einem Spezialobjektiv, das für die Wellenlängen des Adressierstrahls und der Fluoreszenzdetektion korrigiert ist, kommen Gradientenindexlinsen sowie Achromate zum Einsatz.

Um die Optik (Abb. 3) kompakt gestalten und in den Gesamtaufbau integrieren zu können, muss der optische Weg mehrfach gefaltet werden (Abb. 1 (links) bzw. Abb. 2). Um einen – für das als Patentanmeldung eingereichte Funktionsprinzip notwendigen – Parabolspiegel mit optimaler Brennweite verwenden zu können, wird dieser derzeit mittels UP-Bearbeitung am Fraunhofer IOF gefertigt.



3 Ionenanordnung und Strahlrichtungen in der Fallenebene, Optikaufbau der Adressiereinheit. | Ion arrangement and beam directions in the trap-plane, and addressing unit optics.

The status of the ion at the time of the measurement becomes apparent by checking whether a fluorescence signal is emitted or not.

Reliable addressing of the ions that are spaced by 3 microns approximately in the center of the trap requires diffraction-limited spots, on one hand, and on the other a means of tracking the spots along the trap axis with sub-micron accuracy. To this end, a particular optomechanical unit was developed where in a special solid-state-joint configuration piezo-actuators induce a linear movement of micro-prisms, Fig. 1 (right). The optomechanical unit transforms the fixed array of input-fibers in a dynamically adjustable arrangement of sources. The additional optics ensure the demagnification of the source distances at the input down to the ion distances, as well as the appropriate spot sizes in the plane of the trap. In addition to a special objective, which is corrected for the wavelengths of the addressing beam and the fluorescence detection, gradient index and achromatic lenses are used. For the overall optical setup (Fig. 3), a multiple folding of the beam path (Fig. 1 (left) and Fig. 2) is required to ensure the potential for integration. To have the optimum focal length of the parabolic mirror – an essential component for the device principle (patent pending) – this mirror is now under construction by ultra-precision machining at Fraunhofer IOF.

AUTHORS

Bernd Höfer

Felix Kraze

Peter Schreiber

Christoph Wächter

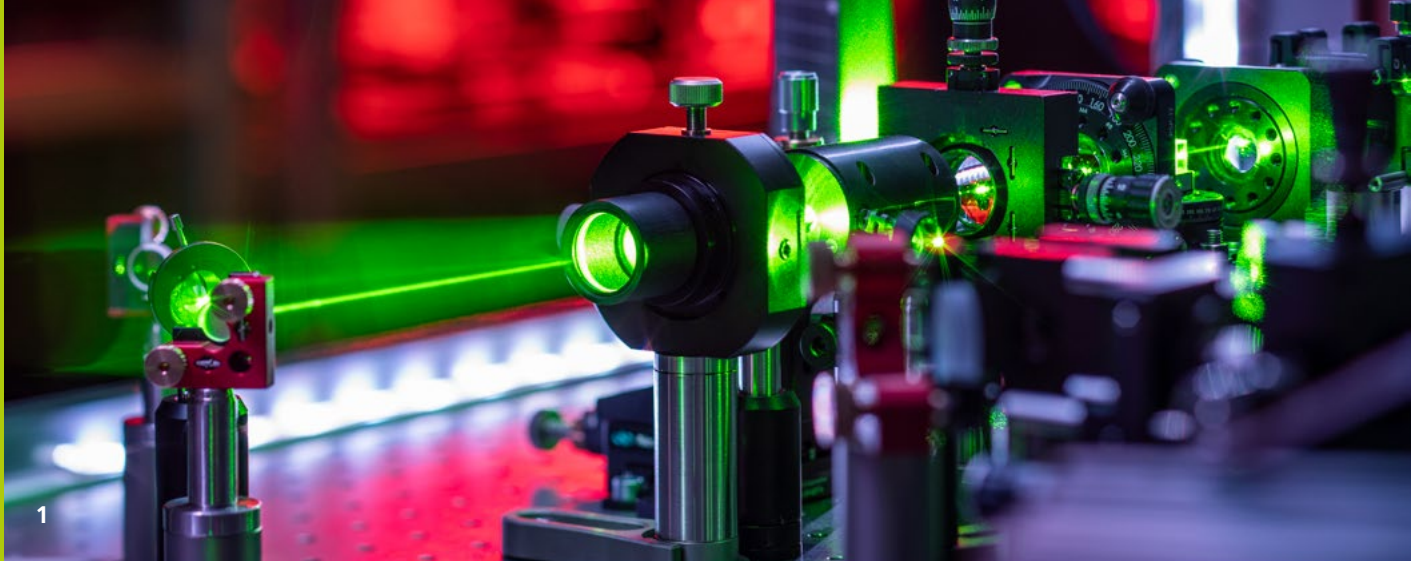
Uwe Detlef Zeitner

CONTACT

Dr. Christoph Wächter

Phone: +49 3641 807 419

christoph.waechter@iof.fraunhofer.de



PHOTONENQUELLEN FÜR HOCHDIMENSIONALE QUANTENKOMMUNIKATION

PHOTON SOURCES FOR HIGH-DIMENSIONAL QUANTUM COMMUNICATION

Die Quantenkommunikation basiert auf den einzigartigen, abhörsicheren Quanteneigenschaften von Photonen. Quellen für entsprechende Photonen mit maßgeschneiderten Eigenschaften sind daher Schlüsselkomponenten für alle drei Säulen der Quantentechnologien – Kommunikation, Computing sowie Imaging bzw. Metrologie. Forschung und Entwicklung in den Quantenlaboren des Fraunhofer IOF konzentriert sich deshalb unter anderem auf das Setup effizienter Quellen hochdimensional verschränkter Photonen mit dem Ziel, möglichst viel Information in einem Photon zu kodieren. Neben der grundsätzlichen Untersuchung neuartiger Quellen-Designs steht auch deren Transfer in miniaturisierte, kompakte und feldtaugliche Setups im Fokus der Forschung.

Im Rahmen des BMBF-geförderten Verbundvorhabens »QSource« (FKZ: 13N14979) sind Photonen mit einer mehrstufigen Zustandskodierung, auf Basis der Quanteneigenschaft Orbital Angular Momentum (OAM), Gegenstand der Arbeiten. In Kooperation mit dem österreichischen Institut für Quantenoptik und Quanteninformation Wien (IQOQI) wird das Design einer ultra-stabilen, interferometerbasierten OAM-Quelle entwickelt, die verschränkte Photonen durch spontane parametrische Down-Conversion in einem bei 405 nm gepumpten, nichtlinearen Kristall (ppKTP) erzeugt. Den verschränkten Photonen wird ein OAM durch Grauton-LED-Lithographie erzeugt,

Quantum communication is based on the unique, tap-proof quantum properties of photons, and sources for single photons that have tailored quantum properties are key components for all the major branches of quantum technologies – communication, computing, and imaging/sensing. Therefore, research and development at the quantum laboratories of Fraunhofer IOF focus on the development of highly efficient sources of photons that exhibit entanglement in multi-level quantum properties. Compared to binary state-encoding typically employed, the exploitation of high-dimensional degrees of freedom will allow the encoding of vast amounts of information in a single photon. Next to the fundamental investigations into new setups, their transfer into miniaturized, ruggedized, and field-deployable designs is also part of the scientific work.

In the framework of the publicly funded project "QSource" (BMB-FKZ: 13N14979), we are developing a modular photon-pair source that exhibits high-dimensional entanglement in the orbital angular momentum (OAM) degree of freedom. In collaboration with the Austrian Institute for Quantum Optics and Quantum Information Vienna (IQOQI), a design for an ultra-stable, interferometer-based OAM source shall be developed that creates entanglement by spontaneous parametric down-conversion in a 405 nm pumped, non-linear crystal (ppKTP), while the OAM is applied to the entangled photons by a customized spiral

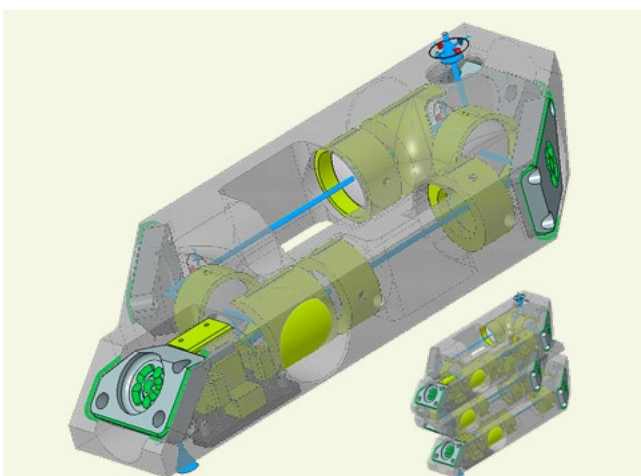
1 Labor-Setup einer verschränkten Photonenquelle. | Lab setup of an entangled photon source.

angepassten chiralen Phasenplatten aufgeprägt. Das Design der OAM-Quelle wird mittels Laboraufbau grundsätzlich untersucht hinsichtlich deterministischer Justieralgorithmen und –toleranzen, sowie optimiert hinsichtlich der Brillanz (Abb. 1).

Parallel dazu erfolgt der auf dem Labormodell basierende, skalierte Aufbau einer ultra-stabilen, hybriden OAM-Quelle, die kaskadierbar für multiple OAM ausgelegt ist. Das kompakte, hybride Design der Quelle beinhaltet minimierte Justierfreiheitsgrade für einzelne, empfindliche optische Komponenten, Bond-Technologien wie das Löten von Optik für die langzeitstabile Fixierung von Positionen sensibler Komponenten, sowie ein lokalisierter Temperaturregelmechanismus zur Einstellung der Kristalltemperatur im Bereich 30...50 °C mit einer Homogenität der Kristalltemperatur <0.1 K. Der Formfaktor des kompakten Designs mit einem Volumen von 120 x 55 x 16 mm³ erlaubt die Integration der Quelle in 19"-Racks der Telekommunikation, aber auch in Satellitenterminals mit optischen Laserlinks.

phase-plate, manufactured by means of grayscale LED lithography. While the design is investigated in principle, e. g., with respect to deterministic alignment procedures and tolerances, and optimized for its performance by means of a laboratory model (Fig. 1), in parallel it is transferred into a hybrid, ultra-stable setup that enables cascading for multiple OAM (Fig. 2).

The compact, hybrid design incorporates a minimized number of alignment degrees of freedom for sensitive components, bonding techniques, such as optics soldering for long-term stable position fixations, and localized heating systems that allow for a temperature leveling of the non-linear conversion crystal in the range between 30 – 50 °C at a bulk volume temperature homogeneity of < 0.1 K. The design form factor at 120 x 55 x 16 mm³ allows for a cascaded integration into, e. g., standard telecom 19" racks, while the stable setup also is suitable for applications such as satellite laser link terminals.



2 CAD-Modell einer kompakten OAM-Quelle und deren dreifacher Kaskadierung. | CAD-model of a compact OAM source and its 3x cascading.

AUTHORS

Fabian Steinlechner

Erik Beckert

Carlos Sevilla

Robert Leitel

Manuel Erhard¹

¹ Institut für Quantenoptik
und Quanteninformation –

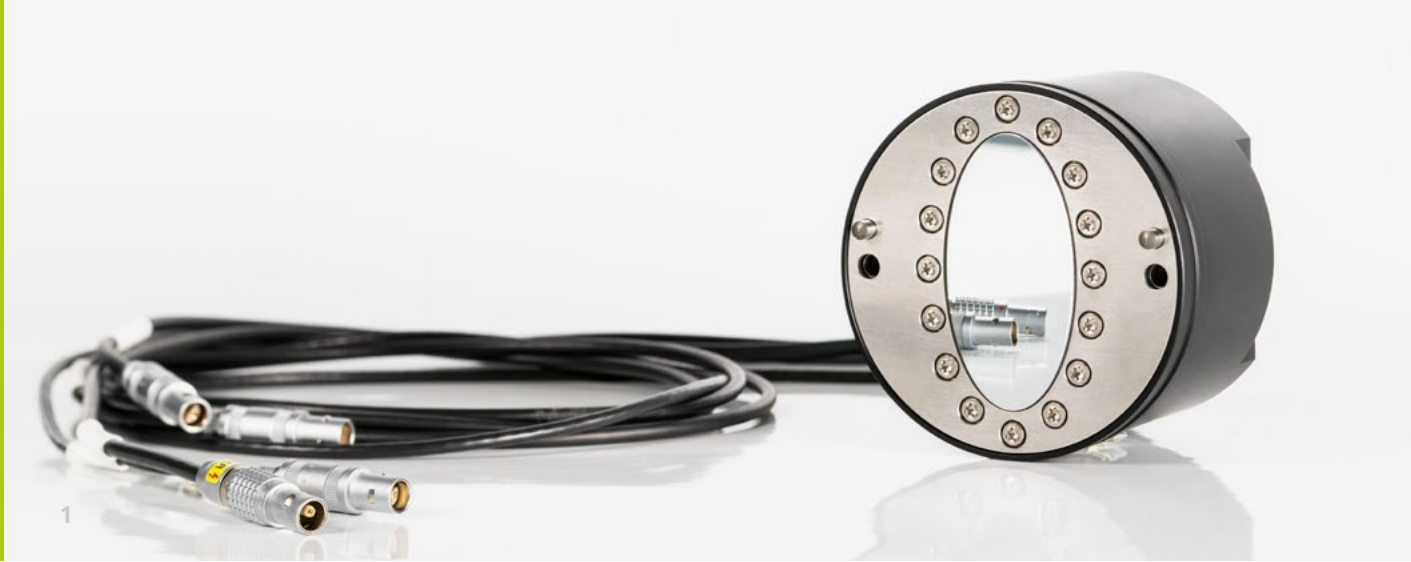
IQOQI, Wien

CONTACT

Dr. Fabian Steinlechner

Phone +49 3641 807-733

Fabian.Steinlechner@iof.fraunhofer.de



DEFORMIERBARE SPIEGEL ZUR HOCHDYNAMISCHEN STRAHLOSZILLATION

DEFORMABLE MIRRORS FOR HIGHLY DYNAMIC BEAM OSCILLATION

Die gezielte Energieeinkopplung in das Werkstück spielt eine entscheidende Rolle in der Lasermaterialbearbeitung. In konventionellen Laserbearbeitungsanlagen werden hochdynamische Scanner zur Strahlmanipulation in X- und Y-Richtung eingesetzt. Die Fokusverschiebung in Z-Richtung erfolgt hingegen durch verschiebbare Linsensysteme oder hydraulisch bzw. pneumatisch aktivierte deformierbare Spiegel. Diese Systeme stellen eine deutliche Limitation hinsichtlich der Dynamik des Gesamtsystems dar /1,2,3/. Speziell in den Anwendungsfeldern des Laserstrahlschneidens und -schweißens zeigen Voruntersuchungen der Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer IWS, dass der Einsatz einer hochdynamischen Strahloszillation in Z-Richtung die Prozessgeschwindigkeit signifikant erhöht und die Prozessstabilität verbessert werden kann.

Zur Vergrößerung des Dynamikbereiches erfolgte im Rahmen des Zwanzig20-Projektes »PISTOL³« die Entwicklung eines aktiven deformierbaren Spiegels als Z-Achse. Abbildung 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des deformierbaren Spiegels sowie schematisch dessen Integration in den Aufbau eines Laserbearbeitungskopfes. Kernelement des deformierbaren Spiegels ist eine Membran. Deren spezielles Design ermöglicht die Korrektur der astigmatischen Aberration infolge der 90°-Strahlumlenkung bei gleichzeitiger Oberflächendeformation. Die notwendige torische Oberfläche wird durch einen vorgespannten piezoelektrischen Aktor erzeugt. Dieser leitet spannungsabhängig

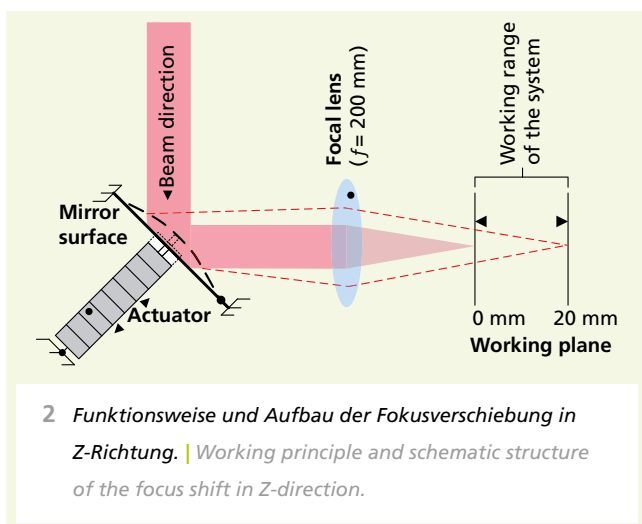
The selective coupling of energy into the workpiece plays a crucial role in laser material processing. In conventional laser processing systems, highly dynamic scanners are used for beam manipulation in the X- and Y-axes. The focus shift in the Z-direction is realized by sliding lens systems or hydraulically or pneumatically activated deformable mirrors which are activated either hydraulically or pneumatically. These systems impose a significant limitation on the dynamics of the overall system /1,2,3/. In the fields of laser cutting and welding, in particular, preliminary investigations by colleagues at the Fraunhofer IWS show that the use of highly dynamic beam oscillation in the Z-direction significantly increases processing speed and improves process stability.

To increase the system dynamic range, an active deformable mirror was developed as a Z-axis within the scope of the Zwanzig20 project "PISTOL³". Figure 2 shows the principle design of the deformable mirror and its schematic integration into the construction of a laser processing head. The critical component of the deformable mirror is a membrane, the special design of which allows the correction of astigmatic aberration due to 90° beam deflection on a curved mirror with simultaneous surface deformation. The required toric surface is generated with a prestressed piezoelectric actuator. Accordingly, the central deflection of the mirror is determined by the applied voltage. In the non-deformed or plane state, a collimated laser beam is deflected by the deformable mirror and focused by a lens at

1 **Piezogetriebener deformierbarer Spiegel zur hochdynamischen Strahloszillation.** |

Piezo-driven deformable mirror for highly dynamic beam oscillation.

eine zentrische Auslenkung der Spiegelmembran ein. Im unverformten Zustand trifft ein kollimierter Laserstrahl auf den deformierbaren Spiegel, wird umgelenkt und mit einer Linse im Abstand deren Brennweite fokussiert. Mit Auslenkung des deformierbaren Spiegels wird der Laserstrahl, nachdem er den Spiegel passiert hat, aufgeweitet. Das divergierende Strahlbündel wird ebenfalls durch die Linse fokussiert. Durch die konvexe Krümmung der Spiegeloberfläche verschiebt sich der Fokus des Strahlenbündels. Die resultierende Brennweite ändert sich in Abhängigkeit der Verformung der Spiegeloberfläche. Der entwickelte deformierbare Spiegel (Abb. 1) besitzt eine elliptische Apertur von 60 mm x 30 mm. In Kombination mit einer Fokussierlinse mit einer Brennweite von 200 mm wird eine Fokusverschiebung von 18 mm mit einer Oszillationsfrequenz von bis zu 8,5 kHz erreicht. Zudem besitzt der Spiegel eine Hochleistungsbeschichtung deren Eignung in Versuchen mit bis zu 4 kW cw Laserleistung nachgewiesen werden konnte. Erste experimentelle Untersuchungen zeigen im Laserstrahlschneiden eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit um bis zu 60 % bei gleichbleibend hoher Kantenqualität. In der Anwendung des Laserstrahlschweißens konnte eine Erhöhung der Prozessstabilität sowie eine Verringerung der Porosität der Schweißnaht nachgewiesen werden.



the distance of the lens's nominal focal length. When the mirror is activated, it acts as a convex mirror and thus the laser beam diverges after it has passed the mirror. This changes the focal length of the system and, as a result, the focus position of the beam shifts. The resulting focal length changes depending on the deformation or effective focal length of the mirror surface.

The developed deformable mirror (Fig. 1) has an elliptical aperture of 60 mm x 30 mm. In combination with a focusing lens with a focal length of 200 mm, a focus shift of 18 mm with an oscillation frequency of up to 8.5 kHz is achieved. In addition, the mirror has a high-performance coating whose suitability has been established in tests with up to 4 kW CW laser power. Initial experimental investigations show an increase of the processing speed in laser cutting by up to 60 % with consistently high edge quality. In the application of laser beam welding, an increase of the process stability and a reduction in the porosity of the weld seam could be demonstrated.

References / Literatur

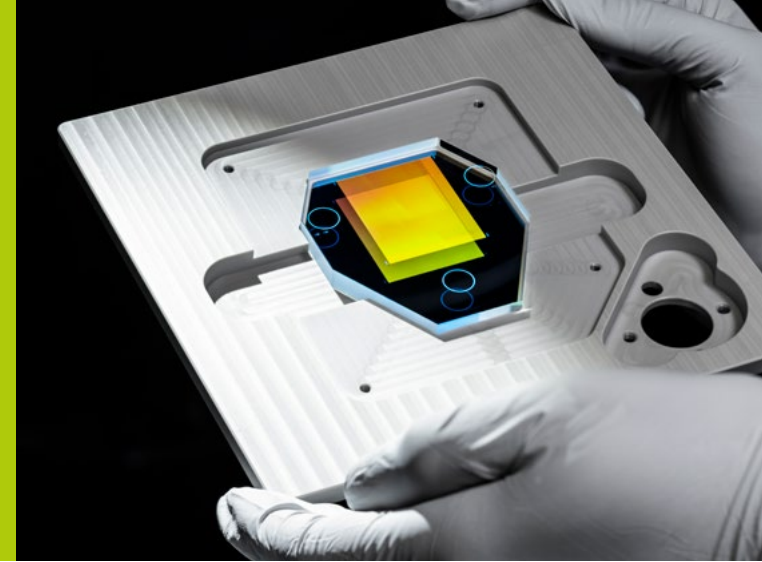
- /1/ W. M. Steen: Arc augmented laser processing of materials, Journal of Applied Physics 51, p. 5636 (1980).
- /2/ M. Geiger, S. Schuberth, and J. Hutfless: CO₂ laser beam sawing of thick sheet material with adaptive optics, Welding in the World 37, p. 5 (1996).
- /3/ T. Okada, K. Ebata, M. Shiozaki, T. Kyotani, A. Tsuboi, M. Sawada, and H. Fukushima: Development of adaptive mirror for CO₂ laser, Proc. SPIE Vol. 3888, pp. 509 (2000).

AUTHORS

Claudia Reinlein
Paul Böttner

CONTACT

Paul Böttner
+49 3641 807 -738
paul.boettner@iof.fraunhofer.de



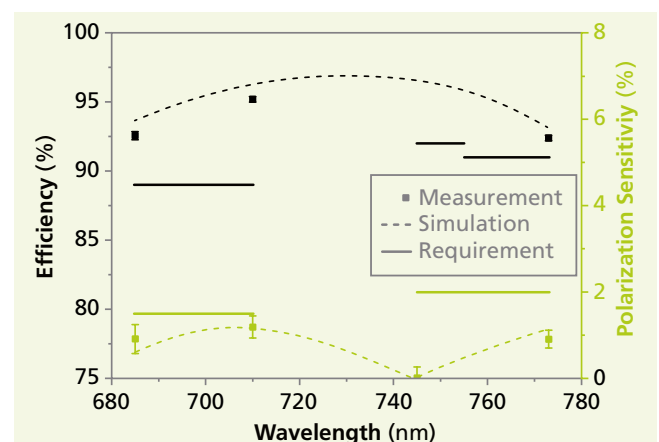
BEUGUNGSGITTER FÜR DIE SENTINEL-5 NIR SPEKTROMETER OPTIK GRATING FOR THE SENTINEL-5 NIR SPEKTROMETER OPTIC

Im Rahmen des COPERNICUS Programms zur Erdbeobachtung wird ESA voraussichtlich 2021 die Sentinel-5 Satellitenmission starten. Das Ziel der Mission ist die Messung von Spurengaskonzentrationen (O_3 , NO_2 , SO_2 , CO , CH_4 , CH_2O) für Anwendungen im Bereich der Klimaforschung und der Atmosphärenchemie. Das Sentinel-5/UVNS Instrument ist ein hochauflösendes abbildendes Spektrometer für einen Spektralbereich von Ultraviolett bis Infrarot.

Das Spektrometergitter für den Nahinfrarot-Kanal (685 nm – 773 nm) wird vom Fraunhofer IOF geliefert. Das komplette Projekt umfasst eine Technologieentwicklungsphase, die Qualifikationsphase und Herstellung sowie Testen der tatsächlichen Flugmuster. Das binäre Transmissionsgitter mit einer Periode von 627 nm wird in -1. Beugungsordnung verwendet und wurde mittels Elektronenstrahlolithographie und reaktiven Ionentiefenätzen hergestellt. Aus den anspruchsvollen Anforderungen an die Beugungseffizienz und Polarisations sensitivität (Variation der Effizienz für TE- und TM-polarisiertes Licht) ergeben sich enorme Herausforderungen an die Herstellungstoleranzen. Die nominale Grabenbreite von 197 nm hat eine Toleranz von lediglich ± 3 nm. Der verwendete Herstellungsprozess musste speziell entwickelt werden und umfasst die folgenden Schritte:

1 **Proto-Flugmuster des Beugungsgitters für die Sentinel-5 NIR-Spektrometer-Optik.** | *Grating Proto-Flight Model of the Sentinel-5 NIR spectrometer optic.*

As part of the COPERNICUS Earth observation program, the ESA will launch the Sentinel-5 satellite mission in 2021. The objective of the mission is the monitoring of trace gas concentrations (O_3 , NO_2 , SO_2 , CO , CH_4 , CH_2O) for atmospheric chemistry and climate applications. The Sentinel-5/UVNS instrument is a high-resolution imaging spectrometer system operating in the ultraviolet to shortwave infrared range. The spectrometer grating for the near-infrared channel (685 nm – 773 nm) will be delivered by Fraunhofer IOF. The full project covers a technical development phase, a qualification phase, and manufacturing, and testing of the actual flight models.

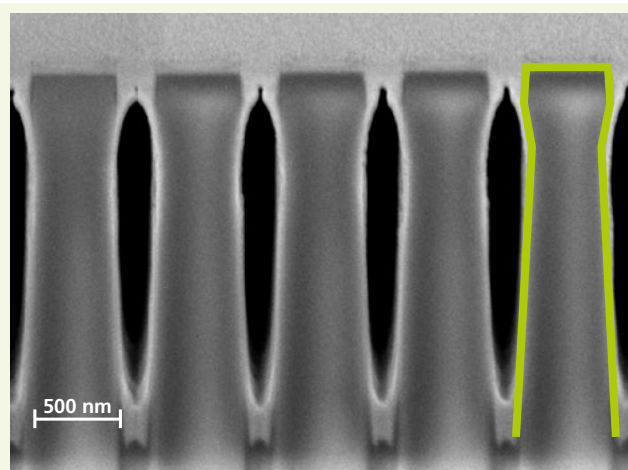


2 **Geforderte und gemessene Werte für Beugungseffizienz und Polarisations sensitivität des Gitters.** |

Required and measured values for diffraction efficiency and polarization sensitivity of the grating.

- 1.) Lithographische Herstellung des Gitters mit Grabenbreiten größer als der Sollwert.
- 2.) Strukturanalyse der Gittergeometrie mittels Rasterkraftmikroskopie und fokussierter Ionenstrahlinspektion.
- 3.) Charakterisierung der optischen Funktion des Gitters.
- 4.) Atomlagenabscheidung (ALD) von SiO_2 zur Feineinstellung der Grabenbreite mit Nanometerpräzision.

Basierend auf der strukturellen und optischen Charakterisierung der Gitter konnte die notwendige SiO_2 -Schichtdicke für den ALD-Prozess bestimmt werden. Der ALD-Prozess ermöglicht ein hochpräzises Einstellen der Grabenbreite durch die konforme Beschichtung des Quarzglasgitters mit SiO_2 . Die Herstellung des Proto-Flugmusters und die Abnahmetestkampagne der optischen Funktion wurden im Juli 2019 erfolgreich abgeschlossen. Das Proto-Flugmuster wird 2020 zur Integration in die NIR Spektrometer Optik ausgeliefert.



3 Querschnitt des Gitterprofils. Grüne Linie: mittels Atomlagenabscheidung für die Feineinstellung der Grabenbreite aufgetragene konforme 20 nm SiO_2 -Schicht. |

Cross-section of the grating profile. Green line: conformal 20 nm thick SiO_2 layer coated by atomic layer deposition for fine-tuning of the groove widths.

The binary transmission grating with a period of 627 nm operates in -1st diffraction order and was fabricated by electron beam lithography and deep reactive ion etching. To comply with the demanding requirements on diffraction efficiency and especially polarization sensitivity (variation of efficiency for TE- and TM-polarized light), the fabrication tolerances on the grating geometry (depth and groove width) were very challenging. The nominal groove width of 197 nm has an acceptable tolerance of only ± 3 nm. The applied fabrication process of the gratings was developed specially and comprises the following steps:

- 1.) Lithographic fabrication with a groove width larger than the nominal value.
- 2.) Structural analysis of the grating geometry by means of atomic force microscopy and focused-ion beam inspection.
- 3.) Characterization of the grating's optical performance.
- 4.) Atomic layer deposition (ALD) of SiO_2 to fine-tune the groove width with nanometer precision to the target value.

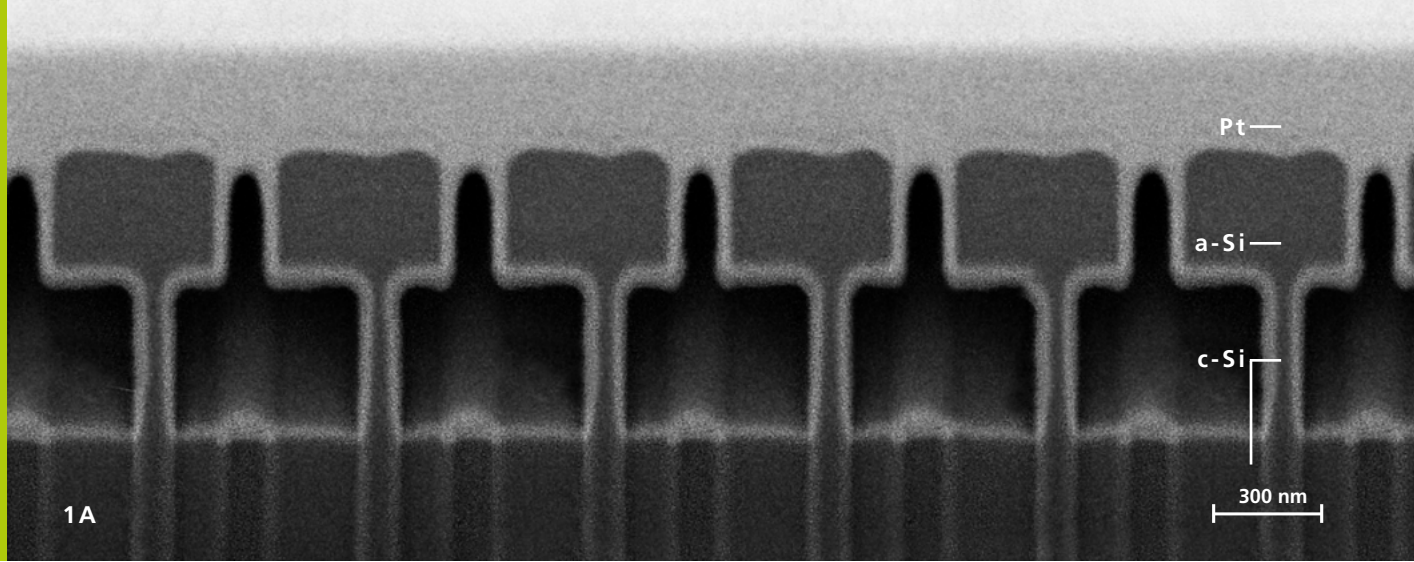
Based on the structural and optical characterization of the gratings, the SiO_2 layer thickness needed for the ALD process could be determined. The ALD process itself allows very precise fine-tuning of the groove width by a conformal coating of the fused-silica grating with SiO_2 . Manufacturing of the proto-flight model and acceptance testing of the optical function was concluded successfully in July 2019. The proto-flight model is expected to be delivered in 2020 for integration into the NIR spectrometer optics.

AUTHORS

Frank Burmeister
Tino Benkenstein
Julia Kästner
Kristin Pfeiffer
Uwe Zeitner

CONTACT

Dr. Frank Burmeister
Phone +49 3641 807-274
frank.burmeister@iof.fraunhofer.de



RESONANTE SUBWELLENLÄNGENSTRUKTUREN FÜR HOCHREFLEKTIVE SPIEGEL

RESONANT SUB-WAVELENGTH STRUCTURES FOR HIGHLY REFLECTIVE MIRRORS

Hochreflektive Oberflächen fungieren heutzutage als eine Schlüsselkomponente in einer Vielzahl optischer Anwendungen und insbesondere in Resonatoren und Kavitäten werden Reflektivitäten von bis zu 99,999 % benötigt. Sogenannte resonante Gitterreflektoren stellen dabei eine Alternative zu den etablierten dielektrischen Vielschichtspiegeln dar und bieten gleichzeitig den Vorteil eines reduzierten thermischen Rauschens. Dies macht Gitterreflektoren beispielsweise für Gravitationswellendetektoren und hochsensitive, monolithische Accelerometer interessant.

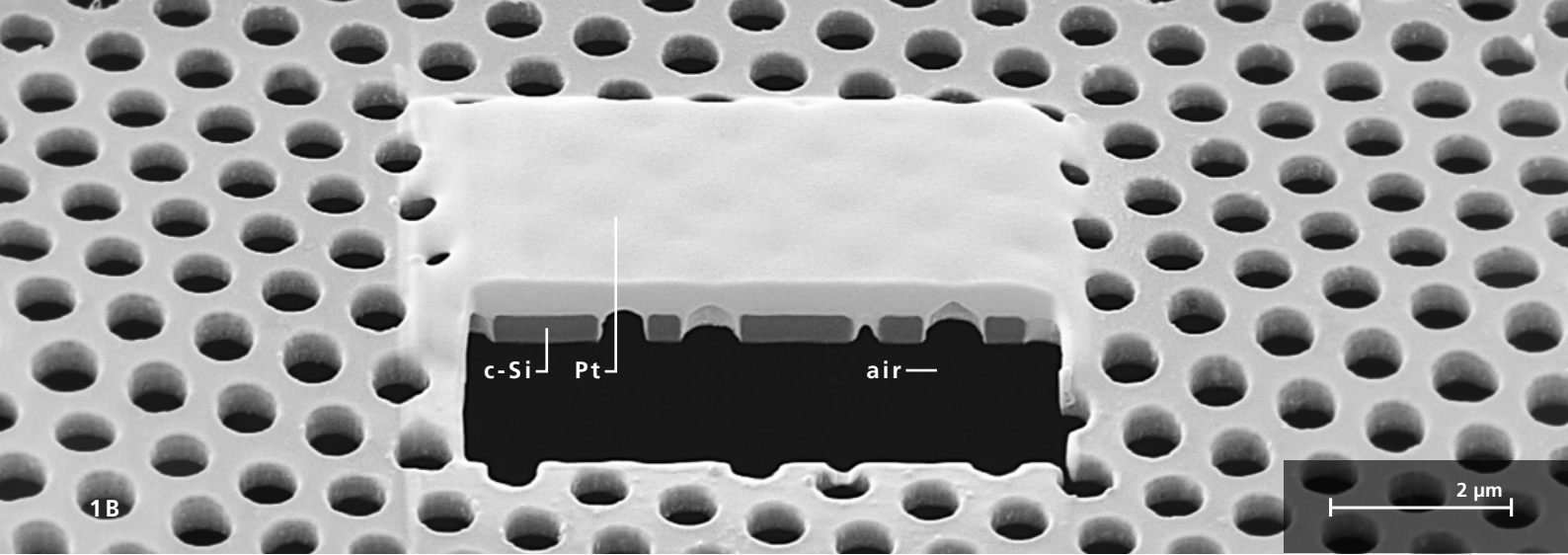
Ein Gitterreflektor basiert auf einem periodisch gestörten Schichtwellenleiter. Die periodische Störung im Subwellenlängenbereich erlaubt es dabei, bei senkrechtem Lichteinfall Wellenleitermoden anzuregen, welche lateral propagieren und dabei wieder (aufgrund der Störung) auskoppeln. Die ausgekoppelte Strahlung kann nun konstruktiv mit dem direkt reflektierten Licht interferieren, was bei geeigneter Phasenverschiebung zu Reflektivitäten von 100 % führt. Basierend auf diesem Prinzip lässt sich unter Verwendung des effektive-Medien-Ansatzes eine monolithische T-förmige Gittergeometrie ableiten. Am Leistungszentrum Photonik ist ein Herstellungsprozess entwickelt worden, welcher eine sehr genaue Fertigung solcher Strukturen erlaubt. Eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme (REM) des Querschnittsprofils eines

Currently, highly reflective surfaces are a key component in many optical devices and, especially in optical resonators and cavities, reflectivities of up to 99.999 % are necessary. Resonant grating reflectors offer an alternative to the established dielectric multilayer mirrors while possessing the advantage of reduced thermal noise. Thus, grating reflectors are considered for application in gravitational wave detectors and high sensitivity monolithic accelerometers.

A grating reflector is based on periodically corrugated slab waveguides. The periodic disturbance within the subwavelength range allows for the excitation of waveguide modes even at the normal incidence of light. The modes propagate within the waveguide and are forced by the perturbation to decouple continuously (leaky modes). The outcoupled radiation interferes (constructively) with the directly reflected light, which leads to a reflectance of up to 100 % depending on the accumulated phase difference.

Based on this principle, a monolithic T-shaped grating geometry can be deduced using the effective medium approach. At the Institute of Applied Physics (IAP), a process was developed, which allows a very accurate fabrication of such structures. A scanning electron microscope (SEM) image of the cross-section profile of a grating is shown in Figure 1. The corresponding reflectivity measurement within the infrared spectral range is given in Figure 2. The loss in

¹ REM-Aufnahme des T-förmigen Gitterreflektors (A) bzw. der kristallinen Siliziummembran (B) mit Reflektivitäten von mehr als 99,5 %. Das Platin diente dem Erzeugen des Schnittes durch das Gitter. | SEM-image of a T-shaped grating (A) and a crystalline silicon membrane (B), respectively, showing reflectances of more than 99.5 %. The Platinum was necessary for cross section preparation.



gefertigten Gitters und die zugehörige Effizienzmessung im IR-Spektralbereich zeigen Abbildung 1A und 2. Der Verlust in der Reflektivität von etwa 0,5 % ist weniger auf den nicht völlig vermeidbaren Versatz der zwei Belichtungsebenen, sondern auf Restabsorption der oberen amorphen Siliziumschicht zurückzuführen.

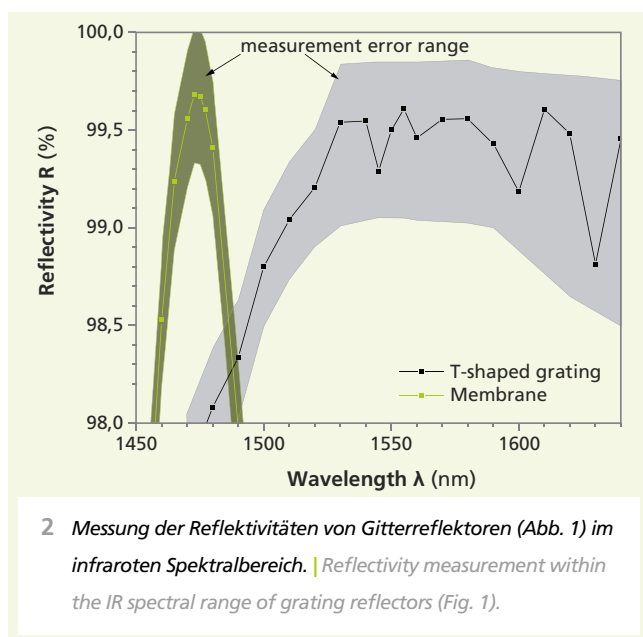
Eine weitere Variante solcher Gitterreflektoren sind nur 190...300 nm dicke, kristalline Siliziummembrane, welche $R = 100\%$ in beide Richtungen erlauben. Eine REM-Aufnahme der hergestellten Membran und die zugehörige Effizienzmessung zeigen Abbildung 1B und 2. Dabei wurde eine Effizienz von $R = 99,7\%$ bei 1470 nm Wellenlänge erreicht.

Solche Membranen wären beispielsweise in der Breakthrough Starshot Initiative interessant, bei der die Möglichkeit erforscht werden soll, einen nur wenige Gramm schweren Satelliten mit Hilfe eines hochreflektiven Lichtsegels auf 0,2 c zu beschleunigen und zu Proxima Centauri zu schicken. Die hier gezeigte Membran würde bei einer Fläche von 16 m² nur 3,3 g wiegen.

reflectance of about 0.5 % is not entirely due to the not entirely avoidable shift of the consecutive exposure layers but rather to residual absorption of the upper amorphous silicon layer.

Another type of such grating reflectors are crystalline silicon membranes between 190 and 300 nm thickness, which allow $R = 100\%$ in both directions. An SEM image of a fabricated membrane is shown in Figure 1B and the corresponding reflectivity measurement is given in Figure 2. An efficiency of $R = 99.7\%$ at a wavelength of 1470 nm was achieved.

Such membranes would be of interest, for example, in the Breakthrough Starshot Initiative, which explores the possibility of accelerating a few grams weighing satellite to 0.2 c using a highly reflective light sail and sending it to Proxima Centauri. The membrane shown here would weigh only 3.3 g with an area of 16 m².

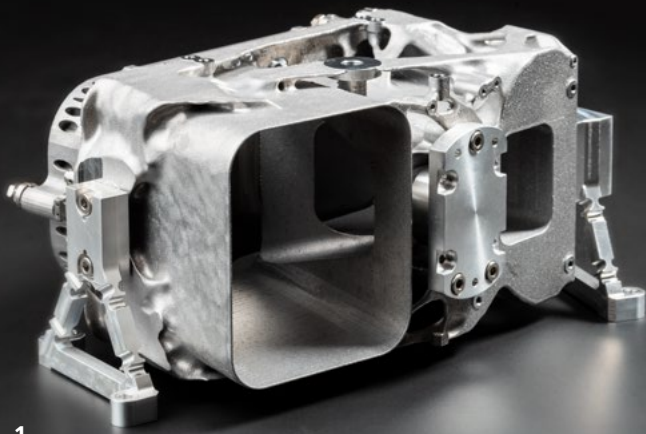


AUTHORS

Martin Heusinger
Thomas Käsebier
Thomas Siefke
Ernst-Bernhard Kley
Uwe Detlef Zeitner

CONTACT

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



1



2

ADDITIVE FERTIGUNG METALLOPTISCHER SYSTEME ADDITIVE MANUFACTURING OF METAL OPTICS AND SYSTEMS

Die additive Fertigung ermöglicht die Realisierung völlig neuartiger Designs und Funktionalität, ohne den Restriktionen klassischer Fertigungsverfahren zu unterliegen. Dies eröffnet beispielsweise die Umsetzung von aggressiveren Leichtgewichtsstrategien und eine optimale lastgerechte Strukturverteilung.

Erstmals wurde die Fertigung eines vollständigen Spiegelteleskops durch additive Verfahren demonstriert (Abb. 1). Spiegel und Gehäuse bestehen aus einem Siliziumpartikel verstärktem Aluminiumwerkstoff, welcher durch Selektives Laserstrahlschmelzen hergestellt wird. Zwei der drei Spiegel des Systems befinden sich auf einem gemeinsamen Substrat. Diese Spiegelsubstrate sind durch stochastische Strukturen im Inneren massereduziert. Das Doppelspiegelsubstrat weist eine Massereduktion von 65 % im Vergleich zum vollen Modell auf. Nach der additiven Fertigung, Reinigung und mechanischer Bearbeitung der Anlagestrukturen und Referenzflächen wurden die Spiegelsubstrate durch eine etablierte Fertigungskette für Metalloptiken ultrapräzise bearbeitet. Dies umfasst mehrere Diamantdrehprozesse und magnetorheologisches Polieren. Hiermit wurden auf einem Einzelspiegel eine Formabweichung von < 100 nm peak-to-valley und eine Rauheit von < 2 nm in einem Messfeld von $140 \times 110 \mu\text{m}^2$ erreicht.

Additive manufacturing (AM) technologies offer novel concepts regarding functionality and design, without being limited by restrictions that arise from conventional manufacturing technologies. This enables the realization of more complex lightweight structures and an optimized load adapted structural design. For the first time, a complete three-mirror anastigmatic telescope was manufactured by additive manufacturing (Fig. 1). Mirrors and housing consist of a silicon particle-reinforced aluminum material, which is generated by laser powder bed fusion. The system consists of three mirrors, two of them are placed onto a single substrate. The mirrors are mass reduced in the interior using stochastic structural design. The dual mirror substrate exhibits a mass reduction of 65 %. After AM, cleaning, and mechanical fabrication of reference and mounting surfaces, the mirrors were processed using an established manufacturing chain for metal mirrors, including precision diamond turning and magnetorheological finishing. A final shape deviation of < 100 nm peak-to-valley on a single mirror was achieved and the measured roughness is < 2 nm in a measurement area of $140 \times 110 \mu\text{m}^2$.

The primary telescope housing was derived from a conventional lightweight design, which is mass reduced by cutting techniques. The new design was generated by topology

1 **Montiertes System mit topologieoptimiertem Gehäuse.** |
Integrated assembly with topology optimized frame.

2 **Detailaufnahme.** | Detail shot.

Das ursprüngliche Gehäuse wurde ausgehend von einem klassischen Design modelliert, welches durch Fräsen konventioneller Leichtgewichtsstruktur massereduziert wurde. Das neu generierte Gehäuse wurde durch eine Topologieoptimierung erzeugt, wodurch das Verhältnis von Steifigkeit zu Masse verdoppelt werden konnte. Dieses Verhältnis ist ein wichtiger Kennwert für die Beurteilung von mechanischen Bauteilen für Weltraumanwendungen, da auf der einen Seite die Masse ein wichtiger Designtreiber ist, andererseits auch die hohen mechanischen Lasten beim Raketenstart überstanden werden müssen. Hierfür ist es erforderlich, dass sich die Eigenfrequenzen außerhalb des Hauptanregungsbereiches der Trägersysteme befinden. Die Übereinstimmung des numerischen Modells wurde mit Hilfe von Shaker-Versuchen verifiziert. Die Simulation zeigt hier eine erste Resonanzfrequenz von 1979 Hz, was durch einen Vibrationstest mit einer gemessenen Frequenz von 1965 Hz bestätigt wurde.

optimization, which led to a nearly doubled stiffness-to-mass ratio. This parameter is an important value to evaluate mechanical parts for space applications. Mass is the main factor in the design phase, while the stiffness also must be optimized to sustain high loads during launch. Eigenfrequencies of the equipment have to differ significantly from the main excitations generated by the launch vehicle. Numerical simulations of the system were verified by shaker tests. The simulated first eigenfrequency measures 1979 Hz, which was confirmed by mechanical vibration tests that yielded a frequency of 1965 Hz.

AUTHORS

Henrik von Lukowicz

Enrico Hilpert

Nils Heidler

CONTACT

Dr. Nils Heidler

Phone: +49 3641 807-379

nils.heidler@iof.fraunhofer.de

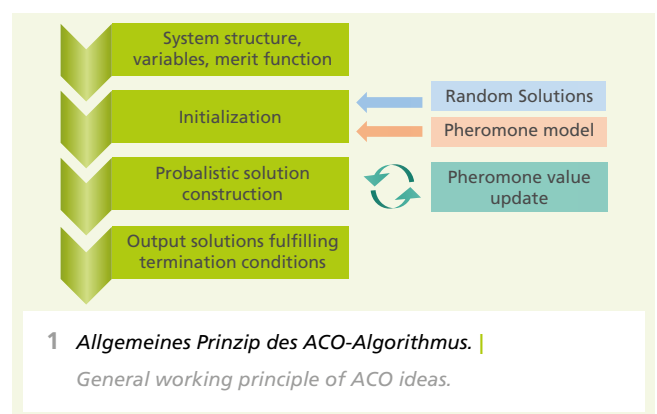


AMEISENSTAAT – OPTIKDESIGNOPTIMIERUNG

ANT COLONY OPTIMIZATION IN LENS DESIGN

Reale Aufgaben im Optikdesign sind in der Regel zu komplex, um analytisch gelöst werden zu können. Daher werden hier numerische Methoden der Optimierung eingesetzt. Am weitesten verbreitet ist dabei die Methode der gedämpften Quadrate (DLS – damped least squares), die Vorteile in der Konvergenzgeschwindigkeit und deterministischen Minimumsuche hat. Die Lösungen hängen aber stark vom gewählten Startpunkt ab und der Algorithmus kann sich in lokalen Nebenminima verfangen. Daher ist es attraktiv, durch die Biologie inspirierten Verfahren der Schwarmintelligenz auf diese Probleme anzuwenden. Hier wurde insbesondere ein Algorithmus auf optische Designprobleme angewendet, der das Verhalten eines Ameisenstaates und seiner Bewohner nachbildet. Die Kommunikation zwischen den Ameisen erfolgt dabei über Duftstoffe oder Pheromone, die damit ihre Erfahrungen auf andere Individuen übertragen können. Es existieren verschiedene Modelle für entsprechende Algorithmen, hier wurden der ACO- und der API-Ansatz getestet, beide eignen sich gut für die typischen Problemstellungen im Optikdesign. Die Methoden wurden in Matlab implementiert, für das Raytracing und die Qualitätsbewertung wurde das kommerzielle Programm OpticStudio eingesetzt. Die wesentliche Idee des Algorithmus ist in Abbildung 1 skizziert. Zufällig erzeugte Startlösungen mit guter Qualität werden mit höherer Wahrscheinlichkeit weiterverfolgt, entsprechend werden die Duftstoff-Variablen gesetzt. Gefundene vorteilhafte Lösungen, die den Randbedingungen genügen, ändern die Landkarte der Duftstoffe und werden zur Lösungsmenge hinzugefügt. Die Suche wird abgebrochen, wenn die Abbruchkriterien erfüllt sind. Als Testbeispiel für die Methode ist hier ein einfaches System aus zwei Linsen betrachtet. Beide Ameisen-Algorithmen finden verschiedene attraktive Lösungen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit. Einige interessante Ergebnisse sind in Abbildung 2 gezeigt.

Real optical design tasks are usually too complex for analytical solutions and therefore need numerical approaches for optimization. As the most widely used optimization algorithm in optical design, the damped least square (DLS) method is advantageous due to its fast convergence and deterministic optimization path. However, the result is strongly dependent on the initial system and problematic when it is stuck in a local minimum in the searching space. Therefore, a biology intelligence-based algorithm – ant colony optimization (ACO) – is implemented and tested for optical design tasks. Nowadays, there are several different ideas about continuous ACO algorithms categorized by different pheromone models, which indirectly determine the ants' movements. Based on implementations and case studies, two of the ACO ideas, namely mACO_r and API, are proved to work well for optical design. The algorithms are implemented in MATLAB and the optical design tool OpticStudio is utilized for performance assessment. The general optimization process is illustrated in Figure 1. The initialization includes both the randomly generated solutions and a given pheromone model. All the variables of a new solution are generated simultaneously



Die Spotdiagramme geben die Qualität der gefundenen Lösungen an. Besonders interessant sind im Optikdesign auch diskrete Optimierungen, da die Auswahl von Gläsern keine kontinuierlichen Variablen zulässt. Es wurde gezeigt, dass sich beide Algorithmen für diese spezielle Problemstellung sehr gut eignen und deutliche Vorteile gegenüber dem DLS-Verfahren haben.

Im Gegensatz zum konventionellen DLS-Algorithmus hängen die Ergebnisse der ACO-Methode nicht von den Startwerten ab, das Verfahren hat daher Eigenschaften einer globalen Suche. Die Rechenzeit ist allerdings ein Nachteil der neuen Methode – die wahrscheinlichkeitsorientierte Suche erfordert viele Versuche und konvergiert langsam. Was aber sehr attraktiv ist und ein Thema zukünftiger Untersuchungen sein wird, ist die Möglichkeit, auch strukturelle Änderungen am System automatisch in die Methode aufzunehmen. Das kann beispielsweise bedeuten, dass der Algorithmus die für eine Fragestellung notwendige Anzahl von Linsen selbstständig ermittelt. Ferner sollte es möglich sein, das Verfahren deutlich zu beschleunigen, indem Wissen und praktische Erfahrungen aus dem Optikdesign die Entscheidungen im Algorithmus positiv beeinflussen. Dadurch könnten sinnlose Versuche unterbunden und die Effizienz des Algorithmus nachhaltig verbessert werden. Dies sind Aspekte für zukünftigen Untersuchungen.

within the variable intervals allowed, according to the pheromone value. All the newly generated solutions also help to update the pheromone map. This loop continues until the output solution fulfills the termination criteria.

As a test for the basic optimization function, a simple optical system composed of two lenses was considered. With a certain number of repetitions of the optimization procedure, both algorithms find various local minima. Part of the different solutions, as well as the solution appearance probabilities, are listed in Figure 2. The spot diagrams are indicating the quality of the found solutions.

Both of the ACO ideas are also feasible for discrete glass optimization, for which mACO_R can find better solutions than DLS global optimization results. Compared with the conventional DLS method, the ACO method is not influenced by the initial system. The execution time mostly depends on the variable number, algorithm parameters, and data exchanging efficiency. Similar to real optical design procedure, structural change and aberration analysis can be tackled during optimization when more physical knowledge or practical experience is taken into consideration. For example, this means the algorithms determine the necessary number of lenses automatically. Therefore, it provides a hint that there is much space to improve the efficiency of the algorithm.

Solution	Layout and merit function value	Spot diagramm (scale: 4mm)	mACOR solution possibilities (%)	API solution possibilities (%)
a	1.92e-5 		5.59	9.89
b	3.65e-5 		1.19	1.19
c	5.17e-5 		4.33	5.00
d	5.73e-5 		2.97	6.21
e	8.84e-5 		0.24	0.57
...				

2 Von ACO- und API-Algorithmen gefundene Lösungen. |
Solutions found by different algorithms.

AUTHORS

Ziyao Tang
Herbert Gross

CONTACT

Ziyao Tang
Tel +49 36419-47994
ziyao.tang@uni-jena.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-Ultraviolett- bis zum Infrarot-Spektralbereich. Dabei wird der gesamte Prozess von Design und Herstellung bis hin zur Analyse und Charakterisierung für vielfältigste Anwendungen abgedeckt.

Das Fraunhofer IOF ist weltweit führend in der Entwicklung innovativer Entspiegelungen sowie reflektiver Hochleistungsschichten. 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 anorganischer Beschichtungen auf nano-/mikrostrukturierten Substraten wie auch auf Freiformen und stark gekrümmten Flächen.

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 2019 in diesem Geschäftsfeld abgeschlossenen Projekte zeigen in den nachfolgenden Beiträgen eine große Bandbreite: hochreflektierende als auch entspiegelnde Schichten, hochfeste Schichten für Laseranwendungen sowie Aufdampf-Metallschichten.

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 anti-reflective coatings and reflective high-performance coatings. In addition, Fraunhofer IOF offers solutions for high-quality anti-reflex systems on flat or curved glass and plastic surfaces, as well as anti-reflective coatings on sapphire or diamond. Atomic layer deposition (ALD) as a high-performance coating technology enables conformal thin-film growth of inorganic coatings on nano- or micro-structured substrates as well as on freeforms and strongly curved surfaces.

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

The projects completed in 2019 in this business field cover a wide range in the following articles: highly reflective as well as anti-reflective coatings, high-strength coatings for laser applications, and vapor-deposited metal coatings.

LEFT *Mittels Atomlagenabscheidung beschichtete komplexe Substrate. | Atomic layer deposition coatings on complex substrates.*



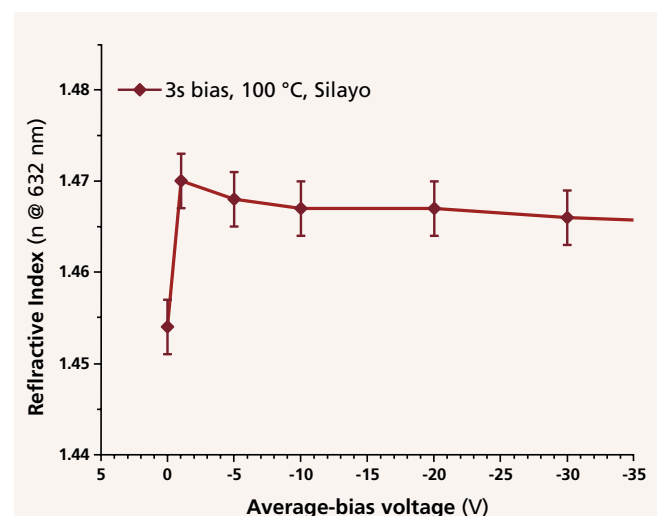
HfO₂ UND SiO₂ ALD-SCHICHTEN FÜR LASERANWENDUNGEN

HfO₂ AND SiO₂ ALD COATINGS FOR LASER APPLICATIONS

Der Einsatz von stark gekrümmten Linsen in Lasersystemen ist von steigender Bedeutung. Viele dieser Linsen können jedoch nicht hinreichend funktionalisiert werden, da etablierte Beschichtungsverfahren Schichtdickengradienten erzeugen. Atomlagenabscheidung (ALD) ermöglicht eine gleichmäßige und strukturtreue Abscheidung dünner Schichten mit präziser Schichtdickenkontrolle, um eine sehr hohe optische Performance entlang der Oberfläche solcher optischen Komponenten zu gewährleisten. Dünne funktionale optische ALD-Schichten und nanoporöse SiO₂-Schichten wurden u. a. für breitbandige und winkelunabhängige Entspiegelungen /1/ oder als Einzelschicht-entspiegelungen /2/ mit sehr hohen Laserzerstörungsschwellen nachgewiesen.

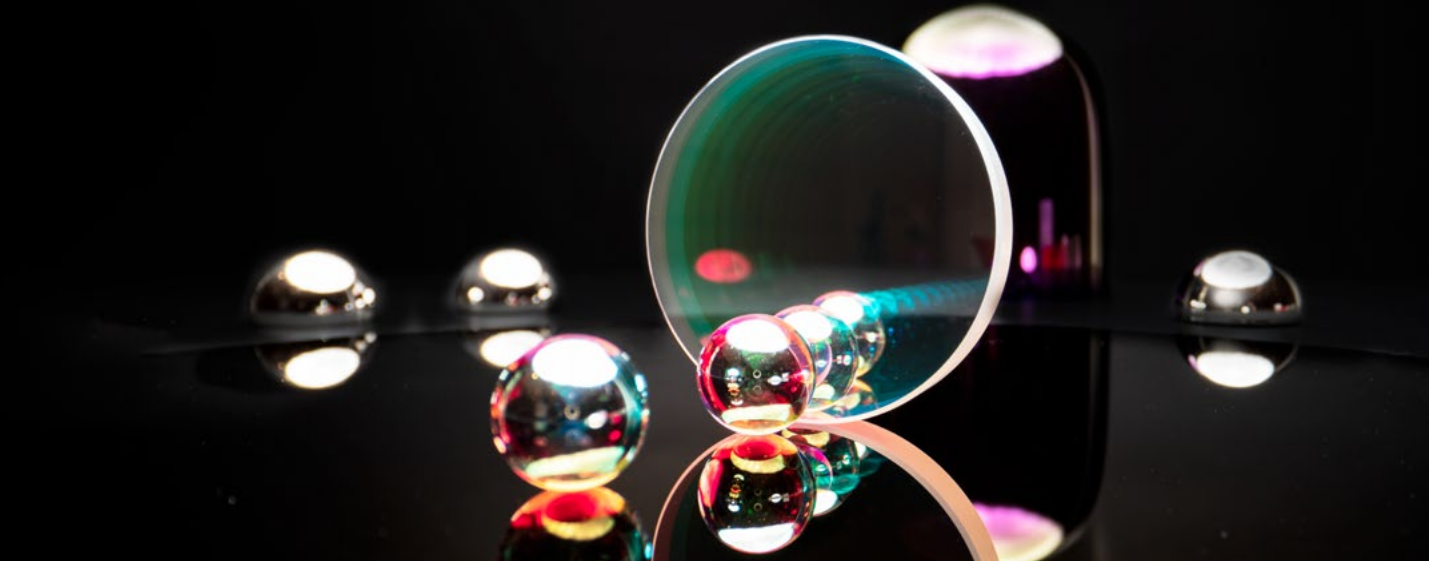
Am Fraunhofer IOF wurde eine großflächige plasma-unterstützte ALD (PEALD) Anlage für die Abscheidung von Oxiden und Nitriden auf Substraten mit einem Durchmesser von 330 mm und einer Höhe von bis zu 150 mm installiert. Es wurden bereits SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ und HfO₂-Schichten mit hoher Uniformität bei niedrigen Abscheidungstemperaturen (100 °C) entwickelt. Zudem sind die optischen und mechanischen Eigenschaften der Schichten mittels einer

Interest in applying strongly curved lenses to laser systems is increasing. However, many of these lenses cannot be functionalized properly because established coating technologies lead to thickness gradients along the surface of the lens. Atomic layer deposition (ALD) allows uniform and conformal thin films with a precise thickness control on arbitrarily shaped optics to achieve a high optical performance along their surface. Thin ALD functional optical coatings and nanoporous SiO₂ layers have been demonstrated as broadband and wide-angle antireflection



1 Atomlagenabscheidung (ALD) kann bei der Beschichtung optischer Komponenten wie z.B. Asphären, konvexen und konkaven Linsen oder Kugellinsen zum Einsatz kommen. | Atomic layer deposition (ALD) can be used for coating optical components such as aspheres, convex and concave lenses, or ball lenses.

2 Brechungsindex der SiO₂-ALD-Schichten in Abhängigkeit der Vorspannung (von 0 V bis -30 V). | Refractive index of SiO₂ ALD thin films as a function of the bias voltage.



Vorspannung maßgeschneidert. Abbildung 2 zeigt den Brechungsindex der SiO_2 -Schichten ohne und mit Vorspannung /3/. Schichten mit einer deutlich höheren Qualität sind schon bei geringer Vorspannung möglich.

Ein Multilagen-Interferenzschichtsystem wurde zur Entspiegelung von Quarzsubstraten bei 1064, 532, 355 und 266 nm Wellenlänge für Laseranwendungen entwickelt.

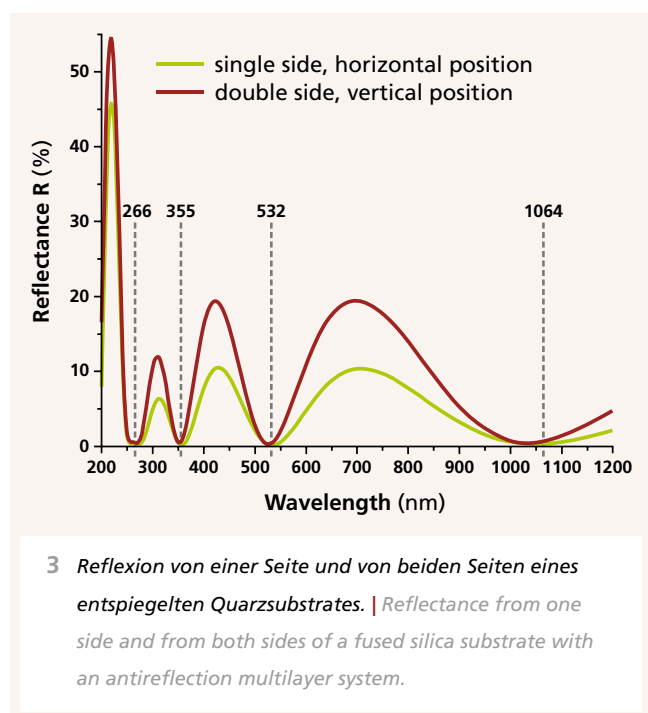
Literatur / References

- /1/ K. Pfeiffer, L. Ghazaryan, U. Schulz, A. Szeghalmi: ACS Appl. Mater. Interfaces 11, 21887-21894 (2019). Cover Art
- /2/ L. Ghazaryan, Y. Sekman, S. Schröder, C. Mühlig, I. Stevanovic, R. Botha, M. Aghaee, M. Creatore, A. Tünnermann, A. Szeghalmi: Adv. Eng. Mater. 1801229, 1-10 (2019).
- /3/ V. Beladiya et al.: Effect of an electric field during the deposition of silicon dioxide thin films by plasma enhanced atomic layer deposition, Nanoscale 12(3), 2089-2102 (2020).

coatings or as single-layer antireflection coatings with a high laser-induced damage threshold.

At Fraunhofer IOF, a large-scale plasma-enhanced ALD (PEALD) tool for the deposition of oxides and nitrides on substrates with a diameter of up to 330 mm and a height up to 150 mm has been installed. Thin films of SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , and HfO_2 can be grown with very good uniformity at a low deposition temperature (100 °C). Additionally, the optical and mechanical properties of the coatings can be tailored by applying a bias voltage. Figure 2 shows the refractive index of SiO_2 thin films as a function of the applied bias voltage /3/. Coatings with superior quality are obtained already at a very low bias voltage.

A multilayer interference coating is demonstrated for antireflection coatings of fused silica substrates at 1064, 532, 355, and 266 nm wavelength for laser applications.

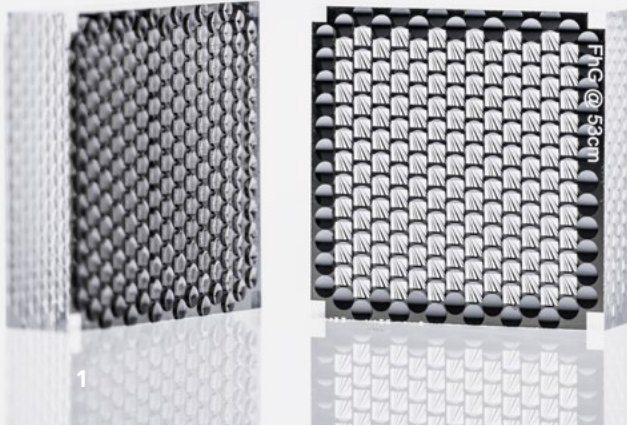


AUTHORS

Vivek Beladiya
Margarita Lapteva
Adriana Szeghalmi

CONTACT

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



AR-PLAS® ZUR ENTSPIEGELUNG 3D-GEDRUCKTER HYBRIDPOLYMERE AR-PLAS® ANTIREFLECTION OF 3D-PRINTED HYBRID POLYMERS

Die Fertigung hochindividualisierter transparenter Komponenten für die Optik steht, gerade im Hinblick auf die verbesserten Möglichkeiten im Bereich der additiven Fertigung, immer mehr im Fokus. Vor allem der Druck makroskopischer Optiken stellt bis heute eine große Herausforderung dar. Am Fraunhofer IOF werden mit dem Tintenstrahl Druck von Ormoceren® bereits gute Ergebnisse für hochtransparente Mikro- und Makrooptiken erzielt (Abb. 1) /1/.

Neben dem Druck formgenauer Volumenkörper ist die optische Qualität entscheidend durch die nachträgliche Funktionalisierung der Oberfläche gekennzeichnet. Durch Ätzen im Niederdruckplasma erzeugte stochastische Nanostrukturen (AR-plas®) zeigen bereits für verschiedene Polymertypen eine hervorragende Entspiegelungswirkung mit Transmissionswerten > 98 % im visuellen Spektralbereich /2/.

Neu untersucht wurden die für den 3D-Druck eingesetzten organisch-anorganischen Hybridpolymere, basierend auf dem Grundmaterial OrmoComp®. OrmoComp® ist im gesamten visuellen Spektralbereich transparent und zeigt durch den hohen anorganischen Anteil im Verbund eine erhöhte chemische, mechanische und thermische Stabilität im Vergleich zu rein organischen Materialien. Mittels AR-plas®-Technologie wurde eine breitbandige

Additive manufacturing exhibits many advantages compared to conventional manufacturing because it enables maximum freedom of design, high individuality, and sustainability. There is a growing interest to extend this to the field of optics, more precisely, to fabricate highly individualized transparent optical components. Until now, the printing of macroscopic optics is still an especially challenging requirement. Fraunhofer IOF has already achieved good results with inkjet printing technology of Ormocers® for highly transparent micro and macro optical elements (Fig. 1) /1/. In addition to shape accuracy, the resulting optical quality is affected strongly by the final functionalization of the surface. Plasma etching of various polymer types has shown excellent antireflective properties with a transmittance > 98 % (VIS) by the formation of stochastic nanostructures (AR-plas®) /2/. The latest investigations have focused on the surface functionalization of organic-inorganic hybrid polymers based on OrmoComp®, which are used for 3D-inkjet printing. OrmoComp® is transparent in the visible spectral range and shows – caused by its high inorganic proportion – an increased chemical, mechanical, and thermal stability compared to pure organic materials. With the help of the AR-plas® technology, a broadband antireflective structure could be realized on surfaces of OrmoComp®-derivates, whereas pure OrmoComp® samples did not show any measurable change of transmittance. After etching the printed samples with an argon/oxygen plasma for various etching

1 Tintenstrahlgedruckte optische Formkörper aus einem OrmoComp®-Derivat. |

Inkjet printed optical components made from OrmoComp® derivative.

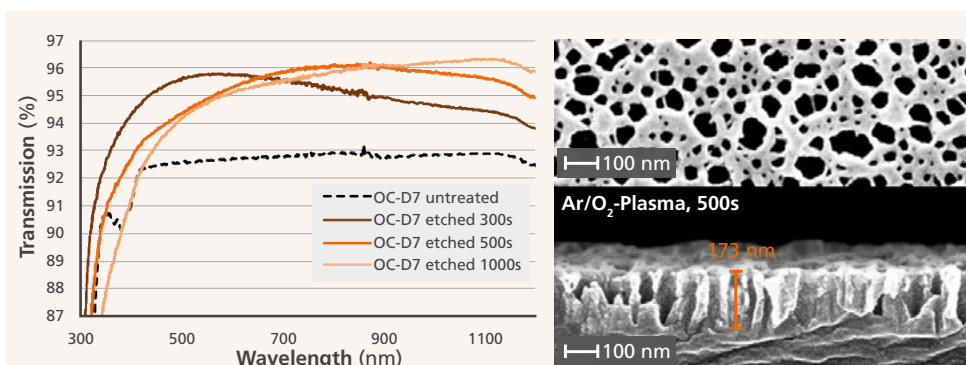
Antireflexstruktur an OrmoComp®-Derivaten realisiert, wohingegen die reine OrmoComp®-Formulierung keine messbare Veränderung aufweist.

Die gedruckten Oberflächen wurden mittels Argon/Sauerstoff-Plasma und variierender Dauer geätzt. Die OrmoComp®-Derivate bilden durch den Plasmaeintrag eine schwammartige Nanostruktur aus, wobei Strukturtiefe und Porengröße mit der Ätzzeit korrelieren. Es wurde nachgewiesen, dass die Strukturausbildung primär auf dem Abbau der Organik im Hybridpolymer während des Plasmaätzens basiert. Demzufolge besteht die strukturierte Oberfläche überwiegend aus einer anorganischen Si-O-Matrix. Über die Variation der Beschichtungsparameter können Strukturtiefe und Porengröße präzise eingestellt werden. Hervorragende Antireflexeigenschaften entstehen bei Strukturturen von ca. 100 nm für den visuellen Spektralbereich und ca. 250 nm für den nahen Infrarotbereich. Durch die Kontrolle der Strukturausbildung sind angepasste Antireflexeigenschaften vom VIS bis NIR-Bereich auf gedruckten Oberflächen möglich (Abb. 2).

times, stochastic "sponge-like" nanostructures were observed. Structure depth and pore size are correlated with etching time. It was proved that the structure formation is primarily based on a degradation of carbon-hydrogen compounds during the etching process. Thus, the structured part consists mostly of an inorganic Si-O network. With precise control of the etching parameters, the structure depth and pore size can be varied. A structure depth of approx. 100 nm results in good antireflective properties for the visible range whereas deeper structures of approximately 250 nm are necessary for the near-infrared range. By controlling the structure formation, an adjustable antireflective performance from the visible to the near-infrared range can be realized on printed surfaces (Fig. 2).

References / Literatur

- /1/ E. Beckert, F. Kemper, S. Sauva, M. Reif:
Additive Manufacturing of Optical Components, Printing for
Fabrication Proceedings, pp. 182-185 (4) (2018).
- /2/ U. Schulz et al.: Antireflection of transparent polymers by
advanced plasma etching procedures, Optics Express
15 (20), pp. 12108-13113 (2007).



2 Nanostrukturierte Oberfläche (rechts) und Transmissionsspektren nach unterschiedlichen Ätzzeiten (links) des OrmoComp®-Derivats OC-D7. | Nanostructured surface (right) and transmission spectra after different etching time (left) of the OrmoComp® derivative OC-D7.

AUTHORS

Sabrina Wolleb
Falk Kemper
Erik Beckert
Ulrike Schulz

CONTACT

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



HOCHREFLEKTIERENDE, STREULICHTARME VUV-REFLEKTORSCHICHTEN HIGH-REFLECTIVE, LOW-SCATTER VUV REFLECTOR LAYERS

Mit dem Hubble Telescope und zukünftig mit dem James Webb Telescope (ab März 2021) operieren Weltraum-Teleskope im VIS- und im IR-Spektralbereich. Um zukünftig den für die Astrophysik ebenfalls wichtigen ultravioletten Wellenlängenbereich zu erfassen, wird das Large UV Optical Infrared Surveyor geplant /1/. Dieser Spektralbereich ist nicht mit erdgebundenen Teleskopen zugänglich und die starke Wellenlängenabhängigkeit von gestreutem Licht ($1/\lambda^4$) führt schnell zu signifikanten Verlusten in optischen Elementen. Die Realisierung niedrig streuender, hochreflektierender optischer Schichten stellt daher ein Schlüsselement für UV-Teleskope, aber auch für die optische Lithographie /2/ und eine Vielzahl von Metrologieanwendungen dar.

Al-Schichten bieten ein breitbandiges und hohes Reflexionsvermögen bis in den UV-Spektralbereich. Für ein optimales Reflexionsvermögen und geringe Streuverluste bei niedrigen Wellenlängen muss das Schichtwachstum des Aluminiums berücksichtigt werden. Zudem verlangt der Einsatz im VUV-Bereich ($\lambda < 190$ nm) das Aufbringen einer fluoridhaltigen Schutzschicht, um drastische Verluste des Reflexionsvermögens durch Oxidation der Aluminiumoberfläche zu vermeiden.

Am Fraunhofer IOF wurden in den letzten Jahren geschützte Al-Schichten für eine Anwendung bis in den tiefen UV-Bereich entwickelt und optimiert. Durch die Verwendung einer dünnen

With the Hubble Space Telescope and the James Webb Telescope (starting from March 2021), space telescopes shall operate in the VIS and IR spectral range. To capture the ultraviolet wavelength range, which is also important for astrophysics, the Large UV Optical Infrared Surveyor is planned /1/.

This spectral range is not accessible using terrestrial telescopes and the strong wavelength dependence of scattered light ($1/\lambda^4$) quickly leads to significant losses in optical elements. The realization of low-scattering, highly reflective optical layers, therefore, represents a key element not only for UV telescopes but also for optical lithography /2/ and a variety of metrology applications.

Aluminum layers exhibit broadband and high reflectivity down to the UV spectral range. For optimal reflectivity and low stray light losses at lower wavelengths, aluminum film growth must be considered. For applications in the VUV range ($\lambda < 190$ nm), a fluoride-containing protective layer is required to avoid a drastic decrease of reflectivity due to oxidation of the aluminum surface.

At the Fraunhofer IOF in recent years, protected Al layers have been developed and optimized for applications down to the deep UV range. By using a thin seeding layer of titanium between the substrate and the reflective aluminum layer,

1 Optimierte Al-Beschichtungen für eine adaptive Optik zur hochsensitiven Streulichtdetektion. |

Optimized Al layers for adaptive optics for high sensitive light scattering detection.

Vorbekeimungsschicht aus Titan zwischen Substrat und reflektierender Aluminiumschicht wurde der Wachstumsprozess der Aluminiumschicht optimiert. Das breitbandige Reflexionsvermögen im UV-Bereich wurde signifikant erhöht und die Oberflächenrauheit reduziert. Im Vergleich zu herkömmlich hergestellten Aluminiumschichten (ohne Vorbekeimung) konnten die Rauheitswerte mehr als halbiert ($< 0.4 \text{ nm rms}$) und die Reflexion um durchschnittlich 5 % erhöht werden (Abb. 2).

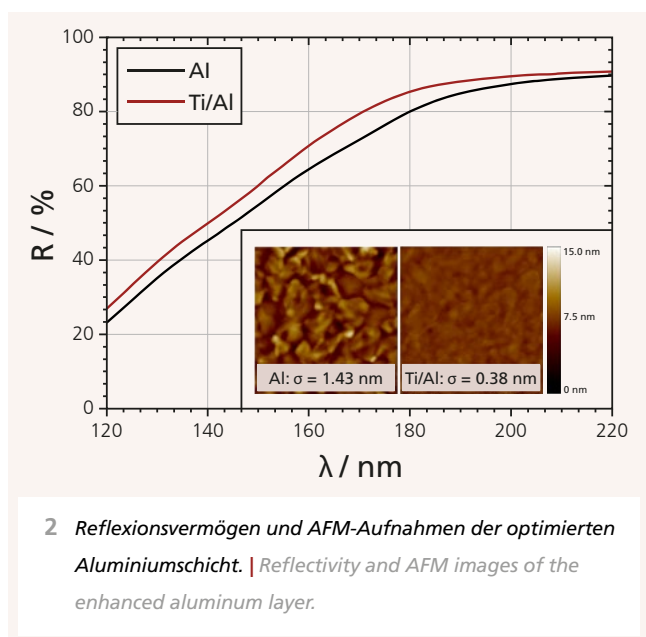
Neben dem erhöhten Reflexionsvermögen und der reduzierten Rauheit konnte eine verbesserte Temperaturstabilität der Aluminiumschichten erzielt werden. Während bei den herkömmlich hergestellten Aluminiumschichten (ohne Vorbekeimung) bei Temperaturen von 225°C bereits eine Umstrukturierung des Aluminiums und eine Erhöhung der Oberflächenrauheit stattfindet, bleibt die optimierte Aluminiumschicht bei diesen Temperaturen unverändert.

the film growth of the aluminum layer has been optimized. Wide-band reflectance in the UV range was significantly increased and surface roughness was reduced. Compared to conventionally produced aluminum layers (without seeding layer), the roughness values could be reduced by a factor of more than two ($< 0.4 \text{ nm RMS}$) and the reflection increased by an average of 5 % (Fig. 2).

In addition to the enhanced reflectance and the reduced roughness, increased temperature stability of the aluminum layers could be observed. In the case of the conventionally produced aluminum layers (without seeding layer) at temperatures of 225°C , recrystallization of the aluminum and an increase in surface roughness already appears, while the optimized aluminum layer properties remain stable at these temperatures.

References / Literatur

- /1/ The LUVOLIR – Final Report, National Aeronautics and Space Administration, August 2019.
- /2/ S. Schröder, T. Herfurth, M. Trost, and A. Duparré: Angle resolved scattering and reflectance of extreme-ultraviolet multilayer coating: measurement and analysis, Appl. Opt. 49,1503-1512 (2010).



AUTHORS

Sven Stempfhuber
Stefan Schwinde
Peter Munzert
Marcus Trost

CONTACT

Dr. Stefan Schwinde
Phone +49 3641 807-297
stefan.schwinde@iof.fraunhofer.de

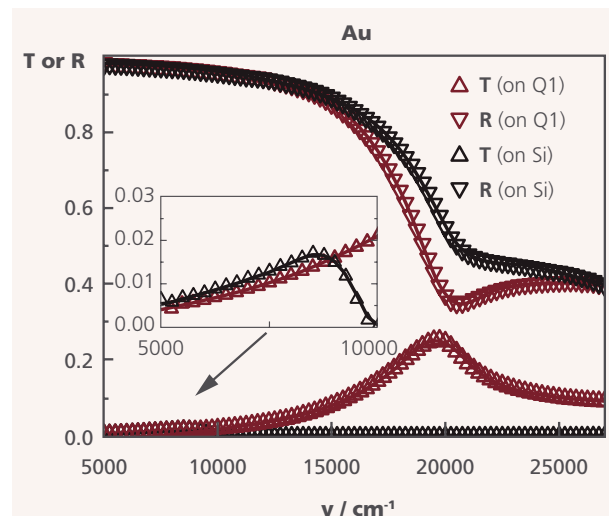
OPTISCHE EIGENSCHAFTEN ULTRADÜNNER AUFDAMPF-METALLSCHICHTEN

OPTICAL PROPERTIES OF ULTRATHIN EVAPORATED METAL FILMS

Ultradünne Metallschichten (mit Schichtdicken kleiner 50 nm) spielen im optischen Oberflächen- und Schichtdesign oft eine entscheidende Rolle. Sie sind beispielsweise Bestandteil von Schmalbandfiltern mit breitem Blockbereich ebenso wie von Architekturglasbeschichtungen. In verschiedenen Spielarten der oberflächenverstärkten optischen Spektroskopie werden ultradünne Edelmetallschichten auch in Otto- bzw. Kretschmar-Raether-Kopplergeometrien zur Anregung von propagierenden Oberflächenplasmon-Polaritonen genutzt, um lokale Feldstärkeüberhöhungen im Oberflächenbereich zu erzielen. Die erzielbare elektrische Feldstärke im Oberflächenbereich hängt dabei kritisch von den optischen Konstanten der ultradünnen Metallschicht ab /1/.

Die Modellierung ultradünner Metallschichten erweist sich aber in der Praxis als schwierig. Neben der mathematisch schwer erfassbaren Realstruktur der Schichten wird hier insbesondere der sogenannte Weglängeneffekt bedeutsam, demzufolge sich die optischen Eigenschaften von Metallschichten ändern, wenn die Schichtdicke kleiner als die mittlere freie Weglänge der Ladungsträger im bulk-Metall wird. Der in der Drude-Funktion fixierte Dämpfungsparameter wird dann schichtdickenabhängig und steigt streng monoton mit sinkender Schichtdicke. Kürzlich gelang am Fraunhofer IOF in diesem Zusammenhang die realistische Beschreibung der optischen Eigenschaften ultradünner Gold- und Kupferschichten, was entscheidend für die Modellierung und Realisierung von optischen Schichtsystem mit ultradünnen Metallschichten ist. Das genutzte Dispersionsmodell ergab sich dabei durch Verschmelzung folgender Modellansätze /2/:

Ultrathin metal films (i.e. with film thicknesses smaller than 50 nm) are of utmost importance in optical surface and coating design. They are an integral part of narrowline bandpass filters with broad blocking regions as well as of coatings for architectural glasses. They are in use in Otto- or Kretschmar-Raether-couplers for excitation of propagating surface plasmon modes, to achieve giant local field strength enhancement for surface-sensitive optical spectroscopy purposes. The maximum field strength that may be achieved this way crucially depends on the optical constants of the metal film /1/.



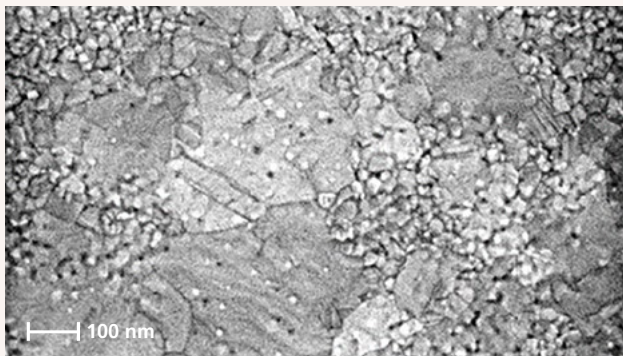
1 **Transmissions- und Reflexionsvermögen einer ca. 37 nm dicken Goldschicht.** | Transmission and reflection spectra of a 37 nm thick gold film.

- Beta-verteilte Lorentzoszillatoren (β_{do} -Modell) zur Berücksichtigung des Beitrags gebundener Elektronen
- Drude-Funktion zur Berücksichtigung des Beitrags freier Elektronen
- Schichtdickenabhängiger Drude-Dämpfungsparameter für die Dynamik der freien Elektronen

Abbildung 1 zeigt in diesem Zusammenhang exemplarisch den Fit des bei nahezu senkrechtem Lichteinfall gemessenen Transmissions- (T) und Reflexionsvermögens (R) einer ca. 37 nm dicken Goldschicht auf Quarzglas- (Q1) bzw. Silizium- (Si) Substraten. Symbole stellen hier die experimentellen Werte dar, die durchgezogenen Linien repräsentieren das Ergebnis der Modellrechnung. Abbildung 2 vermittelt einen Eindruck der Oberflächenbeschaffenheit der durch Aufdampfen präparierten Goldschicht (rasterelektronenmikroskopische Aufnahme).

Literatur / References

- /1/ H. Raether: Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings, Springer (1988).
/2/ O. Stenzel et al.: Coatings 9, 181 (2019); doi:10.3390/coatings9030181.



2 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche einer ca. 37 nm dicken Goldschicht auf Quarzglas. | Scanning electron micrograph of the surface of a 37 nm thick gold film on fused silica.

However, modeling ultrathin metal films is a complicated task in practice. In addition to the complicated real structure of the films, there is the mean free path effect that needs to be considered during modeling. It leads to changes in the optical properties of metal films whenever the film thickness becomes smaller than the mean free path of the charge carriers in the bulk material. Essentially, it results in a thickness-dependent Drude damping parameter, i.e. the damping parameter increases in a strongly monotonous manner when the film thickness is decreased. Recently, at Fraunhofer IOF, a realistic description of the optical properties of ultrathin gold and copper films was developed, which is essential for developing optical coating solutions with suchlike metal films. The underlying dispersion model is a merger of /2/:

- Beta-distributed Lorentzian Oscillators (β_{do} -Model) to account for the optical response of bound electrons
- Drude-Function to account for the optical response of free electrons
- A thickness-dependent Drude damping parameter for describing the dynamics of free electrons

In this context, Figure 1 shows the fit of near-normal incidence transmission (T) and reflection (R) spectra of an approximately 37 nm thick gold film on fused silica (Q1) and silicon (Si) substrates. Symbols represent experimental data, the lines correspond to the model calculation. Figure 2 provides a view of the surface morphology of the evaporated gold film as obtained from scanning electron microscopy.

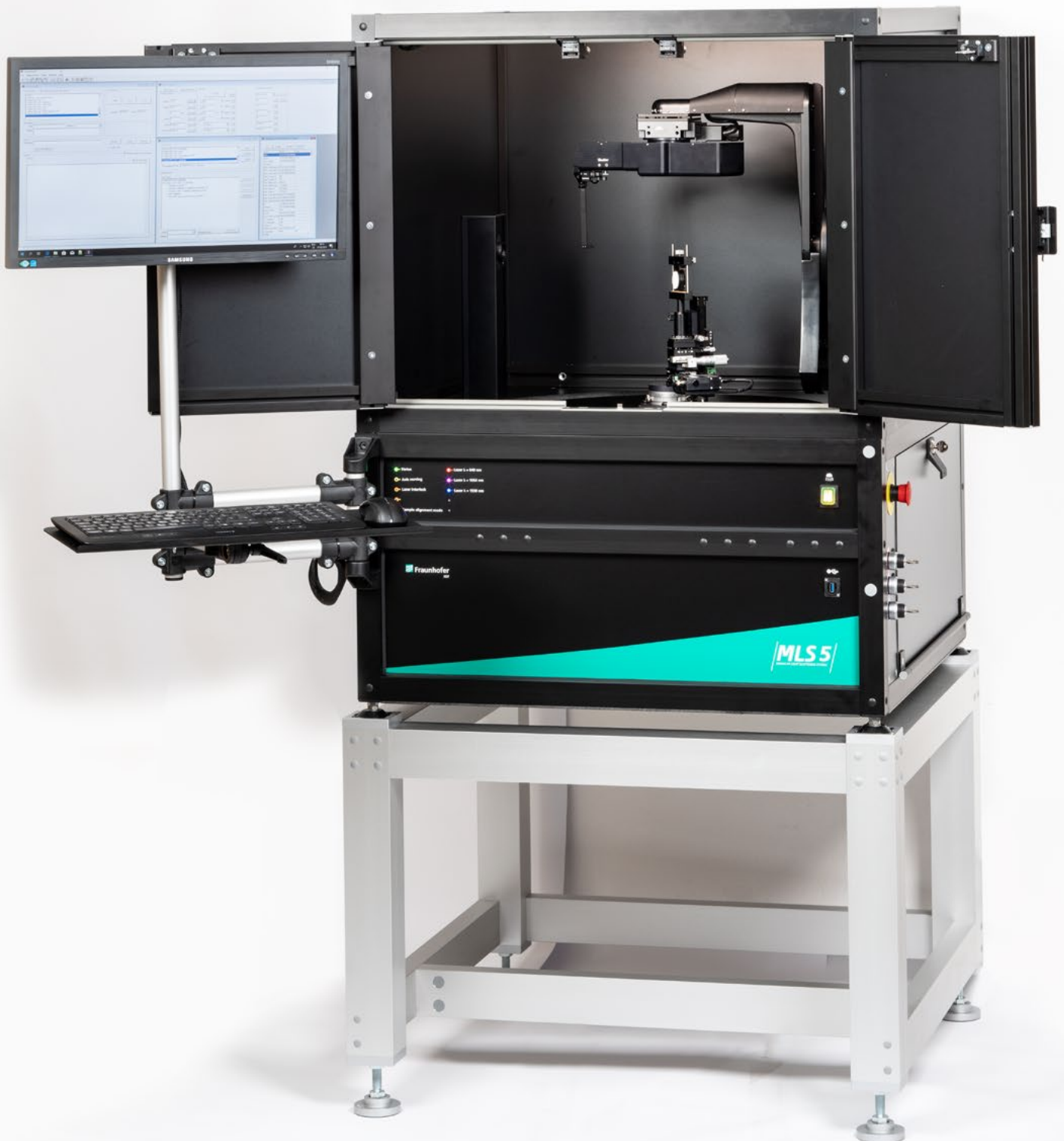
AUTHORS

Olaf Stenzel
Steffen Wilbrandt

CONTACT

Dr. Olaf Stenzel
Phone +49 3641 807-348
olaf.stenzel@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



PHOTONISCHE SENSOREN UND MESS-SYSTEME / PHOTONIC SENSORS AND MEASURING SYSTEMS

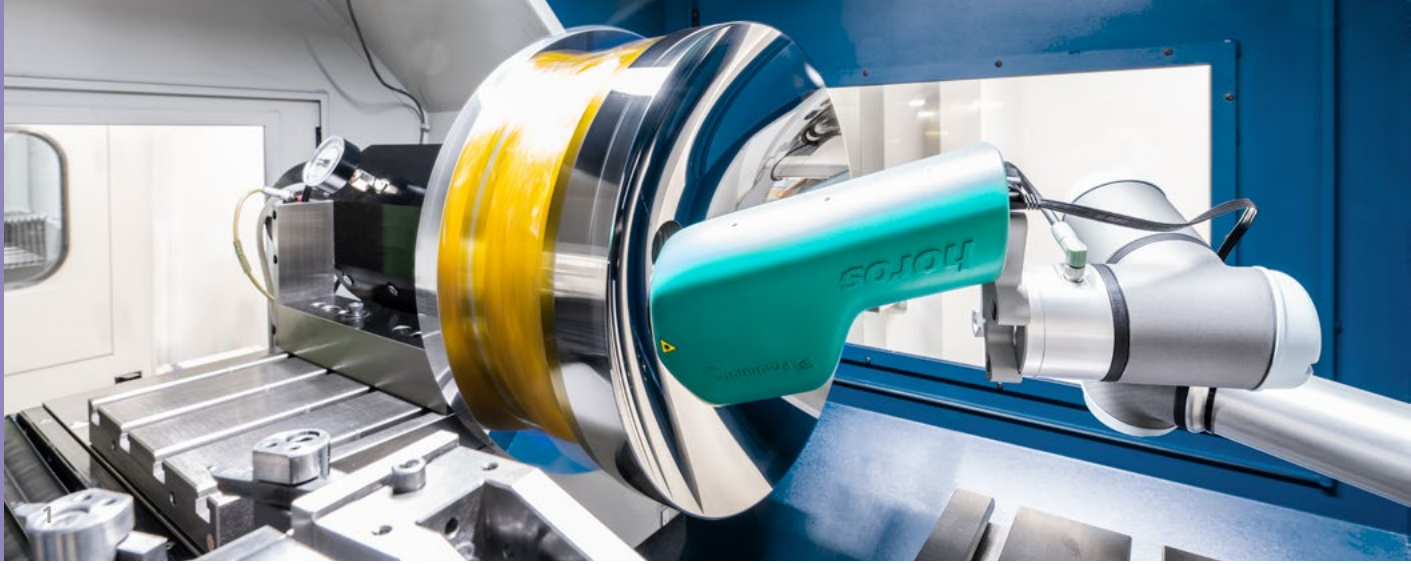
Das Fraunhofer IOF entwickelt optische und optoelektronische Mess- und Sensorsysteme. Die Forschungsarbeiten umfassen neuartige Messmethoden, Sensorprinzipien und Auswerteverfahren sowie Systemlösungen. Das Fraunhofer IOF nutzt modernste optische und miniaturisierte bzw. mikrooptische Komponenten sowie Sende- und Empfangseinheiten, Projektionstechniken, Lichtquellen, Softwaretechnologien und Rechnerarchitekturen. Schwerpunkte sind hierbei Lösungen für 3D-Messsysteme für Anwendungen in der Produktion und Medizin, basierend auf Verfahren der Muster- und Streifenprojektion; Systeme zur Schicht- und Oberflächencharakterisierung (streulichtbasierte Messsysteme zur Rauheitsbestimmung und Mikro- und Nanostrukturvermessung); und ultrakompakte multi-kanalige mikrooptische Bilderfassungssysteme auf der Grundlage bio-inspirierter Ansätze (facetvision), welche für mobile Endgeräte oder Anwendungen im Automobilbereich genutzt werden können.

Viele der genannten Themen wurden 2019 bearbeitet und sind in den nachfolgenden Beiträgen dargestellt. Dazu zählen beispielsweise Streulichtmesssysteme nach Maß, Hochgeschwindigkeitssysteme für die 3D-Thermographie, 3D-Scanner für die Digitalisierung von Tatortspuren oder Kulturgütern sowie für therapeutische Einsätze in Verbindung mit Musik, und Arrays von Mikrospektrometern.

Fraunhofer IOF develops optical and optoelectronic 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. The focus is on solutions for 3D measuring systems for applications in production and medicine, based on methods of pattern and fringe projection. Furthermore, systems for layer and surface characterization (straylight-based measuring systems for roughness determination or micro and nanostructure measurement) as well as ultra-compact, multi-channel, micro-optical imaging systems based on bio-inspired approaches (facetvision), which can be used for mobile end devices or automotive applications, are at the center of Fraunhofer IOF's activities.

Many of the topics mentioned have been worked on in 2019 and are presented in the following articles. These include customized scattered light measurement systems, high-speed systems for 3D thermography, 3D scanners for digitizing traces of crime scenes or cultural artifacts and for therapeutic applications in conjunction with music, and arrays of microspectrometers.

LEFT *Goniometerbasiertes Streulichtmesssystem zur Charakterisierung optischer Elemente im visuellen und nah-infraroten Spektralbereich. | Goniometric based light scattering system for characterization of optical elements at visible and near-infrared wavelengths.*



STREULICHTMESSSYSTEME NACH MASS CUSTOMIZED LIGHT SCATTERING TOOLS FOR EVERY APPLICATION

Für die Fertigung optischer Komponenten als zentrale Bestandteile eines jeden optischen Systems ergeben sich immer komplexere und neue Anforderungen aus den aktuellen Entwicklungen in Industrie und Forschung. Große optische Freiformkomponenten oder nanostrukturierte, konform beschichtete Oberflächen sind nur zwei Beispiele dafür. Neben den reinen Funktionalitätsansprüchen sind dabei Kosten, Fertigungszeiten und Qualität von gleicher Bedeutung. Dies geht einher mit einer prozessnahen, umfassenden und gleichzeitig detaillierten Charakterisierung.

Am Fraunhofer IOF wurden daher in den letzten Jahren vielfältige Streulichtmesssysteme und -sensoren sowie dazugehörige maßgeschneiderte Analysemethoden entwickelt. Erstere decken einen ausgedehnten Spektralbereich von 13,5 nm bis 10,6 μm mittels diskreten Lasern sowie kontinuierlich durchstimmbaren Laserquellen ab. Somit können beispielsweise komplexe optische Filter direkt bei der jeweiligen Anwendungswellenlänge charakterisiert werden ^{/1/}. Die Systeme sind so ausgelegt, dass sowohl kleine Mikrolinsen als auch ausgedehnte Freiformkomponenten mit Abmessungen von über 1 m charakterisiert werden können ^{/2/}. Basierend auf den Design- und Konstruktionsdatensätzen der Optiken können die Oberflächen automatisiert überprüft und hinsichtlich ihrer Homogenität und lokalen Defekten vollflächig beurteilt werden.

Current developments from industry and research place ever more challenging and new requirements on the fabrication of optical components, the primary elements of every optical system. Large optical freeform components and nanostructured surfaces with conformal coatings are only two examples. In addition to the pure functionality requirements, costs, production times, and quality are of equal importance. This goes hand in hand with a process-oriented and comprehensive but also detailed characterization.

Therefore, a large variety of light scattering measurement systems and corresponding tailored analysis methods have been developed at Fraunhofer IOF in recent years. The instruments cover a spectral range from 13.5 nm to 10.6 μm using discrete lasers and continuously tunable light sources. This, for example, enables complex optical filters to be characterized directly at their application wavelength ^{/1/}. The scatterometer systems are designed for the characterization of both small microlenses and extended freeform components with dimensions beyond 1 m ^{/2/}. Based on the design and manufacturing CNC dataset of the optics, the surfaces can be scanned automatically to assess their homogeneity and the distribution of local defects.

For optical imaging systems, near-angle scattering (the light scattered directly around the specular beam directions) is

¹ *In-situ Charakterisierung der Oberflächenrauheit in einer Diamantdrehmaschine mit einem roboterbasierten Streulichtsensor. | In-situ characterization of the surface roughness with robot based light scattering sensor integrated into an ultra-precision diamond turning machine.*

Für abbildende optische Systeme ist die Nahwinkelstreuung, also das direkt um die spekularen Strahlrichtungen gestreute Licht, extrem kritisch. Im letzten Jahr konnten dafür die Charakterisierungsmöglichkeiten weiter verbessert werden, so dass nun Streulichtinformationen selbst bei Winkeln von 0.05° experimentell zugänglich sind, was insbesondere im Bereich des Optikdesigns von großer Bedeutung ist.

Zwei Beispiele für prozessnahe bzw. prozessintegrierbare Systeme sind in den Abbildungen dargestellt. Abbildung 1 zeigt die Integration eines kompakten Streulichtensors in eine Ultrapräzisions-Diamantdrehmaschine, der speziell für die schnelle und flexible Rauheits- und Defektcharakterisierung entwickelt wurde. Somit kann die Charakterisierung der Oberflächenrauheit bereits direkt im Fertigungsprozess erfolgen und bei Bedarf können Prozessparameter gezielt angepasst werden. Die Abbildung auf Seite 48 zeigt ein kürzlich entwickeltes kompaktes und modular aufgebautes Messsystem für vollsphärische, winkelaufgelöste Streulichtmessungen im visuellen und nahinfraroten Spektralbereich.

extremely critical. Therefore, the corresponding characterization methods were improved continuously over the past year. Light scattering information is now accessible experimentally even as close as 0.05° from the specular directions, which is particularly important in the field of optical design.

Two exemplary systems developed for close-to-process applications or even process-integration are presented in the figures. Figure 1 shows the integration of a compact light scattering sensor in an ultra-precision diamond turning machine. The sensor is developed for fast and flexible roughness and defect characterization. Thus, these parameters can be controlled directly and quickly in the processing chain without the need to bring the samples to a dedicated measurement environment. The Figure on page 48 shows a recently developed compact and modular light scattering instrument for full spherical angle-resolved light scattering measurements (ARS/BRDF) in the visual and near-infrared spectral range.

Literatur / References

- /1/ M. Trost and S. Schröder: Roughness and Scatter in Optical Coatings, Optical Characterization of Thin Solid Films, O. Stenzel, M. Ohlidal, Herausgeber, Springer (2018).
- /2/ T. Herffurth, M. Trost, M. Beier, R. Steinkopf, N. Heidler, T. Pertermann, and S. Schröder: Assessing surface imperfections of freeforms using a robotic light scattering sensor, Optical Engineering 58(9), 092609 (2019).

AUTHORS

Tobias Herffurth

Marcus Trost

CONTACT

Dr. Marcus Trost

Phone +49 3641 807-242

marcus.trost@iof.fraunhofer.de



HIGHSPEED-3D-SENSOR FÜR DIE INNENRAUMERFASSUNG IN CRASHTESTS HIGH-SPEED 3D SENSOR FOR INTERIOR DETECTION IN CRASH TESTS

Die stetige Steigerung der Leistungsfähigkeit von Fahrzeugen und die damit verbundenen höheren Geschwindigkeiten sowie eine allgemeine Zunahme des Straßenverkehrs führen zu immer höheren Anforderungen an die Sicherheit der Insassen und anderer Verkehrsteilnehmenden. Die dafür notwendigen Vorrichtungen sowie die Karosserie selbst bedürfen daher einer genauen Prüfung. Zu untersuchen ist beispielsweise die Deformation von Karosserieteilen während eines Crashversuchs oder der Entfaltungsvorgang der Airbags. Derartige dynamische Vorgänge sind mithilfe des Prinzips der GOBO-Projektion aperiodischer Sinus-Muster bereits seit wenigen Jahren dreidimensional messbar ¹, ². Mit einem neu entwickelten crashfesten Highspeed-3D-Sensor ist es nun erstmals möglich, auch Bereiche des Fahrzeuginnenraums mitfahrend während eines Crashversuchs dreidimensional zu erfassen.

Möglich wird das durch einen äußerst kompakten Musterprojektionssensor, der aus einem Halterahmen, zwei Highspeed-Kameras und einem GOBO-Projektor, der hinsichtlich der Anforderungen an die Beschleunigungsfestigkeit entsprechend optimiert wurde, besteht. Da während eines Sicherheitsversuchs für den Bruchteil einer Sekunde Beschleunigungen von bis zu 100 g auf das Sensorsystem einwirken, wurde der Halterahmen extrem verwindungssteif ausgeführt und der GOBO-Projektor schwingungsgedämpft über Metall-Elastomer-Kupplungen gelagert. Die 3D-Daten

Ongoing improvements in vehicle performance, which are associated with higher speeds, and a general increase in road traffic are leading to higher demands on the safety of passengers as well as other road users. The necessary safety equipment and the car body itself, therefore, must be tested thoroughly. For instance, the deformation of body parts during a crash test or the inflation process of the airbags need to be investigated. For a few years, such dynamic processes have been measurable three-dimensionally using the principle of GOBO projection of aperiodic sinusoidal patterns ¹, ². Using a newly developed crash-proof high-speed 3D sensor, for the first time, it is now possible to three-dimensionally capture areas of the vehicle interior during a crash test.

This is accomplished by an extremely compact pattern projection sensor consisting of a mounting frame, two high-speed cameras, and a GOBO projector, which has been optimized to meet the requirements for acceleration resistance. Due to the fact that during a safety test, accelerations of up to 100 g act on the sensor system for a fraction of a second, the holding frame was designed to be extremely rigid and the GOBO projector was mounted vibration-damped using metal-elastomer couplings. The 3D data is reconstructed by a stereo correspondence algorithm followed by triangulation.

¹ *Crashfester Highspeed-3D-Sensor.* | *Crash-proof high-speed 3D sensor.*

werden über einen Stereo-Korrespondenz-Algorithmus mit anschließender Triangulation rekonstruiert.

Das Sensorsystem kann bis zu 6.000 2D-Bilder pro Sekunde aufnehmen und ist damit in der Lage, Objekte in einem Messfeld von 700 mm x 700 mm mit einer 3D-Datenrate von 500 Hz bis 1 kHz mit einer lateralen Auflösung von 0,7 mm x 0,7 mm zu vermessen. Damit können Prozesse mit einer Dauer zwischen 20 und 500 ms dreidimensional erfasst werden. Durch die kompakten Abmessungen von 300 mm x 180 mm x 170 mm (L x B x H) ist das Sensorsystem vielseitig einsetzbar, so zum Beispiel im Rahmen von Schlittenversuchen im Fahrzeuginnenraum, zur Vermessung von lokalen Deformationen im Karosseriebereich (z. B. Pedalbereich), für die Bewegungsanalyse von Dummys oder (bei reduzierter Auflösung) zur Erfassung der Entfaltung diverser Airbags.

The sensor system can capture up to 6,000 2D images per second and is capable of subsequently measuring objects in a measuring field of 700 mm x 700 mm with a 3D data rate of 500 Hz to 1 kHz at a lateral resolution of 0.7 mm x 0.7 mm. In this way, processes with a duration between 20 and 500 ms can be recorded three-dimensionally. With its compact dimensions of 300 mm x 180 mm x 170 mm (L x W x H), the sensor system can be used for a wide range of applications, such as sled tests in the vehicle interior, for measuring local deformations within the car body, e. g., in the pedal area, for motion analysis of dummies, or (at reduced resolution) for recording the deployment of various airbags.

Literatur / References

- /1/S. Heist, P. Lutzke, I. Schmidt, P. Dietrich, P. Kühmstedt, A. Tünnermann, and G. Notni: High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection, Opt. Lasers Eng. 87, 90–96 (2016).
- /2/K. Raguse, P. Lutzke, and A. Oeckerath: Genauigkeitsanalyse eines Highspeed-Projektionsmesssystems zur Ermittlung der Objektkinematik in Sicherheitsversuchen, Oldenburger 3D-Tage 2017, 365–376 (2017).

AUTHORS

Kevin Srokos
Stefan Heist
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

Dr. Stefan Heist
Phone +49 3641 807-214
stefan.heist@iof.fraunhofer.de



HOCHGESCHWINDIGKEITS- 3D-THERMOGRAPHIE HIGH-SPEED 3D THERMOGRAPHY

Seit einigen Jahren steht die Erhöhung der Messgeschwindigkeit optischer, auf Musterprojektion basierender 3D-Sensoren weltweit im Fokus von Forschung und Entwicklung. Während 2D-Kameras Bildraten im zweistelligen Kilohertz-Bereich erreichen, mussten neue Projektionstechniken entwickelt werden, die schnelle Musterwechsel und extrem kurze Belichtungszeiten ermöglichen. Wesentliche Fortschritte mit völlig neugedachten Ansätzen trug die Arbeitsgruppe 3D-Sensorik des Fraunhofer IOF bei, z. B. durch Entwicklung des Prinzips der GOBO-Projektion aperiodischer Sinus-Muster. Mithilfe eines GOBO-Projektors und zweier Hochgeschwindigkeits-Kameras konnten dynamische Vorgänge mit einer 3D-Rate von 1333 Hz und einer Auflösung von bis zu einer Million Punkten pro 3D-Datensatz vermessen werden /1/.

Da sehr schnell ablaufende Prozesse mit lokalen Temperaturänderungen verbunden sind, liefern zusätzlich zu den 3D-Punktwolken aufgenommene thermische Daten wertvolle Informationen. Hochleistungs-Wärmebildkameras mit Bildraten von 1 kHz bei 640×512 Pixeln sind seit Kurzem kommerziell erhältlich. Die Forschenden des Fraunhofer IOF integrierten eine solche im langwelligen Infrarotbereich (LWIR) sensitive Kamera erfolgreich in ihren Hochgeschwindigkeits-3D-Sensor /2/. Zu beachten war dabei u. a., dass die Lichtquelle des Projektors die thermischen Aufnahmen im LWIR nicht beeinflusst. Mit ihrem Aufbau sind die Forschenden in der Lage, die gemessenen thermischen Daten als Textur auf die rekonstruierte 3D-Form zu legen.

In recent years, researchers worldwide have focused on increasing the measurement speed of optical 3D sensors based on pattern projection. While 2D cameras achieve frame rates in the double-digit kilohertz range, new projection techniques had to be developed that allow for fast pattern switching and extremely short exposure times. The "3D Sensors" working group at Fraunhofer IOF has made a significant contribution to this progress with completely new approaches, e. g., by developing the principle of GOBO projection of aperiodic sinusoidal patterns. Using a GOBO projector and two high-speed cameras, they were able to measure dynamic processes with a 3D rate of 1333 Hz and with up to one million points per 3D data set /1/.

Since very fast processes show local temperature changes, thermal data acquired in addition to 3D point clouds provide valuable information. High-performance thermal imaging cameras with frame rates of 1 kHz at 640×512 pixels have recently become commercially available. The scientists at Fraunhofer IOF successfully integrated such a long-wave infrared (LWIR) camera into their high-speed 3D sensor /2/, taking into account that the projector does not influence the thermal images in the LWIR. With their design, the researchers are able to map the measured thermal data as a texture onto the reconstructed 3D surface shape.

A particular challenge was the geometric calibration of the overall system due to the completely different spectral ranges of the two acquisition units. The Fraunhofer IOF scientists

1 Hochgeschwindigkeits-3D-Thermograph. | High-Speed 3D Thermograph.

Eine besondere Herausforderung lag in der geometrischen Kalibrierung des Gesamtsystems aufgrund der völlig verschiedenen Spektralbereiche der zwei Aufnahmeeinheiten. Dazu entwickelten die Forschenden des Fraunhofer IOF einen Kalibrierkörper mit Strukturen, welche sowohl im sichtbaren Wellenlängenbereich als auch im LWIR detektiert werden können. Die Lösung fanden sie in Materialien mit sehr unterschiedlichen Emissionsgraden, wodurch die Strukturen selbst bei einer homogenen Temperaturverteilung auf der Kalibrierhilfe erkannt werden können. Zudem weisen die gewählten Materialien unterschiedliche Reflexionseigenschaften im sichtbaren Spektralbereich auf.

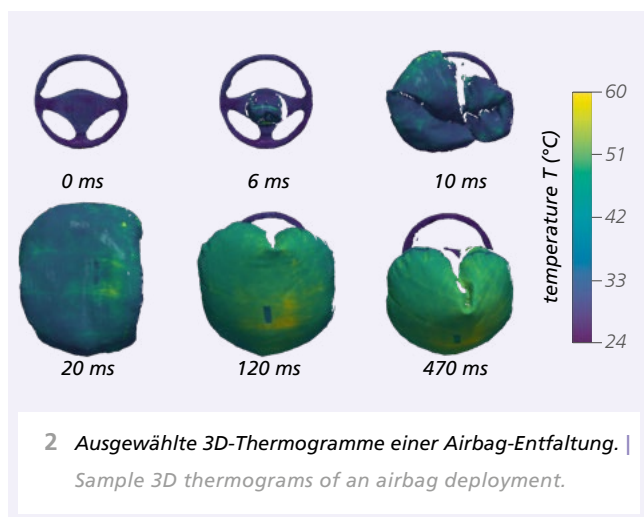
Der Highspeed-3D-Thermograph wurde in unterschiedlichen Experimenten getestet, u. a. durch Vermessung einer Airbag-Explosion. Die erreichte 3D-Bildrate betrug 5 kHz, wohingegen eine LWIR-Bildrate und damit auch 3D-Thermogramm-Rate von 1 kHz erreicht wurde. Über lokale Temperaturunterschiede lassen sich beispielsweise Informationen über Materialdicken und -fehler erhalten. Der Sensor ist vielseitig einsetzbar, so zum Beispiel für Messungen in der Prototypentwicklung und der Qualitätssicherung, bei denen Verformungen und Wärmeentwicklung eine Rolle spielen.

developed a calibration object with structures that can be detected both in the visible wavelength range as well as in the LWIR. They found the solution in materials with very different emissivities so that the structures can be recognized even with a homogeneous temperature distribution. In addition, the selected materials exhibit different reflection properties in the visible spectral range.

The high-speed 3D thermograph was tested in various experiments, including measuring an airbag explosion. The 3D frame rate was 5 kHz, whereas an LWIR frame rate and, thus, also a 3D thermogram rate of 1 kHz was achieved. Local temperature differences can be used, for instance, to obtain information on material thicknesses and material flaws. The sensor can be applied, e. g., for measurements in prototype development and quality assurance, where deformation and heat generation occur.

References / Literatur

- /1/ S. Heist et al.: High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection, Opt. Lasers Eng. 87, 90–96 (2016).
- /2/ M. Landmann et al.: High-speed 3D thermography, Opt. Lasers Eng. 121, 448–455 (2019).

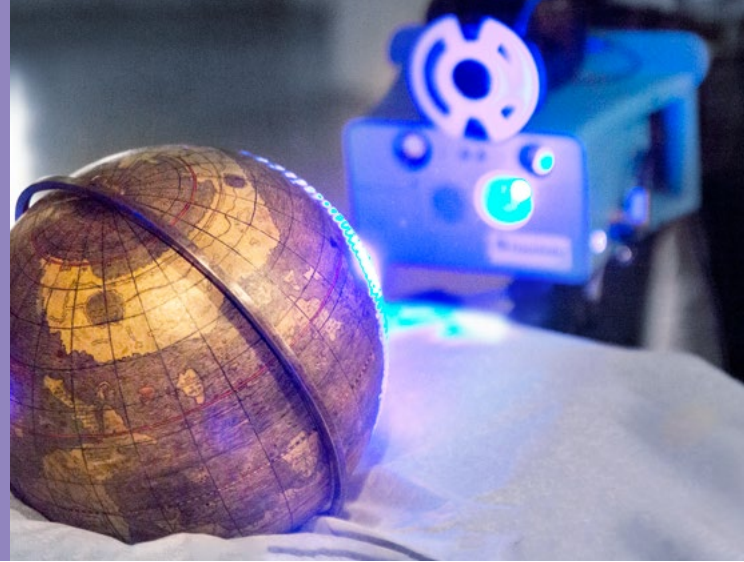


AUTHORS

Martin Landmann
Stefan Heist
Patrick Dietrich
Ingo Gebhart
Gunther Notni

CONTACT

Dr. Stefan Heist
Phone +49 3641 807-214
stefan.heist@iof.fraunhofer.de



3D-SCAN VON TATORTSPUREN UND KULTURGÜTERN VOR ORT

ON-SITE 3D SCANNING OF CRIME TRACES AND CULTURAL HERITAGE

Der Großteil optischer 3D-Scansysteme wird im stationären Betrieb mit festem Standort betrieben und beispielsweise in der industriellen Qualitätssicherung eingesetzt. Applikationen, wie die Spurensicherung an Tatorten oder die digitale Sicherung von Kulturgütern, erfordern jedoch das 3D-Scannen des Objekts direkt vor Ort, weil dieses beispielsweise nicht bewegt werden kann oder sehr empfindlich ist. Im Rahmen des von der EU geförderten Projektes »3D-Forensics/FTI« /1/ sowie des Projektes »cultur3D« /2/ der Friedrich-Schiller-Universität Jena wurde ein mobiles 3D-Scansystem mit simultaner Farb- / Texturerfassung entwickelt und im Rahmen von Anwendertests evaluiert. Die Mobilität resultiert aus einer kompakten, tragbaren und akkubetriebenen Scaneinheit. Beim Vororteseinsatz ist kein Zusatzequipment erforderlich. An die wechselnden Einsatzorte, z. B. Tatorte, Museen oder Ausgrabungen, wird das System in einem Rollkoffer transportiert. Sowohl bei der Beweissicherung am Tatort als auch bei der Digitalisierung von Kulturgütern ist es das Ziel, hochauflösende 3D- mit Farbdaten zu kombinieren. Die entwickelte Scaneinheit verwendet ein Stereokamerasystem kombiniert mit einem Musterprojektor zur 3D-Datenerfassung mit einer Auflösung von 0,17 mm in einem Messvolumen von 325 x 200 x 100 mm³. Für die Farberfassung wird eine kalibrierte digitale Fotokamera mit 30 MPixel eingesetzt. Der 3D-Scanner ist für eine Umgebungstemperatur von -10...+40 °C ausgelegt und mit einer Schutzklasse von IP22 für den Außeneinsatz geeignet. Die Bedienung des Gerätes über ein integriertes Touch-

The majority of optical 3D scanning systems are used in stationary operation mode at a fixed location, e. g., in industrial quality control. Applications, such as the recovery of traces at crime scenes or the digitization of cultural heritage, require the 3D scanning of objects directly on-site because these objects cannot be moved or may be very sensitive. A mobile 3D scanning system including synchronous color/texture acquisition was developed and evaluated in user tests in the context of the "3D-Forensics/FTI" European funded project /1/ as well as the "cultur3D" project /2/ from Friedrich Schiller University Jena. The mobility of the system is realized through a compact, portable, and battery-driven scan unit. Its on-site operation requires no additional equipment. The device is transported in a trolley case to changing locations, e. g., crime scenes, museums, or excavations. Both the recovery of evidence at crime scenes and the digitization of cultural heritage have the objective to combine high-resolution 3D data with color photos. The developed scan unit consists of a stereo camera setup combined with a pattern projector for 3D data acquisition. It captures the 3D form with a resolution of 0.17 mm in a measurement volume of 325 x 200 x 100 mm³. Color acquisition is performed by a calibrated digital photo apparatus with 30 MP. The 3D scanner is designed for an operating temperature between -10 and +40 °C. Together with an IP22 protection class, it is suitable for outdoor applications. The control of the device is achieved through an integrated touch display. The handling is similar to a

1 *Mobile 3D-Sicherung von Schuhabdruckspuren im Schnee und Digitalisierung von Kulturgütern. |*

Mobile 3D scanning of footwear impressions in snow and digitization of cultural goods.

Display ist vergleichbar mit einem normalen Fotoapparat. Zur Erhöhung der Datenqualität kann die Scaneinheit an ein Stativ adaptiert werden. Die mobile Scaneinheit ist für die Sicherung von Beweisen an Tatorten interessant, um beispielsweise in Schuheindrucksuren feinste Details aufzuspüren und Täter zu identifizieren. Eine Reihe polizeilicher Anwender beteiligte sich an der Weiterentwicklung des Systems durch Pilottests in relevanten Einsatzumgebungen (Abb. 1). Im Rahmen des Projektes »3D-Forensics/FTI« wurde eine forensische Validierung nach »Forensic Science Regulator« /3/ zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und Gerichtsfestigkeit durchgeführt.

Einzigartige Kulturartefakte müssen durch die Verwendung der mobilen 3D-Scaneinheit nicht in einem riskanten Transport zu einem stationären Messsystem bewegt werden, sondern können vor Ort, z. B. im Archiv eines Museums, digitalisiert werden. Über ein zusätzliches Softwaremodul ist es möglich, die 3D- und Farbaufnahmen automatisch zu einem vollständigen Rundum 3D-Modell zusammenzusetzen (Abb. 2). Wissenschaftliche Untersuchungen könnten dadurch an diesem digitalen Replikat anstelle des echten Objektes gemacht werden.



2 3D-Digitalisierung des Schöner-Globus (von 1515) in Weimar. |
3D digitization of a Schöner globe (from 1515) in Weimar.

standard photo apparatus. It is possible to improve data quality by using the scan unit in connection with a tripod. The mobile 3D scanner is of interest for the recovery of evidence at crime scenes, e. g., to detect the smallest details in footwear impression traces which help to identify suspects. A group of forensic testers supported the development of the device through pilot tests in relevant operational environments (Fig. 1). A validation following the "Forensic Science Regulator" /3/ was performed in the context of the "3D-Forensics/FTI" project to test the system's fitness for purpose and the judicial admissibility of the captured data. As a result, unique cultural artifacts can be digitized without risky transport to a stationary scanning system by using the mobile 3D scanner. Digitization can be performed directly on-site, e. g., in the archive of a museum. The 3D and color recordings can be merged automatically into a complete all-around 3D model by an additional software module developed as part of the "cultur3D" project (Fig. 2), thereby allowing scientific examinations to be performed on this digital replica instead of the actual sensitive object.

References / Literatur

- /1/ www.3D-Forensics.eu
- /2/ www.cultur3D.de
- /3/ Forensic Science Regulator, Guidance: Validation (FSR, Issue 1, 2014)

AUTHORS

Roland Ramm
Matthias Heinze
Peter Kühmstedt
Gunther Notni
Max Lucas¹

¹ LUCAS instruments GmbH

CONTACT

Dr. Stefan Heist
Phone +49 3641 807-214
stefan.heist@iof.fraunhofer.de



MUSIK AUS KÖRPERBEWEGUNGEN – EIN THERAPEUTISCHER 3D-SCANNER FROM BODY MOVEMENT TO MUSIC – 3D-SCANNING FOR THERAPEUTICS

Musik, besonders »selbstgemachte« Musik, ist ein Stimulus für bessere Lebensqualität und Lebensfreude. Menschen mit Einschränkungen ihres Bewegungsapparates oder anderen Behinderungen sind jedoch häufig nicht in der Lage, ein Musikinstrument zu erlernen oder zu spielen. Mit einem am Fraunhofer IOF entwickelten Demonstrator, der Körperbewegungen in Musik übersetzt, soll im Kontext physiologischer Therapien eine Verbesserung der Bewegungsfähigkeit und Lebensqualität erreicht werden.

Der Demonstrator wurde im Rahmen eines von der Thüringer Aufbaubank geförderten Verbundprojektes in den vergangenen drei Jahren zusammen mit Partnern aus dem sozialen Leben und einem Industriepartner entwickelt. Ausgehend vom kommerziellen Produkt »MotionComposer« wurden verschiedene Verbesserungen und Veränderungen erarbeitet, um das Gerät im Rahmen von Bewegungstherapien nutzen zu können.

Der Demonstrator besteht im Wesentlichen aus einer »Time-of-Flight« (ToF)-Kamera, einer 2D-Kamera, einem Mini-PC, Lautsprechern und einem Tablet (Abb. 1) zur Steuerung und Anzeige sowie der entsprechenden Software zur Steuerung, Datenverarbeitung und Musik-Erzeugung. Die Bewegungen der handelnden Personen, die sich im Aktionsbereich des Demonstrators von etwa 5 m x 3 m x 3 m befinden, werden entsprechend einer ausgewählten Musikumgebung in ver-

Music, especially self-made music, is a stimulator for increased vitality and quality of life. However, people with handicaps are often not able to learn and play an instrument. A new device developed at Fraunhofer IOF translates their body movements into music compositions and should help to keep and improve vitality and movement abilities in the context of physiological therapy.

A research project supported by the "Thüringer Aufbaubank" with the goal of the development of therapy concepts by music generation from body movements was realized in the last three years with partners from industry and social life. Starting from "MotionComposer", a pre-existing device, which already generates music from body movements, a new demonstrator with improved features was developed together with the project partners.

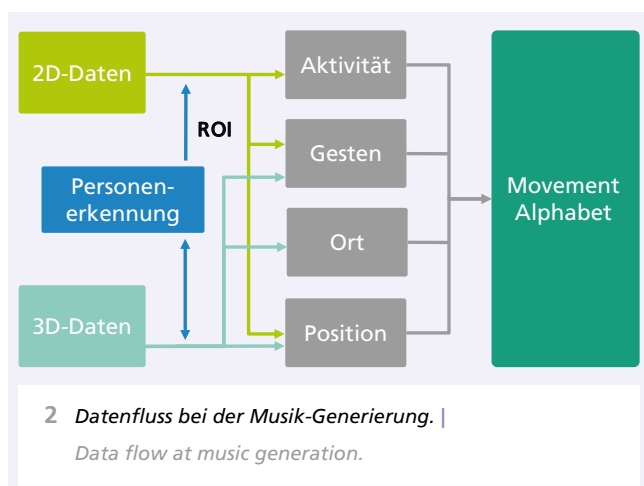
The technical result of the development is a system including a "Time-of-Flight" (ToF) camera and a 2D camera covering a space of approximately 5 m x 3 m x 3 m (Fig.1). The operation and control of the system by the user is realized by a tablet (seen on the top of the device), which can be removed from the chassis. Application with a dancing or moving subject in the observed area of the device leads to the generation of music, depending on the gestures and movements of the person. Whereas the sound environment is predefined, velocity, rhythm, volume,

schiedene Klänge umgewandelt. Dabei beeinflusst die benutzende Person durch Art, Intensität und Geschwindigkeit ihrer Körperbewegungen Rhythmus, Tonhöhe, Lautstärke und Charakter der Klänge bis hin zur Generierung eigener Melodien. Die handelnden Personen werden erkannt und ihre Positionen im Raum verfolgt sowie ihre Bewegungen berechnet. Hierfür werden 3D-Daten der ToF-Kamera mit 2D-Bild-daten fusioniert, bestimmte Bewegungsmuster erkannt und in Töne und Klänge umgewandelt. Sogar kleinste Bewegungen wie Fingerbeugen und Augenzwinkern werden erfasst und in Klänge transformiert.

Es stehen drei unterschiedliche Musikumgebungen zur Verfügung. Die Latenz zwischen Körperbewegung und korrespondierender Musikausgabe konnte auf 180 ms reduziert werden. Abbildung 2 zeigt den Datenfluss bei der Musikerzeugung. Der Demonstrator wird momentan vom Projektpartner »Grenzenlos e.V. Jena« in therapeutischen Anwendungen bei blinden und sehbehinderten Menschen, Personen mit Depressionen, Demenzkranken und anderen Patientengruppen erfolgreich eingesetzt.

and sound-height are controlled by the moving subject. The 3D data from the ToF camera is merged with the 2D camera data; certain movement patterns are detected and transformed into sound and music. Even the smallest movements like finger bending or eye blinking are captured and transformed into sound.

Three music environments produce different kinds of sound. The latency between movements and the corresponding sound was reduced to 180 ms. Figure 2 shows the data flow at music generation. Currently, the demonstrator system has been applied successfully in therapeutic sessions with dementia patients and people with disabilities, blindness, and mental handicaps, among others. Preliminary results show the functional power of the new system through the improvement of mobility and vitality as well as the suitability for therapeutic purposes.



AUTHORS

Christian Bräuer-Burchardt
Matthias Heinze
Roland Ramm
Robert Wechsler¹
Ursula Müller²

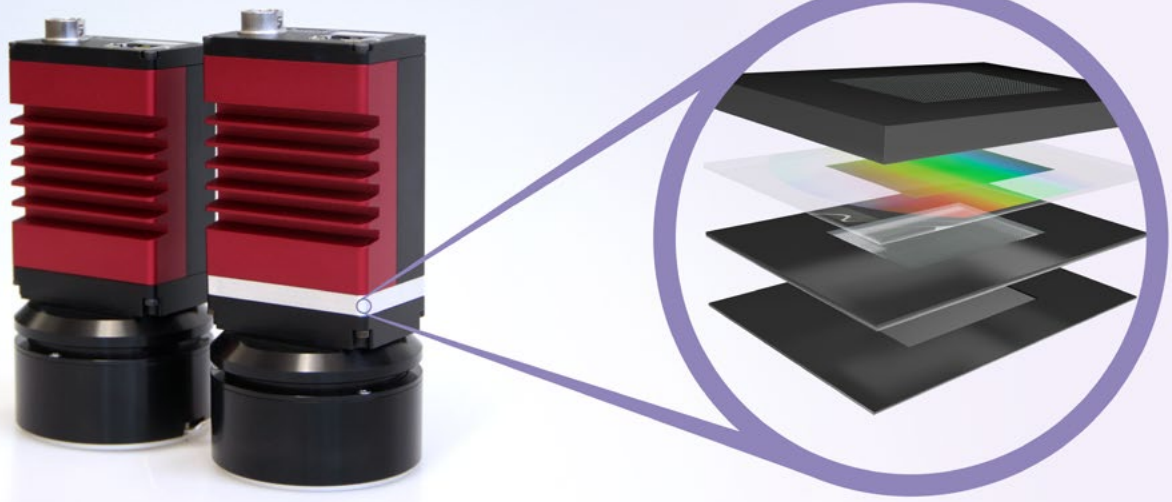
¹ Palindrome Dance Company e.V.

² Grenzenlos e.V.

CONTACT

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

1



ARRAY VON INTEGRIERTEN MIKROSPEKTROMETERN INTEGRATED MICRO SPECTROMETER ARRAY

Die spektroskopische Sensorik ist ein wertvolles Hilfsmittel in vielen Disziplinen, in denen ohne eine zeitraubende Laboranalyse analytische Ergebnisse aus spektralen Variationen gewonnen werden. Eine parallele und spektral aufgelöste Messung kann dabei einen höheren Probendurchsatz oder auch die Beurteilung der Homogenität von Serienmessungen ermöglichen, und z. B. in der Lebensmittel- oder Erntegutanalyse eingesetzt werden. Um diese Anwendungen zu adressieren und eine hochminiaturisierte und parallele Spektralsensorik zu ermöglichen, wurde ein mikrooptisches System bestehend aus einem Array von Mikrospektrometern entwickelt. Für den auf Gitterspektrometern beruhenden Ansatz muss der Lichtweg gestreckt werden, um eine hohe Packungsdichte der einzelnen Kanäle zu erreichen. Dafür wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, ein Gitter hoher Beugungseffizienz /1/ mit einem Array aus Mikroprismen /2/ kombiniert und im Resultat ein freier Spektralbereich von 450 nm bis 900 nm realisiert.

Das ultrakompakte System arbeitet ohne bewegliche Elemente. Alle refraktiven Elemente (Abb. 2) sind im Wafermaßstab als Polymer auf Glas repliziert worden; das Gitter wurde mittels Elektronenstrahl geschrieben und durch Ätzen in das Quarzsubstrat übertragen. Das komplette opto-mechanische System ist nur 6 mm lang. Im Fall eines

Spectroscopic sensing is a valuable tool in many scientific disciplines, where analytical results are derived from spectral deviations to assess instantaneously the sample's properties without delayed laboratory testing. Parallelized and spectrally resolved sensing enables either increase sample throughput or analysis of the heterogeneity of the desired quantity, e.g., in food control or crop analytics.

To target such applications and achieve a highly miniaturized and parallel spectroscopic sensing, a micro-optical system consisting of an array of spectrometers has been developed. For the classical grating spectrometer approach utilized, a straight light path is a prerequisite for packing the array densely. Therefore, grating with high diffraction efficiency /1/ is combined with a micro-prism array /2/ as shown in the layout of the optical system (Fig. 1). This yields a free spectral working range from 450 nm to 900 nm.

The ultra-compact system works without moving parts. All refractive optical arrays (Fig. 2) have been replicated in wafer-scale polymer-on-glass technology; the grating has been written by E-beam lithography with subsequent etching into the fused silica substrate. The mounted system features a total track length of the optical system in the range of 6 mm only. Using a 4/3" CCD as an image sensor allows

1 Visualisierung der Komponenten des Spektrometers. Bautiefenvergleich Kamera mit und ohne Spektrometerarray. | Visualization of the spectrometer components and a size comparison between a camera with and without the spectrometer array.

4/3" Bildsensoren können 2067 (53 x 39) Mikrospektrometer als Array angeordnet und z.B. in das Gehäuse einer kommerziellen Kamera integriert werden (Abb. 1). Dieses System wurde erfolgreich für die Sensorik in der Mikroskopie eingesetzt /3/ und kann an die Anforderungen spezieller mobiler Anwendungen angepasst werden.

Danksagung / Förderung

Das Projekt wurde vom BMBF und dem Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (FKZ 2015-0024) gefördert.

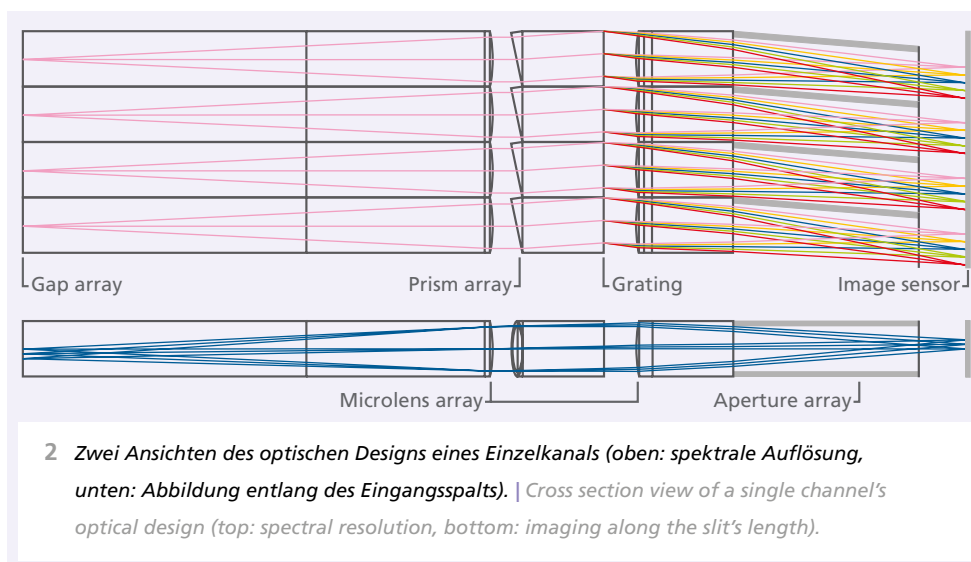
Literatur / References

- /1/ U. D. Zeitner, M. Oliva et al.: High performance diffraction gratings made by e-beam lithography, Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. 109(4), 789–796 (2012).
- /2/ H.-C. Eckstein, U. D. Zeitner et al.: High dynamic grayscale lithography with an LED-based micro-image stepper, Proc. SPIE 9780, 97800T (2016).
- /3/ N. Danz, B. Höfer et al.: Miniature integrated micro-spectrometer array for snap shot multispectral sensing, Optics Express 27(4), 5719-5728 (2019).

us to arrange 2,067 (53 x 39) channels in an array of micro spectrometers. This can be integrated into a commercial camera's housing (Fig. 1). The system has been applied successfully to microscopic imaging applications /3/ and can be adapted to mobile applications.

Acknowledgment / Funding

The authors are grateful for funding by the BMBF and the Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (FKZ 2015-0024).

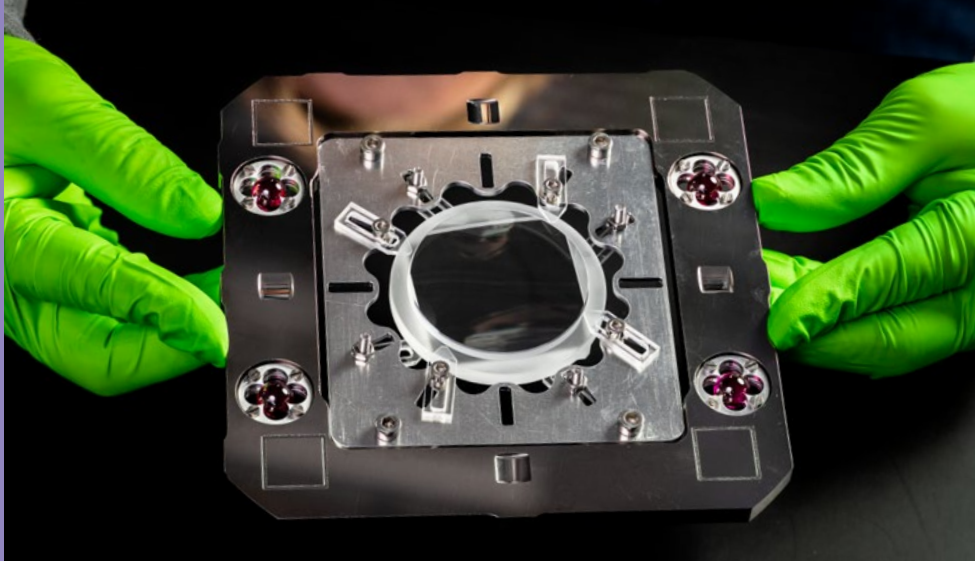


AUTHORS

Norbert Danz
Bernd Höfer
Peter Dannberg
S. Kleinle
T. Harzendorf
R. Brunner

CONTACT

Dr. Norbert Danz
Phone +49 3641 807-750
norbert.danz@iof.fraunhofer.de



MESSVORRICHTUNG FÜR DOPPELSEITIGE OPTISCHE FREIFORMELEMENTE MEASUREMENT EQUIPMENT FOR TWO- SIDED FREEFORM OPTICAL ELEMENTS

Für Hochleistungsoptiken stellen Freiformen den Stand der Technik dar. Im Bereich der Metallspiegel sind Fertigungs- und Korrekturtechniken etabliert, bei welchen Referenzstrukturen, die zur Vermessung benötigt werden, direkt an Metalloptiken angearbeitet werden /1, 2/. Bei Freiformlinsen ist dies hingegen nicht ohne weiteres möglich, da Linsen im Gegensatz zu Spiegeln mindestens zwei optische Flächen besitzen und bei Gläsern oder Glaskeramiken Referenzstrukturen in Form von Kalotten o. Ä. nicht durch Fräsen erzeugt werden können. Durch Schleifprozesse können unter anderem Rundläufe zur Zentrierung, Planfront- und -rückflächen zur Entkippung sowie Planseitenflächen zur Winkelausrichtung realisiert werden. Die Schwierigkeiten bestehen darin, zwischen den Referenzstrukturen und Optikflächen einen Übertrag zu schaffen, so dass diese miteinander und zur übergeordneten Struktur in Beziehung gesetzt werden können. Um dies zu vereinfachen, wurde ein Mess- und Referenzrahmen entwickelt, welcher eine reproduzierbare Aufnahme des Optikelements gewährleistet /3/. In diesen Rahmen können aus der Metalloptik bekannte, geometrische Referenzen per Diamantbearbeitung eingearbeitet werden. Sowohl die geometrischen Konturen als auch die Referenzen des Rahmens werden über Dreikoordinatenmesstechnik (DKM) gemessen und in Beziehung mit genauerer Profilometrie der Optikflächen (Panasonic UA3P) gesetzt. Die erhaltenen Messresultate können zur Korrektur der Optikflächen in Bezug zu geometrischen Kontur-Merkmalen

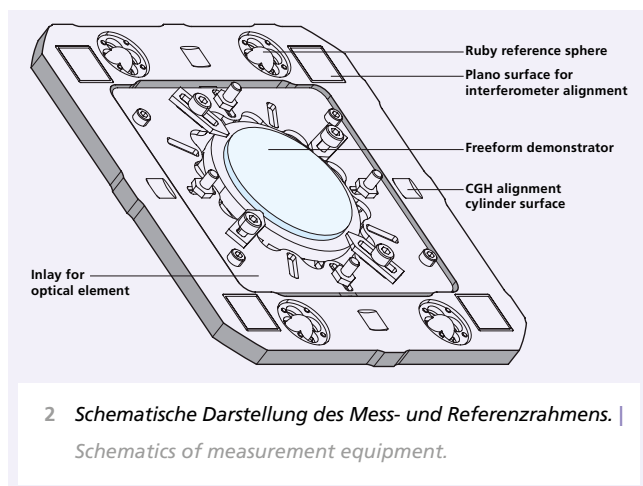
For high-performance optics, freeforms represent the state of the art for several years. For metal optics, reference and correction techniques are established, where the reference structures for metrology can be milled or turned directly on the substrate /1, 2/. In contrast, this is no longer possible for freeform lenses, which results from two different difficulties: first, lenses, in contrast to mirrors, have at least two optical surfaces. Second, reference structures, such as small concave spheres, cannot be milled into glasses or glassy materials. The only possible reference structures are circular structures for centering, planar front and rear surfaces for detilt, or planar side surfaces for alignment, which can be generated by grinding. The difficulties for lenses, on the one hand, are creating a connection (manufacturing or metrology) between both optical surfaces as well as the higher-level structure and, on the other hand, to align twelve degrees of freedom. To simplify these issues, metrology equipment was developed, which allowed for a reproducible attachment of the optics element /3/. Metrology equipment can be used to establish diamond turned geometrical reference structures, which are well known from metal optics. The geometrical contour, as well as the references, can be measured by utilizing coordinate measurement metrology (CMM) and are to be related to the high accuracy profilometric measurement (Panasonic UA3P). The measurement results are used to correct the optical surfaces in relation to geometrical contours. Therefore, it is possible to align the optical element to the same references used for the

1 Mess- und Referenzrahmen mit Inlay, Freiform-Demonstrator und Referenz-Rubin-Kugeln. |

Measurement equipment with inlay, freeform demonstrator, and ruby reference spheres.

genutzt werden. Somit kann man sich beim Einbau auf dieselben Referenzen wie bei der Korrektur beziehen und gewährleistet damit im Rahmen der Kontur- und Referenzgenauigkeit eine maximale optische Performance. Des Weiteren ist die Aufnahme der Optikkomponente im Rahmen eine schnell zu fertigende Inlay-Lösung, so dass verschiedene Optikkomponenten mit demselben Rahmen vermessen werden können. Im Mess- und Referenzrahmen ist eine BK7-Linse mit einer sphärischen Seite und einer azylindrischen Seite vermessen worden. Dabei wurde die Anwendbarkeit des Messkonzepts geprüft, indem die Rubinkugeln mit DKM beidseitig vermessen und die Positionsübereinstimmung der Kugelmittelpunkte ($< 2 \mu\text{m}$) geprüft worden sind. Weiterhin ist die DKM-Vermessung der Optikflächen mit UA3P-Messungen verglichen worden. Dabei wurde der Flächenfit aus der UA3P von der DKM-Fläche abgezogen und die Differenz der z-Höhen verglichen. Diese Differenz betrug $< 8 \mu\text{m}$ peak-to-valley. Folglich lässt sich die UA3P-Messung der Optikflächen mit den DKM-Messungen der äußeren Geometrie in Beziehung setzen.

Das Projekt »Free4Optics« wurde durch die Thüringer Aufbaubank (TAB) innerhalb des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) unter FKZ 2015 FE 9148 gefördert.



correction to maintain maximized optical performance within the contour and reference accuracy. Additionally, the mounting structure for the optical element in the measurement equipment is a rapidly manufacturable inlay solution that is useful for using the same metrology equipment for different optical elements, as long as they fit. The metrology equipment was used for measuring a BK7 lens with a spherical side and an acylindrical one. With this optical element, the measurement concept was verified by measuring the ruby spheres from both sides via CMM. Afterwards, the position of the centers of mass of the spheres was compared, which resulted in a deviation of < 2 microns. Additionally, the CMM measurement of the optical surfaces was compared to the UA3P measurements. For that, a surface fit of the UA3P measurement data was compared to the CMM data in z. The difference was < 8 microns peak-to-valley. Therefore, the measurement equipment can be used to associate the surface form measurement of both optical surfaces to outer geometrical contours. The research is funded in project "Free4Optics" under grant number 2015 FE 9148 by the Thüringer Aufbaubank (TAB) within the European Regional Development Fund (ERDF).

References / Literatur

- /1/ S. Scheiding et al., Proc. SPIE 7739, 773908 (2010).
- /2/ M. Beier et al., Appl. Optics 54, 3530 (2015).
- /3/ Patent 10 2018 209 017.3

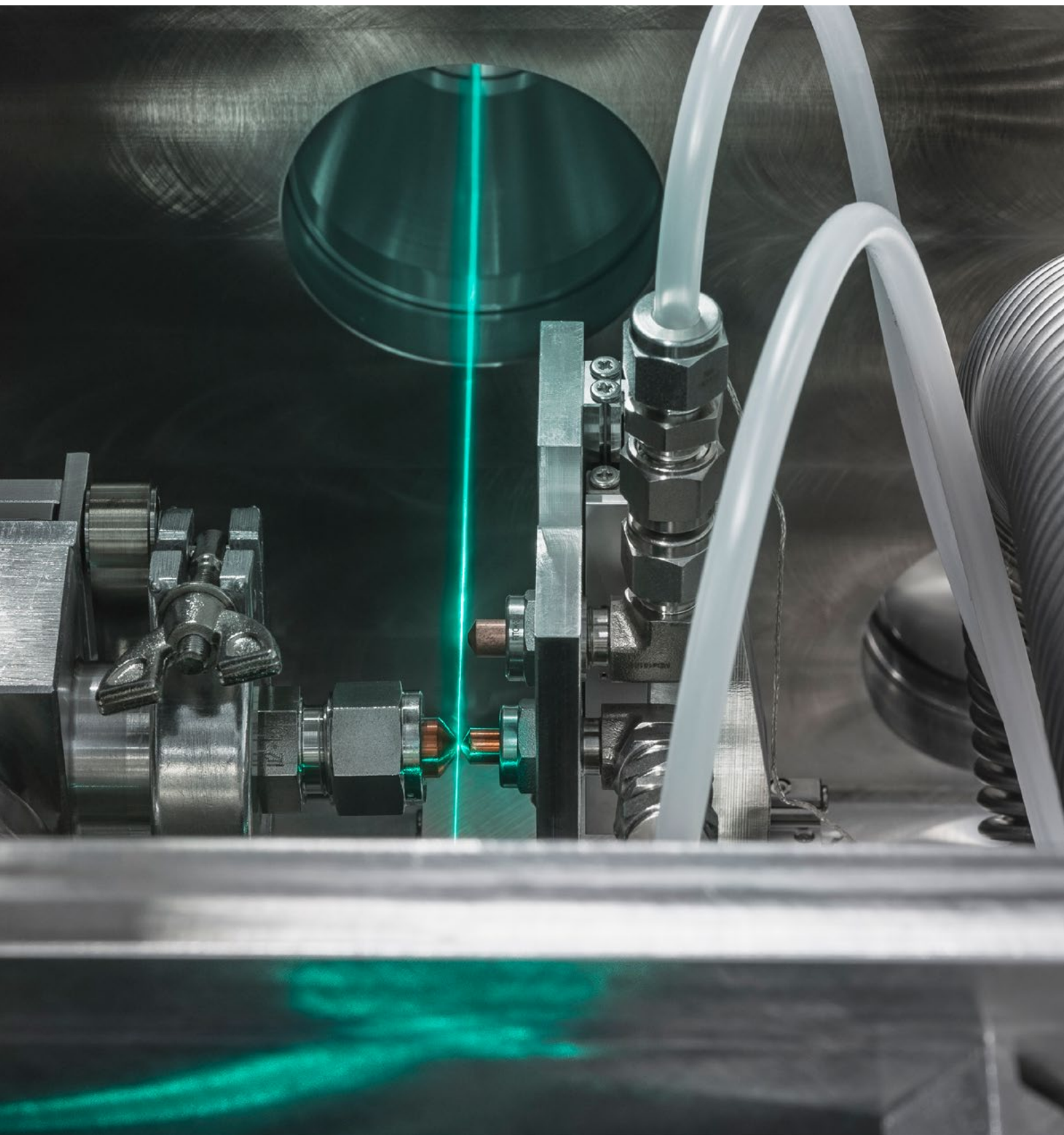
AUTHORS

Johannes Hartung
Henrik von Lukowicz
Mathias Rohde
Knut Kleinbauer
Stefan Risse

CONTACT

Dr. Johannes Hartung
Phone +49 3641 807-721
johannes.hartung@iof.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELD
BUSINESS FIELD



LASERTECHNIK

LASER TECHNOLOGY

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

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.

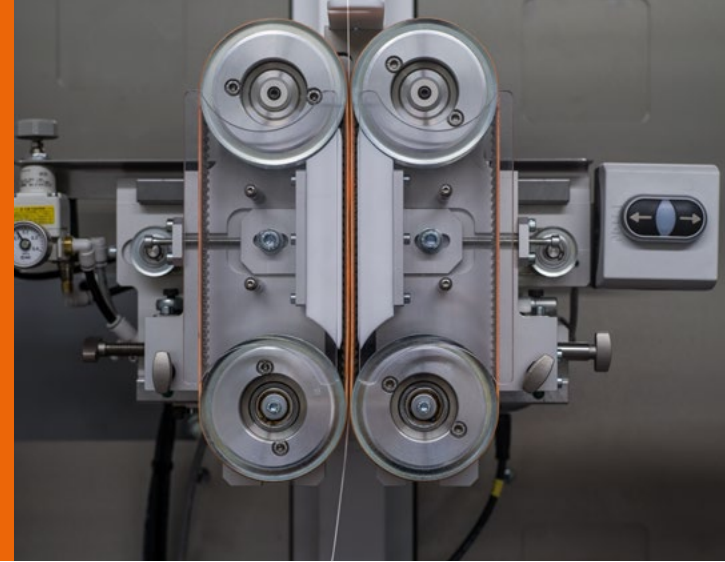
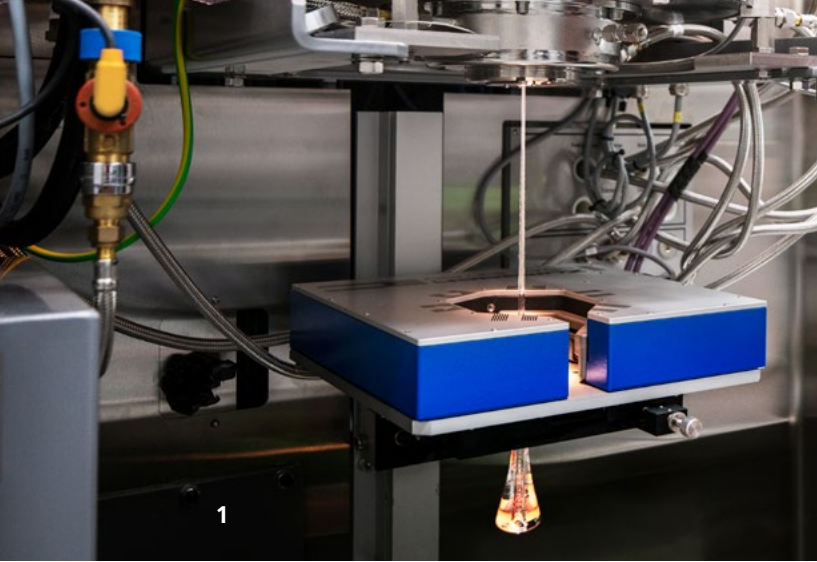
Das Fraunhofer IOF gehört in diesen Themenfeldern zu den forschungsstärksten Instituten mit globaler Sichtbarkeit und zahlreichen technologischen Alleinstellungsmerkmalen. In dem Geschäftsfeld Lasertechnik konnten in 2019 unter anderem die folgenden Themen erfolgreich bearbeitet werden: grundlegende Entwicklungen zur Fasertechnologie für Hochleistungsfaserlaser, neue Höchstleistungen eines UltrakurzpulsLasers und komplexe Gitter in Fasern zur spektralen Filterung.

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 Fraunhofer IOF, all competences are combined: from preform production through fiber drawing of active and passive special fibers as well as necessary assembly and joining technologies to system integration and system realization.

Additional topics include the development of new wavelength ranges using methods of non-linear 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. In addition, processes and process technologies of laser micro-material processing are being explored and developed.

In these fields, Fraunhofer IOF is one of the most research-intensive institutes with global visibility and many technologically unique selling points. Amongst others, the following topics were successfully addressed in the laser technology business field in 2019: fundamental developments in fiber technology for high-power fiber lasers, new high power ultrashort pulse lasers, and complex gratings in fibers for spectral filtering.

LEFT *Neuartige UltrakurzpulsLaser und Laserquellen für industrielle Anwendungen. | Novel ultrashort-pulsed lasers and laser sources for industrial applications.*



GRUNDLEGENDE ENTWICKLUNGEN ZUR TECHNOLOGIE FÜR HOCHLEISTUNGSFASERLASER

FUNDAMENTAL DEVELOPMENTS IN TECHNOLOGY FOR HIGH-PERFORMANCE FIBER LASERS

Ytterbium (Yb) dotierte Faserlaser werden als industrietaugliche Laser mit beugungsbegrenzter Strahlqualität bei Multi-kW-Mittelleistung eingesetzt. Die internationale Forschung zur weiteren Skalierung der Durchschnittsleistung ist noch nicht abgeschlossen, insbesondere im Hinblick auf die thermo-optische Begrenzung durch transversale Modeninstabilitäten (TMI). Viele Eigenschaften von Fasern und Hochleistungslasersystemen wurden am Fraunhofer IOF untersucht, um die TMI-Grenze auf höhere Leistungsstufen zu verschieben. Hierzu zählen insbesondere intrinsische Fasereigenschaften, die ganz zu Beginn der Prozesskette festgelegt werden. Bedeutende Parameter sind die numerischen Apertur und das Brechzahlprofil des Kerns sowie die damit verbundenen optischen Eigenschaften, wie z. B. Photodarkening (PD) aufgrund des Einsatzes verschiedener Co-Dotierungen und Fertigungstechniken. PD führt zu optischen Verlusten und damit zu einer Wärmebelastung im Inneren der Faser, welche wiederum einen direkten Bezug zur TMI-Grenze darstellt /1/.

Im vergangenen Jahr konnten vergleichende Untersuchungen verschiedener Fertigungstechnologien, nämlich traditionelle MCVD-Lösungsdotierung, All-Solution-Dotierung und Gasphasendotierung (Chelat), in Bezug auf die Materialsysteme Yb:Al:P (mit einem Verhältnis von Al:P 1:1) sowie das System Yb:Al:F und als neuen Beitrag das PD-optimierte System Yb:Al:F:Ce gestartet und evaluiert werden /2/. Durch

Ytterbium (Yb)-doped fiber lasers are used as industrial lasers with diffraction-limited beam quality at multi kW medium power. The international research for further scaling of the average power is not yet finished, especially with regard to the thermo-optical limitation by transversal mode instability (TMI). Many properties of fibers and high-power laser systems have been investigated at Fraunhofer IOF to shift the TMI limit to higher power levels. These include, in particular, intrinsic fiber properties that are determined at the very beginning of the process chain. Important parameters are the numerical aperture and the refractive index profile of the core as well as the associated optical properties of photodarkening (PD) due to the use of different co-doping and manufacturing techniques. PD leads to optical losses and thus to a thermal load inside the fiber, which, in turn, is directly related to the TMI limit /1/.

In the past year, comparative investigations of different manufacturing technologies, namely traditional MCVD solution doping, all-solution doping, and gas-phase doping (chelate) with respect to the material systems Yb:Al:P with a ratio of Al:P 1:1 as well as the system Yb:Al:F and as a new contribution the PD optimized system Yb:Al:F:Ce could be started and evaluated /2/. The possibility of producing these fibers in-house (Fig. 1) made it possible to measure all relevant parameters, test the fibers in kW systems and compare their performance. Significant progress was made in these investigations. Figure 2 shows the comparison of two fibers from the 2018 and 2019 production technologies used

1 Faserziehanlage am Fraunhofer IOF |

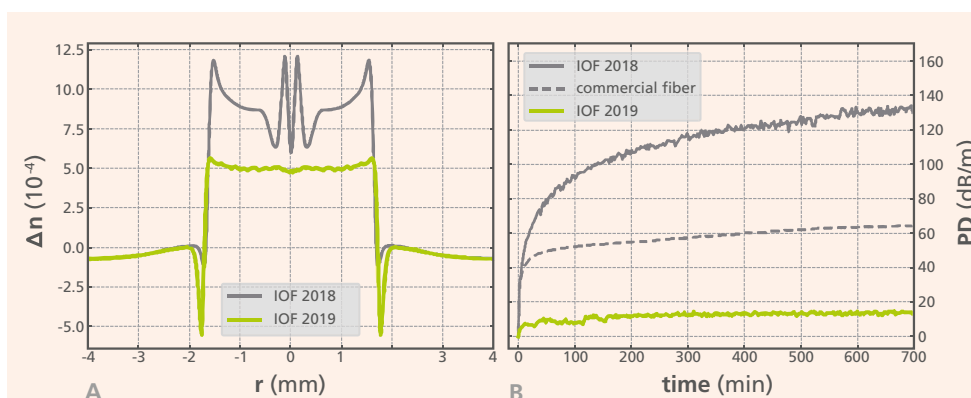
Fiber drawing tower at Fraunhofer IOF.

die Möglichkeit, diese Fasern im eigenen Haus herzustellen (Abb. 1), konnten alle relevanten Parameter gemessen sowie die Fasern in kW-Anlagen getestet und ihre Leistung verglichen werden. Bei diesen Untersuchungen wurden deutliche Fortschritte gemacht. Abbildung 2 zeigt den Vergleich zweier Fraunhofer IOF-Fasern (entsprechend dem Technologiestand aus 2018 und 2019 hergestellt) im Vergleich zu einer kommerziellen Faser gleicher Geometrie in Bezug auf PD. Eine signifikante Reduktion des PD konnte durch den Einsatz des Ce-codotierten Systems mittels Gasphasendotierung erreicht werden (grüne Kurve in Abb. 2A). Gleichzeitig wurde mit der Herstellungsmethode und weiter optimierten Prozessschritten das Brechzahlprofil optimiert. Einen Vergleich zeigt Abbildung 2B. Es ist zu erkennen, dass Fluktuationen im Brechzahlprofil deutlich reduziert wurden. Damit lässt sich in Zukunft ein solcher laseraktiver Kern direkt als brechzahlangepasstes Material für Spezialfasern verwenden und aufwändige Zwischenschritte zur Homogenisierung können reduziert werden.

compared to a commercial fiber (with the same geometry) in terms of PD. A significant reduction of PD was achieved by using the Ce-doped system with gas-phase doping (green curve in Fig. 2A). At the same time, the refractive index profile was optimized using this manufacturing method and further optimized process steps. Figure 2B again shows a comparison. It can be seen that fluctuations in the refractive index profile were significantly reduced, meaning that such a laser-active core can be used directly in the future as a refractive index-adapted material for special fibers, and complex intermediate steps for homogenization can be reduced.

References / Literatur

- /1/ C. Jauregui et al.: Physical origin of mode instabilities in high-power fiber laser systems, *Opt. Express* 20(12), 12912–12925 (2012).
- /2/ S. Kuhn et al.: High-power fiber laser materials: influence of fabrication methods and codopants on optical properties, *Proc. SPIE* 10914, 1091405 (2019).



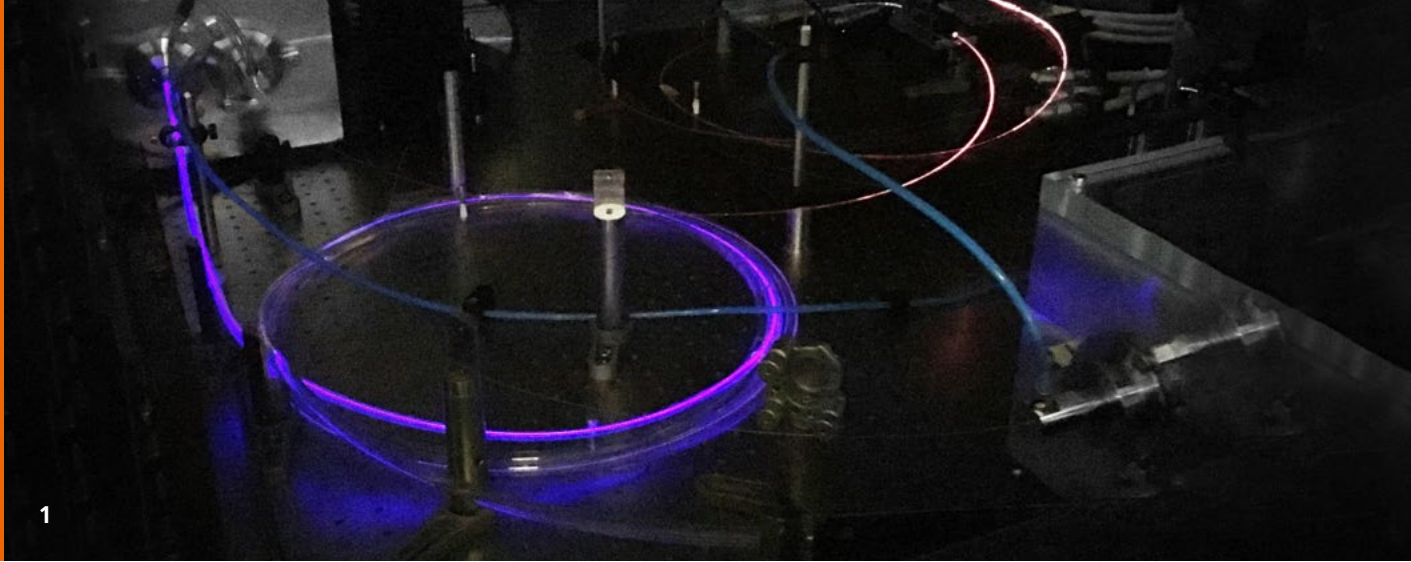
2 Photodarkeningverluste über die Belastungsdauer für eine Faser des Fraunhofer IOF aus dem Jahre 2018 im Vergleich zu einer kommerziellen Faser und der Weiterentwicklung am Fraunhofer IOF in 2019 (A). Gleichzeitige Verbesserung der Form des zu erreichenden flachen Stufenindexprofils (B). | Photodarkening losses over the exposure time for a fiber of the Fraunhofer IOF from 2018 compared to a commercial fiber and further development at the Fraunhofer IOF in 2019 (A). Simultaneous improvement of the shape of the flat step-index profile to be achieved (B).

AUTHORS

Thomas Schreiber
Nicoletta Haarlammert
Stefan Kuhn
Johannes Nold

CONTACT

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



> 1 KW ULTRAKURZPULSLASER BASIEREND AUF TM-DOTIERTEN FASERN

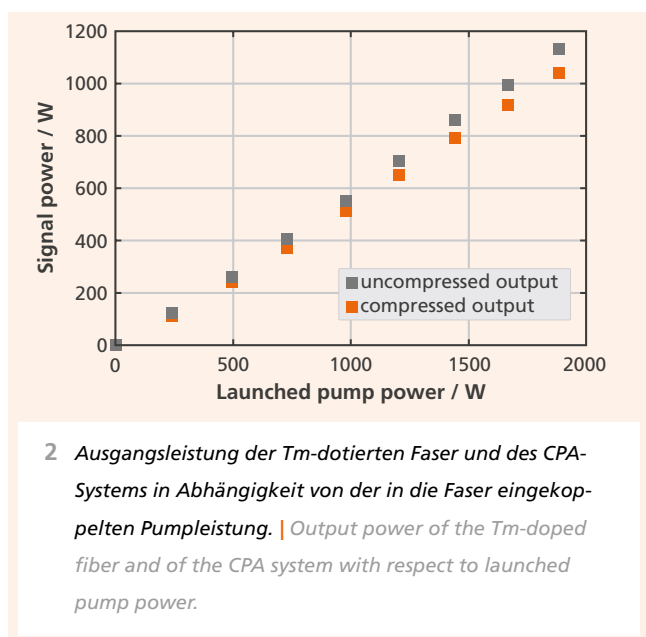
> 1 KW ULTRAFast LASER BASED ON TM-DOPED FIBERS

Leistungsskalierbare Laserquellen mit Pulsdauern im fs-Bereich sind für viele Anwendungen in Industrie und Forschung unentbehrlich geworden. Während für die Realisierung größerer Prozessgeschwindigkeiten oder für bessere Signal/Rausch-Verhältnisse stetig höhere Leistungen nachgefragt werden, ist in der jüngeren Vergangenheit auch der applikationsbezogene Nutzen von Laserwellenlängen $> 1 \mu\text{m}$ identifiziert worden. Dieser reicht von Mikromaterialbearbeitung technisch relevanter Feststoffe wie Silizium (transparent $> 1.2 \mu\text{m}$) bis hin zu Frequenzkonversion in den THz-, fernen Infrarot- oder den weichen Röntgenbereich. Thulium(Tm)-dotierte Glasfasern unterstützen eine sehr breitbandige Emission und eignen sich für die Verstärkung ultrakurzer Pulse im Wellenlängenbereich um $2 \mu\text{m}$. Aufgrund der hervorragenden Transmission spezieller Gläser kann auf die hochentwickelte Glasfasertechnologie von Ytterbium(Yb)-basierten Lasersysteme aufgebaut werden. Ein wichtiger Unterschied zu den Yb-Lasersystemen ist der in Tm-Systemen deutlich höhere Quantendefekt (Pumpwellenlänge $0.79 \mu\text{m}$, Laserwellenlänge $2 \mu\text{m}$). Daraus resultieren Herausforderungen für die Durchschnittsleistungsskalierung, im Besonderen die auf den ersten Blick relativ geringe Effizienz und eine entsprechend hohe Wärmelast. Glücklicherweise lässt die Symmetrie des Termschemas von Tm-dotiertem Quarzglas spezielle Wechselwirkungen zwischen benachbarten Tm-Ionen zu (Kreuzrelaxationen). Infolgedessen können zwei Tm-Ionen mit nur einem absorbierten Pumpphoton angeregt werden. Dies ist enorm hilfreich für die Leistungsskalierung, stellt allerdings auch besondere Anforderungen an die che-

Power scalable laser sources with output pulse durations in the fs-regime have become indispensable for many applications in industry and fundamental research. While there is a continuous demand for higher average powers to realize higher processing speeds or for increased signal to noise ratios, it has been identified recently that there is a significant application relevance of laser emission wavelengths $> 1 \mu\text{m}$. The benefit of such sources can be found in applications ranging from micro material processing of technologically important solid-state materials, such as Silicon (transparent $> 1.2 \mu\text{m}$), to frequency conversion into the THz, far infrared or the soft X-ray ranges. Thulium (Tm)-doped fused silica fibers support a very broadband emission and, therefore, are well suited for the amplification of ultrashort pulses in the wavelength region around $2 \mu\text{m}$. Due to the excellent transmission of specialty glasses at this wavelength, it is possible to exploit the highly developed fiber technology of Ytterbium (Yb)-based laser systems. However, an important difference to the Yb laser systems is the significantly higher quantum defect of Tm systems (pump wavelength $0.79 \mu\text{m}$, signal wavelength $2 \mu\text{m}$). Initially, average power scaling seems to be challenging, especially due to the relatively low efficiency and the high heat load. Fortunately, the structure of the energy level diagram in Tm-doped silica allows for energy exchanging interactions between two neighboring Tm ions (cross-relaxations). It is possible to achieve two excited active ions from one pump photon as a result of these interactions. This is enormously beneficial for power scaling, however, it

1 Hauptverstärker des Systems im Betrieb. | Main amplifier of the system during operation.

mische Zusammensetzung der Fasern und die experimentellen Gegebenheiten. In einem Hochleistungsexperiment wurden die Verstärkereigenschaften einer Tm-dotierten photonischen Kristallfaser untersucht. Die Faser bildete den Hauptverstärker eines CPA-Systems mit einer spektralen Bandbreite für 260 fs Pulsdauer. Durch effektive Entvölkerung des oberen Laserniveaus mit viel Seedleistung bei effizienter Kühlung konnte mit 1,9 kW Pumpleistung > 1,1 kW Signalleistung erreicht werden. Dies entspricht einer Effizienz von > 60 % und ist die höchste Leistung, welche jemals von einem Tm-dotierten Faserlaser demonstriert wurde. Die verstärkten Signalpulse wurden nach dem CPA-Hauptverstärker in einem Kompressor in den fs-Bereich zeitlich komprimiert. Dafür sind hocheffiziente Gitter, welche am Fraunhofer IOF hergestellt wurden, unabdingbar. Die Abbildung 2 zeigt die Ausgangsleistung der Thulium-dotierten Faser und die des CPA-Systems (komprimierte Pulse) in Abhängigkeit von der eingekoppelten Pumpleistung. Abbildung 1 zeigt den Hauptverstärker des Lasers, welcher mit 1,05 kW die weltweit höchste Leistung eines faserbasierten CPA Systems mit beugungsbegrenzter Strahlqualität ($M^2 < 1,1$) liefert.



also imposes several challenges to the chemical composition of the fibers and the experimental conditions. The amplification characteristics of a Tm-doped photonic crystal fiber have been investigated in a high power experiment. The fiber was employed in the main amplification stage of a CPA system with a spectral bandwidth supporting 260 fs pulse duration. By effectively depleting the upper laser level with high seed power and through efficient cooling, it was possible to reach 1.1 kW signal power at 1.9 kW of launched pump power. This corresponds to an efficiency > 60 % and is the highest average power ever demonstrated with a Tm-doped fiber laser. The amplified signal pulses were compressed to the fs-regime after the main amplifier stage using a grating-based compressor. For this purpose, high-efficiency dielectric gratings, which were fabricated in-house at the Fraunhofer IOF, are highly important. Figure 2 depicts the fiber output power and the output power of the CPA system (compressed pulses) with respect to the launched pump power. The operating main amplifier of the system can be seen in Figure 1. It provides an output average power of 1.05 kW and diffraction-limited beam quality ($M^2 < 1.1$), which are world record parameters for fiber-based CPA systems.

AUTHORS

Martin Gebhardt

Christian Gaida

Tobias Heuermann

Cesar Jauregui

Jens Limpert

CONTACT

Prof. Dr. Jens Limpert

Phone +49 3641 9-47811

jens.limpert@iof.fraunhofer.de

SELEKTIVE SPEKTRALE FILTERUNG DURCH KOMPLEXE GITTER IN FASERN

SELECTIVE SPECTRAL FILTERING THROUGH COMPLEX GRATINGS IN FIBERS

Faser-Bragg-Gitter (FBG) bestehen aus einer periodischen Brechzahlmodulation innerhalb des Kerns einer Glasfaser, die wie ein wellenlängenselektiver Spiegel wirkt. Da der reflektierte spektrale Ausschnitt in Transmission fehlt, eignen sich FBG als faser-integrierte Spektralfilter. Ihre Bandbreiten können im Bereich von 0,1 nm bis zu etlichen 10 nm liegen. Die Filterstärke lässt sich flexibel anpassen und ermöglicht somit das Herausfiltern von Licht über mehrere Größenordnungen an Intensität (mehr als 40 dB). Zur Realisierung der Brechzahlmodulationen werden die Faserkerne in der Regel mit Laserlicht bestrahlt. Ultrakurze Laserpulse erlauben es, verschiedene Kernmaterialien (z. B. Kieselglas, photosensitive oder seltene-erden dotierte Gläser) zu strukturieren ^{/1/}.

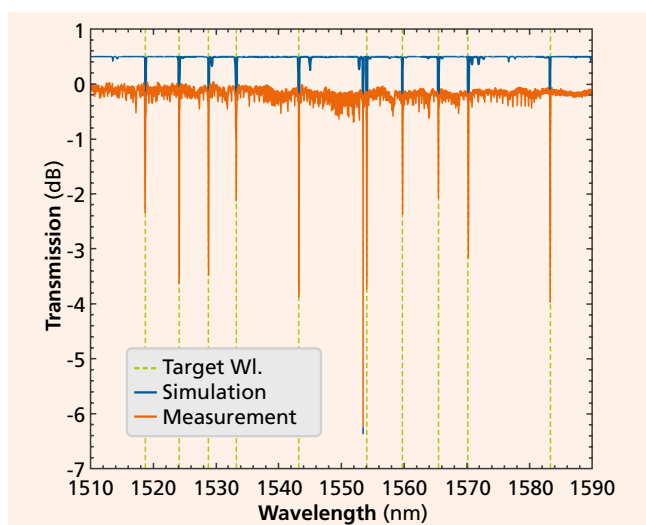
Typischerweise besitzt ein FBG eine einzelne Gitterperiode, so dass genau eine Wellenlänge spektral gefiltert werden kann. Jedoch besteht z. B. in der Astronomie der Bedarf, eine Vielzahl von Wellenlängen zu unterdrücken, da die Spektroskopie mit erdgebundenen Teleskopen durch schmalbandige Emissionslinien von Molekülen aus der oberen Erdatmosphäre limitiert ist. Aufgrund der Vielzahl der zu unterdrückenden Linien würde ein einfaches Aneinanderreihen von unterschiedlichen FBG zu sehr langen Filterstrukturen führen, die anfällig in Bezug auf Temperatur und Spannung sind. Zudem sind auftretende Breitbandverluste kritisch. Eine Alternative sind komplexe Gitterstrukturen, wobei das FBG nicht mehr

Fiber Bragg gratings (FBG) consist of a periodic refractive index modulation within the core of a glass fiber that acts like a wavelength-selective mirror. Because the reflected spectral section is missing in transmission, FBGs are suitable as fiber-integrated spectral filters. Their bandwidths can range from 0.1 nm up to several 10 nm. The filter strength can be flexibly adjusted and thus allows light to be filtered out over several orders of magnitude of intensity (more than 40 dB). To realize the refractive index modulations, the fiber cores are usually irradiated with laser light. Ultrashort laser pulses make it possible to structure a wide variety of core materials (e. g. silica glass, photosensitive, or rare-earth-doped glasses) ^{/1/}.

Typically, an FBG has a single grating period, so that exactly one wavelength can be spectrally filtered. However, in astronomy, for example, there is a need to suppress a large number of wavelengths as spectroscopy with terrestrial telescopes is limited by narrow-band emission lines of molecules from the upper atmosphere. Due to the large number of lines to be suppressed, a simple series of different FBGs would result in very long filter structures that are susceptible to temperature and strain. In addition, broadband losses are critical. An alternative is complex grating structures, where the FBG no longer has only one but several resonances ^{/2/}. This enables compact filter elements that can filter out multiple wavelengths while simultaneously only having a

1 Großkernfaser mit lang-periodischer Strukturierung. |
Large mode area fiber with long period modifications.

nur eine einzelne sondern mehrere Resonanzen aufweist /2/. Dies ermöglicht kompakte Filter-Elemente, die multiple Wellenlängenbereiche herausfiltern können und dabei gleichzeitig das Licht außerhalb dieser Bereiche nur minimal beeinflussen. Dadurch kann die Gesamtlänge des Filters und somit ungewünschte Verluste deutlich reduziert werden. In einem ersten Design haben wir zu Demonstrationszwecken 10 Wellenlängen unterdrückt, bei einer Begrenzung der Gitterlänge auf nur 5 cm. Die spektrale Transmissionsmessung ist in Abbildung 2 gezeigt. Die adressierten Wellenlängen, die mittels gestrichelter Linien dargestellt sind, konnten auf 0,034 nm (entspricht einer Abweichung von 0,0023 %) genau getroffen werden. Neben der Astrophotonik bietet dies natürlich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in Spektroskopie, Sensorik oder Kommunikation.



2 Spektrale Transmissionsmessung eines komplexen FBG /2/. |

Transmission spectrum of a complex FBG /2/.

minimal influence on the light outside these ranges. This allows the overall length of the filter and thus unwanted losses to be significantly reduced. In an initial design, we suppressed 10 wavelengths for demonstration purposes, limiting the grating length to only 5 cm. The spectral transmission measurement is shown in Figure 2. The wavelengths addressed, which are represented by dotted lines, could be reached with an accuracy of 0.034 nm (corresponding to a deviation of 0.0023 %). In addition to astrophotonics, this offers a wide range of applications in spectroscopy, sensor technology, and communication.

References / Literatur

- /1/ J. U. Thomas et al.: Femtosecond pulse written fiber gratings: A new avenue to integrated fiber technology, Laser Photonics Rev. 6(6), 709–723 (2012).
- /2/ T. A. Goebel et al.: Realization of aperiodic fiber Bragg gratings with ultrashort laser pulses and the line-by-line technique, Opt. Lett. 43(15), 3794–3797 (2018).

AUTHORS

Thorsten A. Goebel
Ria G. Krämer
Maximilian Heck
Stefan Nolte

CONTACT

Prof. Dr. Stefan Nolte
Phone +49 3641 9-47820
stefan.nolte@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, 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 herausragenden Persönlichkeiten ihres

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 transfer 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.



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 74:	Die Allianz 3Dsensation
Seite 76:	Leistungszentrum Photonik
Seite 78:	TOF – Maßgeschneiderte optische Fasern
Seite 80:	fo⁺ – Freeform Optics Plus
Seite 82:	Fraunhofer Projektzentrum MEOS
Seite 84:	Max Planck School of Photonics
Seite 86:	Photonics Days 2019
Seite 88:	Auszeichnungen und Preise
Seite 90:	Das Institut in Zahlen
Seite 92:	Fraunhofer-Verbund Light & Surface
Seite 96:	Fraunhofer-Gesellschaft
Seite 98:	Namen, Daten und Ereignisse

CONTENT

Page 74:	The alliance 3Dsensation
Page 76:	Center of Excellence in Photonics
Page 78:	TOF – tailored optical fibers
Page 80:	fo⁺ – Freeform Optics Plus
Page 82:	Fraunhofer Project Hub MEOS
Page 84:	Max Planck School of Photonics
Page 86:	Photonics Days 2019
Page 88:	Awards and prizes
Page 90:	The institute in figures
Page 92:	Fraunhofer Group Light & Surfaces
Page 96:	The Fraunhofer-Gesellschaft
Page 98:	Names, data, activities

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.*



3D sensation

Mensch · Maschine · Umwelt · ZUKUNFT



DIE ALLIANZ 3D^{SENSATION}

3D^{SENSATION} ALLIANCE

In der Forschungsallianz 3D^{sensation} widmen sich aktuell 87 Partner aus Natur- und Technikwissenschaften, Arbeits- und Kreativwissenschaften, Kognitions- und Neurowissenschaften sowie Rechts- und Sozialwissenschaften der Erarbeitung einer strategischen Roadmap für die Jahre 2021-2025 mit möglichen Verwertungsansätzen für das Konsortium. Dabei fokussiert 3D^{sensation} die Aktivitäten auf die Bereiche Kommunikation und Transfer, Qualifizierung und Nachwuchsförderung, Organisation und Vernetzung sowie Technologie und Applikation für die Märkte Produktion, Life Science, Mobilität und Sicherheit. 3D^{sensation} wird mit insgesamt 45 Mio. Euro aus dem Förderprogramm Zwanzig20 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert und stellt sich der Herausforderung, Durchbruchinnovationen in den Bereichen der Datenerfassung, -verarbeitung und -wiedergabe für die Mensch-Maschine-Interaktion zu entwickeln. Zur Begleitung aller Vorhaben bis Projektende wird die Koordinierungsstelle hierfür bis zum 31.12.2021 verlängert.

Zwar ermöglichen derzeitige technische Lösungen ein (teil-)autonomes Interagieren der Maschinen mit ihrer Umgebung und dem Menschen, diese 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 3D^{sensation} sind kognitive Systeme, die den Menschen in seinen Lebens- und Arbeitswelten als echte Assistenten und Partner unterstützen.

Dass die Arbeit von 3D^{sensation} wichtige Bedarfsfelder adressiert, zeigte sich in diesem Jahr nicht zuletzt an dem großen Medieninteresse und der positiven Resonanz zu ihren Messeauftritten. Sowohl auf der weltweit größten Fachmesse für Consumer Electronic »CES« in Las Vegas als auch auf der Hannover Messe konnten Exponate aus den 3D^{sensation}-Forschungsvorhaben viele Gäste und Kooperationspartner begeistern und fanden Erwähnung in einer Vielzahl einschlägiger Fachmedien.

www.3d-sensation.de

In the 3D^{sensation} research alliance, 87 partners from natural and social sciences, ergonomics, neuroscience, and law work on a strategic roadmap for the years 2021-2025. Thereby, the alliance focuses on communication, transfer, qualification, and promotion of junior researchers, organization, networking, as well as technology and its application in the Production, Life Science, Mobility, and Security markets.

3D^{sensation} takes part in the government funding program Zwanzig20 from the Federal Ministry of Education and Research for a total of €45 million. The 3D^{sensation} alliance aims to redefine fundamentally data entry, data processing, and data reporting for Human-Machine-Interaction. To support all plans until the end of the project, the coordinating unit will be extended until 31 December 2021.

Although current technical solutions allow machines to interact (partially) autonomously with their environment and humans, this interaction is limited to specific conditions. The analysis of complex scenarios of technical systems cannot be done by machines. 3D^{sensation} aims to develop cognitive systems, which support and assist humans in work and life.

The work of 3D^{sensation} addresses important requirement fields, demonstrated this year by the great media interest and the positive response to their trade fair appearances. Both at the world's largest trade fair for consumer electronics, "CES" in Las Vegas, and at the Hanover Fair, exhibits from 3D^{sensation} research projects were able to inspire many visitors and cooperation partners and were mentioned in a large number of relevant specialist media.

LEFT *Gestengesteuerte 3D-Sensorplattform zur autonomen Bauteilvermessung.* | *Gesture-controlled 3D sensor platform for autonomous component measurement.*



LEISTUNGSZENTRUM PHOTONIK

CENTER OF EXCELLENCE IN PHOTONICS

Das Leistungszentrum Photonik ist die gemeinsame Forschungs- und Transferplattform des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, des Instituts für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena, des Leibniz-Institut für Photonische Technologien IPHT und des Helmholtz-Instituts Jena HIJ. Es verbindet die sich ergänzenden Kompetenzen der Partner zu einem einrichtungsübergreifenden Innovationsökosystem und schafft Schnittstellen zu Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

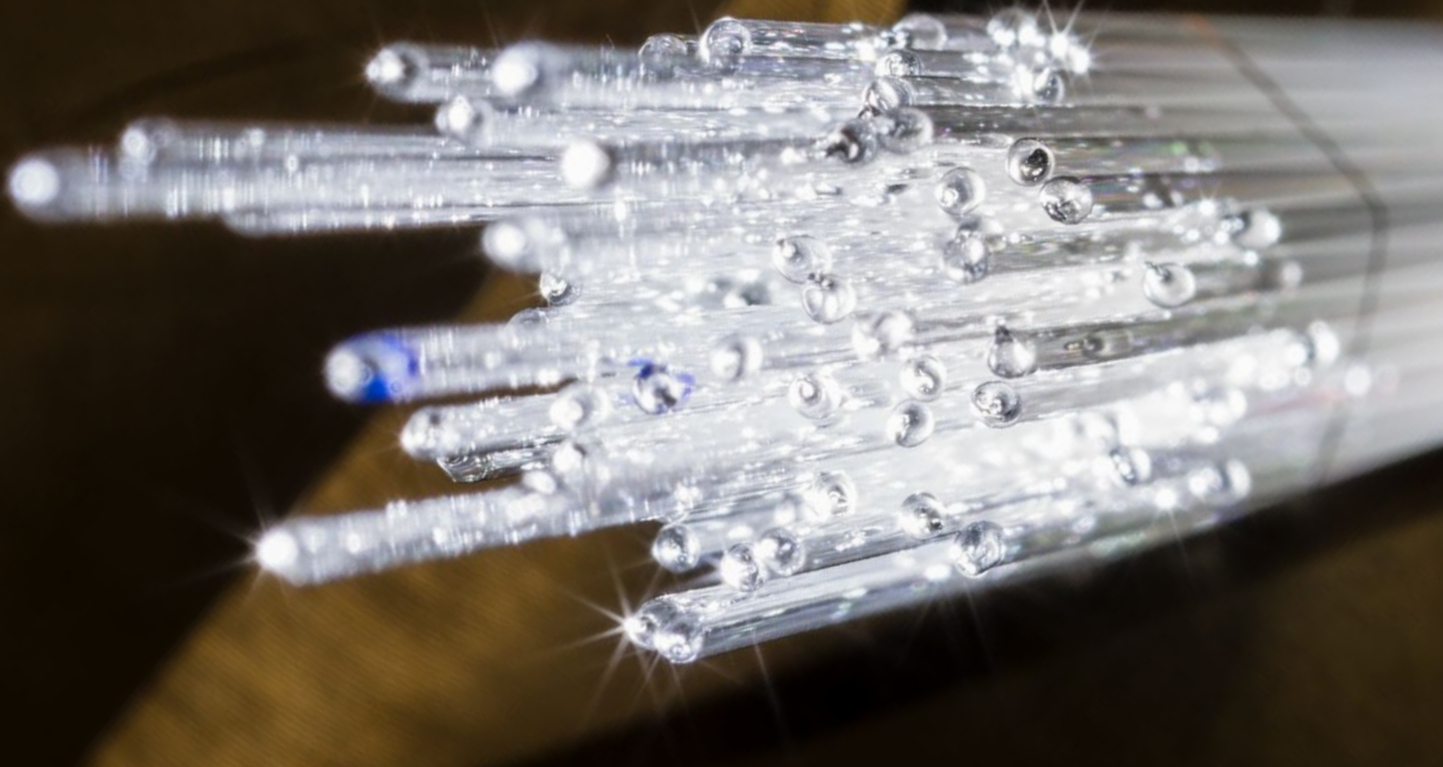
In seinen Aktivitäten fokussiert das Leistungszentrum auf den Transfer von Lösungen mit Licht in die Industrie, Forschung und Gesellschaft. Mit der »Fraunhofer Graduiertenschule für Angewandte Photonik« und der »Max Planck School of Photonics« unterstützt es die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und die enge Einbindung in die Netzwerke der Optik und Photonik. Das im Jahr 2020 beginnende Zertifikats-Weiterbildungsprogramm »Photonics Manager« fokussiert auf die Weiterbildung von Fach- und Führungskräften aus KMU und Konzernen, um diesen mit umfassenden Kenntnissen zu aktuellen Technologien und Marktentwicklungen der Photonik Unterstützung bei strategischen Entscheidungen zu bieten. Mit dem Pilotvorhaben »Digital Innovation Hub Photonics – DIHP« hat sich das Leistungszentrum Photonik das Ziel gesetzt, Gründer, Startups und KMU aktiv bei der Entwicklung und Umsetzung neuartiger Geschäftsideen zu unterstützen.

www.leistungszentrum-photonik.de

The Center of Excellence in Photonics is the joint research and transfer platform of the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF, the Institute for Applied Physics of the Friedrich Schiller University Jena, the Leibniz Institute for Photonic Technologies IPHT, and the Helmholtz Institute Jena HIJ. It combines the complementary competences of the partners to form a cross-institutional innovation ecosystem and creates interfaces for actors from science, industry, and politics.

In its activities, the performance center focuses on the transfer of solutions with light into industry, research, and society. With the Fraunhofer Graduate School for Applied Photonics and the Max Planck School of Photonics, it supports the education of young scientists and their close integration into the networks of optics and photonics. The "Photonics Manager" certificate training program, which begins in 2020, focuses on the further training of specialists and managers from SMEs and corporate groups in order to provide them with comprehensive knowledge of current technologies and market developments in photonics and support them in making strategic decisions. With the "Digital Innovation Hub Photonics" (DIHP) pilot project, the Center of Excellence in Photonics has set itself the goal of actively supporting founders, start-ups, and SMEs in the development and implementation of innovative business ideas.

LEFT *Das Leistungszentrum Photonik verknüpft anwendungsorientierte Forschung mit wissenschaftlich exzellenter Grundlagenforschung zur Kontrolle von Licht. | The Center of Excellence in Photonics merges applied and scientifically excellent basic research on the control of light.*



MASSGESCHNEIDERTE OPTISCHE FASERN TAILORED OPTICAL FIBERS

Der regionale Wachstumskern TOF befindet sich nun in der Phase der Verwertung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse. Das Bündnis aus 18 Unternehmen und drei Forschungseinrichtungen des Thüringer Photonik-Sektors entwickelte die Basis zur Nutzung maßgeschneiderter optischer Fasern und Fasersysteme entlang einer innovativen Technologieplattform mit den Elementen: Materialien, Faserpreform/-ziehen, Beschichtung, Strukturierung und Systemintegration. Die erfolgreiche Validierung der Prozesskette erfolgte an Demonstratoren auf Komponenten- und Systemebene mit dem Schwerpunkt auf Anwendungen in den Bereichen Beleuchtung, Lasermaterialbearbeitung, Textilherstellung, Medizintechnik und Sensorik. Realisiert wurden z. B.:

- eine Superkontinuumsquelle bestehend aus einem Ultrakurzpuls-Faserlaser (1.030 nm, 20 W, 300 fs, 80 MHz) mit einer Suspended-Core Faser
- eine effiziente NIR SC-Lichtquelle 2.3 ENSLI für den Wellenlängenbereich von 1,5 µm bis 2,1 µm SC
- ein Lasersystem mit Verstärkermodul (100 W, 1 mJ), einem 1 kW-Laserdiodentreiber (1.000 Pulse @45 A, 20 Hz) und mikrostrukturierter Großkernfaser mit Luftmantel
- CO₂-Laser gespleißte GRIN-Kollimatoren, apochromatische high-

The regional growth core TOF [tailored optical fibers] was funded from January 2017 to December 2019 by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and is now starting to exploit the research and development results. The alliance of eighteen companies and three research facilities of the Thuringian photonic sector developed the basis for the use of tailored optical fibers and fiber systems along with an innovative technology platform with the elements: materials, fiber preform/drawing, coating, structuring, and system integration. The process chain has been successfully validated by demonstrators at the component and system levels, focusing on applications in the fields of lighting, laser materials processing, textile manufacturing, as well as medical- and sensor technologies, for example by

- a supercontinuum source consisting of an ultrashort pulse fiber laser (1,030 nm, 20 W, 300 fs, 80 MHz) with a suspended core fiber
- an efficient NIR SC light source 2.3 ENSLI for the wavelength range from 1.5 µm to 2.1 µm SC
- a laser system with an amplifier module (100 W, 1 mJ), a 1 kW laser diode driver (1,000 pulses @ 45 A, 20 Hz) and a micro-structured large pitch fiber with airclad



NA Kollimatoren und konfokal chromatische Sensoren

- ein 3D Shape-Sensing System integriert in ein Endoskop mit CAR-bildgebender endomikroskopischer Sonde, einer CARS-Lasereinkoppeleinheit in eine 2-Kern-Double-Clad Faser sowie einem CARS-ps-Laser mit Dual-Wavelength ps-Faser
- ein neuartiges faserbasiertes medizinisches Lasersystem 808 nm GEF und in Textilien integrierte, homogen abstrahlende leuchtende Fasern mit Lichteinkopplung über LED-Module.

Das Fraunhofer IOF engagierte sich maßgeblich in allen vier Verbundprojekten des Wachstumskerns.

Wir danken dem BMBF für die Finanzierung (FKZ 03WKCV01B, 03WKCV02D, 03WKCV03B und 03WKCV04C) im Rahmen der Initiative »Unternehmen Region – Innovative Regionale Wachstumskerne«.



- various CO₂ laser-spliced GRIN collimators, apochromatic high-NA collimators, and confocal chromatic sensors
- a 3D shape-sensing system integrated into an endoscope with a CAR imaging endomicroscopic probe, a CARS laser coupling unit into a double-core double-clad fiber, and a CARS-ps laser with dual-wavelength ps fiber
- a new type of fiber-based medical laser system 808 nm GEF and integrated, homogeneously emitting luminous fibers in textiles with light coupling via LED modules.

The Fraunhofer IOF was involved decisively in all four joint research projects of the growth core.

Funding (grant no. 03WKCV01B, 03WKCV02D, 03WKCV03B, and 03WKCV04C) within the framework "Unternehmen Region – Innovative Regional Growth Core" of the BMBF is gratefully acknowledged.

TOP *Im Regionalen Wachstumskern TOF [tailored optical fibers] werden maßgeschneiderte Spezialfasern für neue Anwendungen entwickelt. | The regional growth core TOF develops tailored special fibers for new applications.*



FREEFORM OPTICS PLUS FREE YOUR MIND – FORM YOUR OPTICS

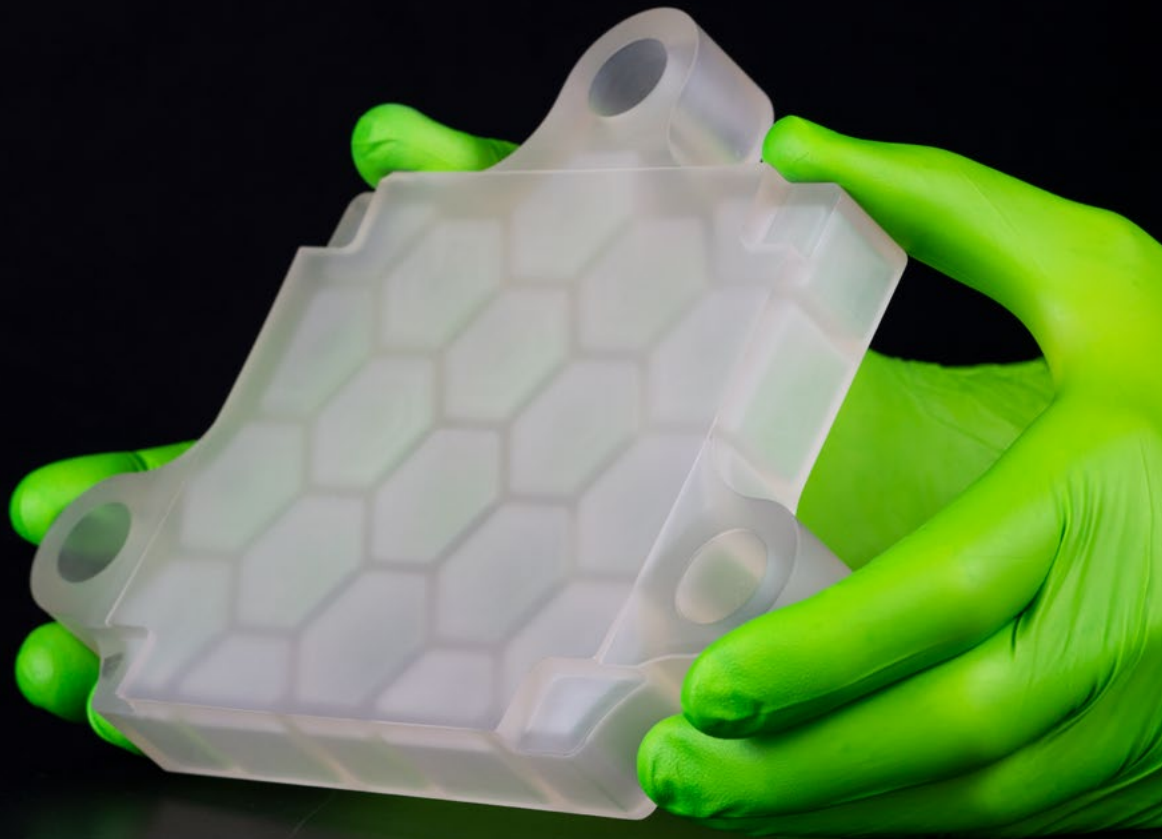
Im regionalen Wachstumskern *fo** [freeform optics plus] entwickeln neun führende Photonik-Unternehmen und zwei renommierte Forschungsinstitute gemeinsam die Basis für den Einsatz von Freiformoptiken für einen erweiterten Spektralbereich, mit verlässlichen Parametern, geeignet für die Serienproduktion und für breitere Anwendungsbereiche, einschließlich Lasermaterialbearbeitung, Machine Vision und Automotive Sensing.

Im Rahmen des Projektes wird die in der Region etablierte Technologieplattform »Freiformoptik« mit den Komponenten »Design«, »Material«, »Bearbeitung«, »Beschichtung«, »Strukturierung« und »Systeme« für Anwendungen im sichtbaren Spektralbereich sowie im Hinblick auf Replikations-, Segmentierungs-, Referenzierungs- und Messtechnikmethoden erweitert und anhand von Demonstratoren auf Komponenten- und Systemebene validiert. Bereits im ersten Projektjahr demonstrierte das Konsortium im Rahmen eines öffentlichen Workshops auf der LASER World of Photonics 2019 in München, wie Freiformoptiken die Welt der Lichtanwendungen verändern werden. Maßgeblich in der Entwicklung von Freiformsystemen für industrielle Anwendungen sind ein robustes Design und smarte Frei-

The regional growth core *fo** [freeform optics plus] is funded from August 2018 to July 2021 by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) for a second research period. The alliance consisting of nine leading photonics companies and two renowned research institutes develops the basis for the use of freeform optics

- suitable for extended wavelength ranges
- with reliable parameters
- ready for volume production
- for broader applications including laser materials processing, machine vision, automotive sensing.

As part of the project, the technology platform with the "design", "materials", "processing", "coating", "structuring", and "systems" components established in the region is being expanded for applications in the visible spectral range as well as for replication, segmentation, referencing, and metrology methods. The holistic process chain will be validated by demonstrators at the component and system levels. In the first year of the project, the consortium demonstrated at LASER World of Photonics 2019



formbearbeitungstechniken, verbunden mit einem vereinheitlichten Datenformat und Datentransfer in der Produktionskette. Vorgestellt wurden unter anderem reflektierende und modulare Optiken für die Lasermaterialbearbeitung als auch optische Freiformsysteme für UV-VIS-Anwendungen mit dem Fokus auf hohen Stückzahlen.

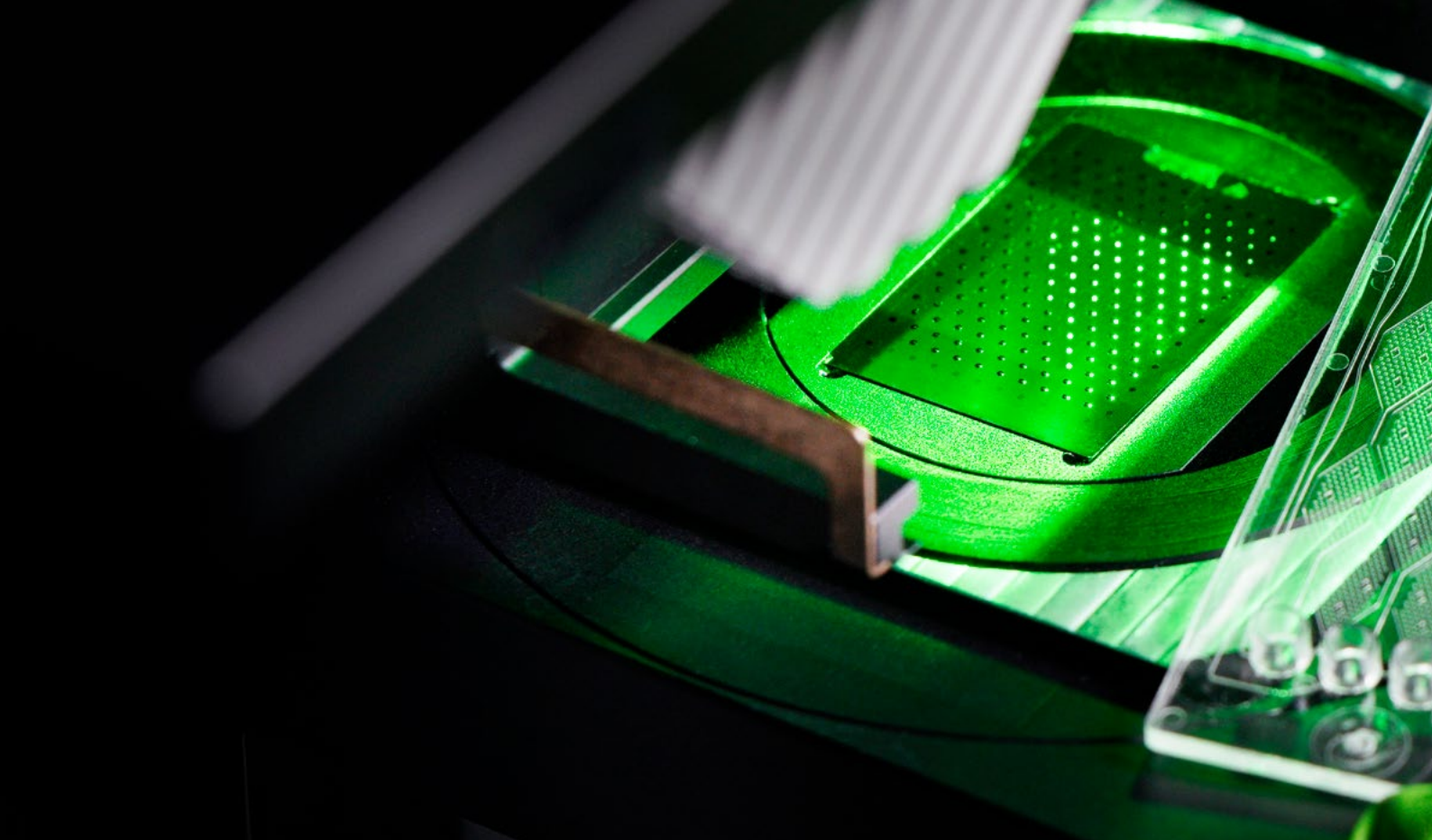
Das Fraunhofer IOF koordiniert die Forschungs- und Entwicklungsbereiche des Verbundes und ist in allen Komponenten der Plattform maßgeblich an der Technologieentwicklung beteiligt.

Wir danken dem BMBF für die Finanzierung (FKZ 03WKCK1B und 03WKCX1B) im Rahmen der Initiative »Unternehmen Region – Innovative Regionale Wachstumskerne«.

in Munich how freeform optics will change the world of light applications. Decisive in the development of freeform systems are a robust design as well as smart freeform processing techniques, along with standardized data format and transfer in the production chain. Among other things, reflective and modular optics for laser materials processing as well as optical freeform systems for UV-VIS applications focusing on large quantities were presented.

The Fraunhofer IOF is the R&D coordinator of the regional growth core and decisively involved in technology developments of each platform area.

Funding (grant no. 03WKCK1B and 03WKCX1B) within the "Unternehmen Region – Innovative Regional Growth Core" framework of the BMBF is gratefully acknowledged.



FRAUNHOFER PROJEKTZENTRUM MEOS

FRAUNHOFER PROJECT HUB MEOS

Das Fraunhofer Projektzentrum MEOS – »Mikroelektronische und Optische Systeme für die Biomedizin« am Standort Erfurt feierte in diesem Fraunhofer-Jubiläumsjahr am 19.10.2019 sein einjähriges Bestehen. In den ersten 5 Jahren bis 2023 ist die Aufbauphase durch die paritätische Anschubfinanzierung aus Mitteln des Freistaates Thüringen und der Fraunhofer-Gesellschaft sichergestellt, mit dem Ziel des anschließenden Übergangs in die übliche Bund-Länder-Finanzierung der Fraunhofer-Gesellschaft. Dabei konzentriert sich die interdisziplinäre Arbeit der drei beteiligten Fraunhofer-Forschungsinstitute für Photonische Mikrosysteme IPMS, für Zelltherapie und Immunologie IZI und Angewandte Optik und Feinmechanik IOF unter der Federführung des IPMS aktuell auf drei verschiedene Technologieplattformen: Strukturierte Beleuchtung, Advanced Imaging, Biofunktionale Oberflächen und Biosensorik.

Ziel der Arbeiten sind der Einsatz und die Weiterentwicklung von Schlüsseltechnologien im Bereich der Biowissenschaften, Mikroelektronik sowie Optik und Photonik in enger Zusammenarbeit mit der Industrie für neue biomedizinische Anwendungen. Im Rahmen der Vorlaufprojekte in den Technologieplatt-

The Fraunhofer Project Hub MEOS – "Microelectronic and Optical Systems for Biomedicine" at the Erfurt site celebrated its first anniversary in this Fraunhofer anniversary year on October 19, 2019. In the first 5 years to 2023, the start-up phase is secured by equal initial financing from the Free State of Thuringia and the Fraunhofer Society, with the aim of subsequent inclusion in the federal and state financing of the Fraunhofer Society. Under the leadership of the IPMS, the interdisciplinary work of the three participating Fraunhofer research institutes for Photonic Microsystems IPMS, Cell Therapy and Immunology IZI, and Applied Optics and Precision Engineering IOF currently focuses on three different technology platforms with Structured Lighting, Advanced Imaging as well as Biofunctional Surfaces and Biosensors.

The aim of the work is the use and further development of key technologies in the fields of life sciences, microelectronics, optics, and photonics in close cooperation with industry for new biomedical applications. Preliminary projects in the technology platforms are creating a technology base and initial prototypes, such as angle-resolved scattered light analysis for



formen entstehen erste Prototypen wie z. B. winkelaufgelöste Streulichtanalyse für die Detektion von biologischen Zellen oder ein ultra-kompaktes digitales Durchlicht-Mikroskop.

Im ersten Jahr wurden die ersten Arbeitsplätze in den Laboren (Elektronik, Elektro-Optik, Robotik) mit über 280 m² im klimatisierten Obergeschoss eingerichtet. Weiterhin konnte die Fraunhofer-Infrastruktur wie z. B. Netzwerk, Telefon und IT-Rechentechnik etabliert werden und zu guter Letzt haben die lang ersehnten Umbauarbeiten des ersten Bauabschnittes im Dezember 2019 begonnen. Dabei wuchs die Anzahl der Mitarbeitenden am Projektzentrum MEOS auf mittlerweile zehn zuzüglich drei Studierenden.

www.meos.fraunhofer.de

the detection of biological cells or an ultra-compact digital transmitted light microscope.

During the first year, the first workplaces were set up in the laboratories (electronics, electro-optics, robotics) with over 280 m² on the air-conditioned, upper floor. Furthermore, the Fraunhofer infrastructure, such as network, telephone, and IT computing technology was established and, last but not least, the long-awaited first phase of reconstruction work started in December 2019. The number of employees at the Project Hub in Erfurt has grown to ten employees and three students.

TOP *Ultra-kompaktes digitales Durchlichtmikroskop für den mobilen Einsatz zur minutenschnellen Bestimmung der Blutkonzentrationen von Metaboliten. | Ultra-compact digital transmitted light microscope for mobile use to determine the blood concentrations of metabolites within minutes.*



MAX PLANCK SCHOOL OF PHOTONICS

Die Max Planck School of Photonics (MPSP) vereint, als Teil der bundesweiten Initiative der Max Planck Schools zur Stärkung der Sichtbarkeit der deutschen Graduiertenförderung im internationalen Wettbewerb, die renommiertesten Photonik-Forschenden der deutschen Universitäten und der vier großen außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Die MPSP bietet ein forschungsnahes zweiphasiges Promotionsprogramm mit einer »Study Phase« mit Masterabschluss als Zwischenqualifikation an, und steht bereits Bachelor-Absolventen offen. Auch Masterabsolventen können sich bewerben, die direkt in die »Research Phase«, der Forschungsphase, zur Erlangung des Doktorgrades starten.

Für die erste Studierendenkohorte der Max Planck Schools, die im September 2019 an den verschiedenen Schools gestartet hat, wurden in mehrstufigen Auswahlverfahren hinsichtlich Qualifikationen, Motivation und fachlicher Exzellenz insgesamt 74 Promovierende aus mehr als 16 Ländern ausgewählt. Am 11. September 2019 wurden alle Promovierende, Fellows, Vertretungen der Partnerorganisationen und Mitwirkende zu einem Kickoff-Symposium

The Max Planck School of Photonics (MPSP) is part of a nationwide initiative of the Max Planck Schools to strengthen the visibility of German graduate funding in the international field, uniting the most renowned photonics researchers from German universities as well as the four large, non-university research institutions. It offers a research-oriented, two-phase doctoral program with a "Study Phase" leading to a Master's degree as an intermediate qualification, which is open to candidates with a Bachelor's degree. Graduates with a Master's degree can also apply and enter directly into the "Research Phase" of the program to obtain their doctorate.

For the first student cohort of the Max Planck Schools who started studying at the three schools in September 2019, a total of 74 doctoral students from more than 16 countries were selected through multi-stage selection procedures with regard to qualifications, motivation, and academic excellence.

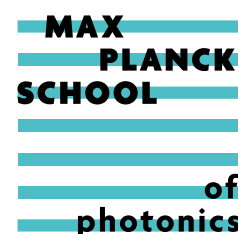


ins Harnack-Haus eingeladen, um allen School-Beteiligten eine Plattform für Austausch und Vernetzung zu geben und die wissenschaftlichen Themen der drei Schools der Öffentlichkeit zu präsentieren.

Die MPSP hat nun im September ihren Betrieb aufgenommen. 20 der insgesamt 74 ausgewählten Promovierenden haben den Auswahlprozess erfolgreich durchlaufen und bilden zusammen die erste Studienkohorte, die nun von dem neuen Forschungs- und Lehrprogramm profitieren können. Sie wurden im Rahmen der Photonics Days Jena am Campus Ernst-Abbe-Platz mit einer offiziellen Grußrede von Prof. Walter Rosenthal, Präsident der Friedrich-Schiller-Universität, in Jena willkommen geheißen.

On September 11, 2019, all doctoral candidates, fellows, representatives of partner organizations, and supporters were invited to a kick-off symposium at the Harnack House to give all school participants a platform for exchange and networking and present the scientific topics of the three schools to the public. The MPSP launched its activities in September. 20 of the 74 selected doctoral students successfully completed the selection process and now constitute the first study cohort to benefit from the new research and teaching program. They were welcomed at Photonics Days Jena at the Campus Ernst-Abbe-Platz with an official welcoming speech by Prof. Walter Rosenthal, President of the Friedrich Schiller University, in Jena.

TOP *Promovierende und Fellows der Max Planck School of Photonics beim Kickoff-Symposium der Max Planck Schools in Berlin. | PhD students and fellows of the Max Planck School of Photonics at the Kickoff Symposium of the Max Planck Schools in Berlin.*





PHOTONICS DAYS JENA

In cooperation with
Max Planck School of Photonics



PHOTONICS DAYS 2019

Es wurde getüftelt, gepitched und genetzt, was das Zeug hielt: Die Photonics Days 2019 in Jena hatten es in sich. Gemeinschaftlich ausgerichtet mit der Photonik-Graduiertenschule Max Planck School of Photonics wurde das Jahresevent des Fraunhofer IOF erstmals als HR- und Karriereevent ausgerichtet und adressierte primär Studierende und Doktoranden.

Neben einem Makeathon der Lichtwerkstatt Jena wurden den Teilnehmenden umfangreiche Möglichkeiten geboten, um Fragen zu ihrer Berufswahl zu klären: Welche Karrierewege kann man in der Photonik einschlagen? Worauf kommt es an, wenn ich mich für Jobs in Photonikunternehmen bewerbe? Um Perspektiven zu gewinnen, hatten die Teilnehmenden bei einem Science and Industry Breakfast und Industrie-Speeddates ausreichend Gelegenheit, Vertreter der Optik- und Photonikindustrie kennenzulernen und Einblicke in zukünftige Trends und Anforderungen der Branche zu erhalten. Anlässlich des 70. Jubiläums der Fraunhofer-Gesellschaft wurde das Programm zusätzlich um eine öffentliche Vortragsreihe ergänzt. Rund 300 Gäste strömten in den Hörsaal der Friedrich-Schiller-Universität. Publikumshighlights waren die Keynote-Vorträge des ZEISS-Vorstandsvorsitzenden Prof. Michael Kaschke und des Physik-Nobelpreisträgers Gérard Mourou. Großer Beliebtheit erfreuten sich auch die »Elevator-Pitches« des Leistungszentrums Photonik, bei dem Nachwuchsforschende in 3-minütigen Kurzvorträgen das Publikum von ihren Forschungsideen überzeugen mussten.

Im Rahmen des feierlichen »Dinner under the Stars« wurde abschließend der Nachwuchspreis des Fraunhofer IOF – der Applied Photonics Award – im ZEISS-Planetarium Jena durch den Thüringer Wirtschafts- und Wissenschaftsminister Wolfgang Tiefensee und Jurymitglied Dr. Jan Werschnik (Jenoptik AG) verliehen. Aufgrund der positiven Resonanz freuen wir uns, dass die Photonics Days Jena zukünftig weiter mit dieser Ausrichtung durchgeführt und als HR- und Karriereevent etabliert werden.

For three days, it was all about working meticulously, pitching, and networking: Photonics Days 2019 had it all. The annual event of the Fraunhofer IOF was organized jointly with the Max Planck School of Photonics graduate school for the first time as an HR and career event and primarily addressed students and doctoral candidates.

In addition to a Makeathon by Lichtwerkstatt Jena, the participants were offered extensive opportunities to ask questions about their career choice: Which career paths can be taken in photonics? What is important when I apply for jobs in photonics companies? To gain perspectives and insights into future trends and requirements of the industry, the participants had the opportunity to meet representatives of the optics and photonics industry at a Science and Industry Breakfast and Industry Speeddates. On the occasion of the 70th anniversary of the Fraunhofer-Gesellschaft, a public lecture series was added to the program. Around 300 visitors showed up at the auditorium of the Friedrich Schiller University. Audience highlights were the keynote speeches by ZEISS CEO Prof. Michael Kaschke and the Nobel Prize winner in Physics, Gérard Mourou. The "Elevator Pitches" of the Center of Excellence in Photonics, where young scientists had to convince the audience of their research ideas in three minutes short lectures, were also very popular. During the festive "Dinner under the Stars", the junior prize of the Fraunhofer IOF – the Applied Photonics Award – was finally awarded at the ZEISS-Planetarium Jena by the Thuringian Minister of Economics and Science, Wolfgang Tiefensee, and member of the jury, Dr. Jan Werschnik (Jenoptik AG). Due to the positive response, we are pleased that Photonics Days Jena will occur in the future with this orientation and established as an HR and career event.

LEFT Die Gewinner des Applied Photonics Award 2019 zusammen mit Andreas Tünnermann, Gérard Mourou und Michael Kaschke im Zeiss-Planetarium in Jena. | The winners of the Applied Photonics Award 2019 together with Andreas Tünnermann, Gérard Mourou and Michael Kaschke at the Zeiss Planetarium.



AUSZEICHNUNGEN UND PREISE AWARDS AND PRIZES

Die Arbeiten der Forschenden des Leistungszentrums Photonik fanden im Jahr 2019 weltweiten Anklang.

Die wissenschaftlichen Beiträge zu Faserlasern von Prof. Jens Limpert und seinem Team wurden mit einem »ERC Advanced Grant« gewürdigt. Prof. Jens Limpert ist es damit gelungen, zusammen mit dem »Starting Grant« (2009) und dem »Consolidator Grant« (2014) drei dieser renommierten Auszeichnungen zu erhalten.

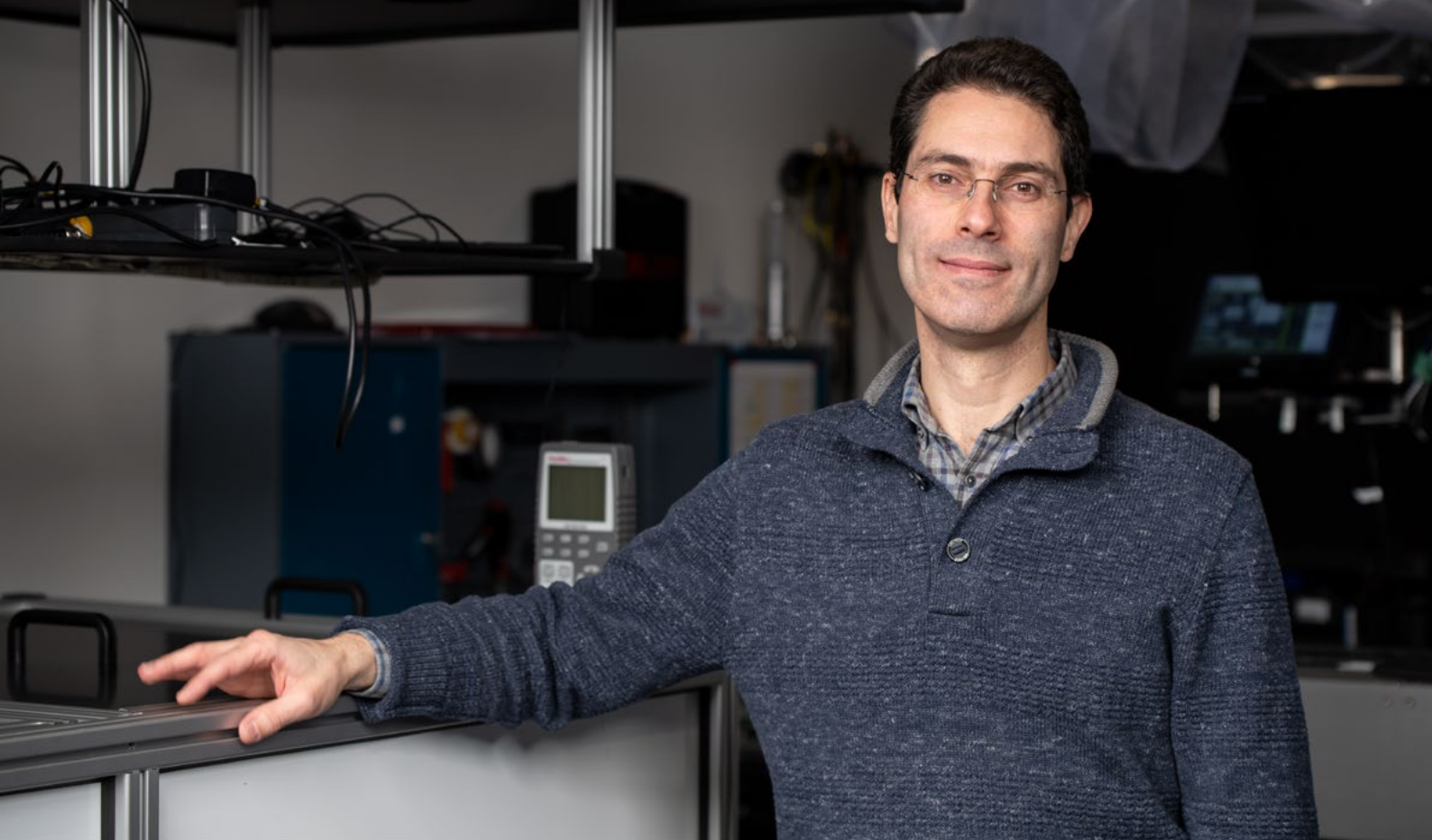
Für seine Arbeiten in Wissenschaft und Lehre wurde Dr. César Jáuregui-Misas mit einem Heisenberg-Stipendium ausgezeichnet. Dieses würdigt herausragende Forschende und ermöglicht den Ausbau der wissenschaftlichen Arbeiten sowie die Vorbereitung auf eine wissenschaftliche Leitungsposition.

Den »Edmund Optics Educational Award 2019« erhielten Jan Sperrhake (IAP), Maria Nisser (UKJ) und Chen Zhang (TU Ilmenau) für ihre interdisziplinären Arbeiten zur optischen Erfassung von Vitalparametern. Die Projektidee entstand im Rahmen der Innovationsallianz 3Dsensation und zielt auf die berührungslose

In 2019, contributions of the scientists of the Center of Excellence in Photonics were appreciated worldwide.

The scientific contributions to fiber lasers made by Prof. Dr. Jens Limpert and his team were honored with an "ERC Advanced Grant". Together with the "Starting Grant" (2009) and the "Consolidator Grant" (2014), Prof. Jens Limpert has now succeeded in receiving three of these renowned awards. Dr. César Jáuregui-Misas was awarded a Heisenberg scholarship for his encouraging work in science and teaching. The Heisenberg program honors outstanding researchers and enables them to expand their scientific work and prepare for a leading position in science.

The "Edmund Optics Educational Award 2019" was presented to Jan Sperrhake (IAP), Maria Nisser (UKJ), and Chen Zhang (TU Ilmenau) for their interdisciplinary work on the optical detection of vital signs. The project idea was developed as part of the 3Dsensation innovation alliance and aims to develop contactless measuring systems for heart rate and blood oxygen content for sensitive patients, such as new-borns.



Messung von Herzfrequenz und Blutsauerstoffgehalt für empfindliche, zu behandelnde Menschen wie Neugeborene ab.

Für seine Promotion zum laserbasierten Schneiden gehärteter Gläser erhielt Dr. Klaus Bergner den »Dr.-Ing. Siegfried Werth Preis 2019«. Die Promotion von Dr. Wilhelm Eschen zum Thema »Table-top Coherent Diffractive Imaging using a High-Harmonic Source« wurde mit dem »ZEISS Ph.D. Award in Modern Optics« ausgezeichnet. Dr. Yi Zhong erhielt den Promotionspreis der Friedrich-Schiller-Universität Jena für seine Arbeit zum Optik-Design von Freiform-Systemen.

Zum dritten Mal hat die SPIE aufstrebende Wissenschaftler mit dem »Rising Researcher Award« gewürdigt. Auf der Konferenz SPIE DCS 2019 erhielt Dr. Stefan Heist diese Auszeichnung für seine außerordentlichen Beiträge zur optischen Messtechnik, 3D-Formmessung und schnellen Musterprojektion. Auch auf zahlreichen weiteren nationalen und internationalen Tagungen stießen die Beiträge der Forschenden des Leistungszentrums Photonik auf großes Interesse und wurden mit vielfältigen Auszeichnungen wie »Best Paper Awards« honoriert.

For his doctorate on laser-based cutting of hardened glass, Dr. Klaus Bergner received the "Dr.-Ing. Siegfried Werth Prize 2019". Dr. Wilhelm Eschen's doctoral thesis on "Table-top Coherent Diffractive Imaging using a High-Harmonic Source" was awarded the "ZEISS Ph.D. Award in Modern Optics". Dr. Yi Zhong received the Ph.D. award from the Friedrich Schiller University Jena for his work on the optical design of freeform systems.

For the third time, SPIE has honored aspiring scientists with the "Rising Researcher Award". At the conference SPIE DCS 2019, Dr. Stefan Heist received this award for his extraordinary contributions to optical metrology, 3D form measurement, and high-speed pattern projection.

The work of the researchers of the Center of Excellence in Photonics attracted wide interest at manifold national and international conferences, where numerous contributions were honored with "Best Paper Awards".

LEFT *Maria Nisser and Jan Sperrhake*

TOP *César Jáuregui-Misas.*

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

THE INSTITUTE IN FIGURES

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2019 ist gegenüber dem Vorjahr um 13 % gestiegen, wobei die Aufwendungen für Personal um 16 % stiegen, die Sachausgaben um 11 %. Basis ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag erreichte über 17,4 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten ebenfalls 13,2 Millionen Euro.

Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2019 wurden insgesamt 6,8 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

Personal

Die Zahl der Mitarbeiter des Fraunhofer IOF ist im Jahr 2019 um 8,5 % gestiegen. 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 2019 by 13 %, with expenditures for staff grow by 16 % and material costs grow by 11 %. The basis is still the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached more than 17.4 million euros. The received public funding also reached 13.2 million euros.

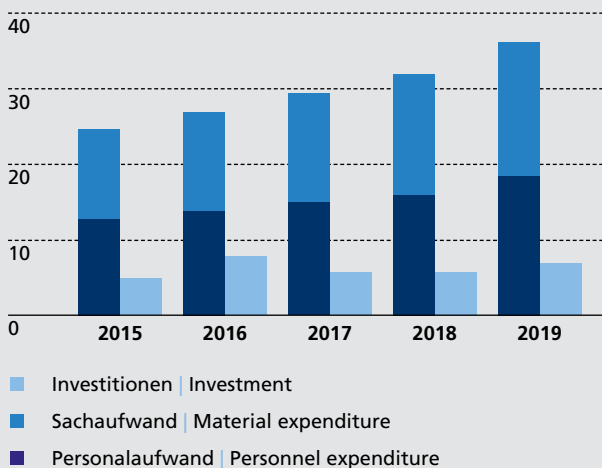
Investments

The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 6.8 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2019.

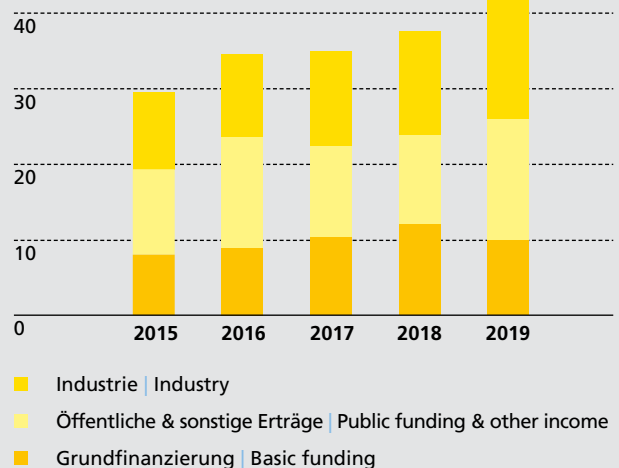
Staff

The number of employees of the Fraunhofer IOF increased by 8,5 % in 2019. 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.

Fraunhofer IOF Gesamthaushalt | Budget (Mio. €)



Fraunhofer IOF Ertrag | Revenue (Mio. €)



Das IAP 2019 in Zahlen

Die Mitarbeitenden des Institut für Angewandte Physik (IAP) der Friedrich-Schiller-Universität Jena konnten für 2019 Drittmittel in Höhe von 11,3 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2019 8 Professoren, 38 wissenschaftliche und 16 technische Mitarbeitende sowie 104 Doktoranden und 70 Studierende.

Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

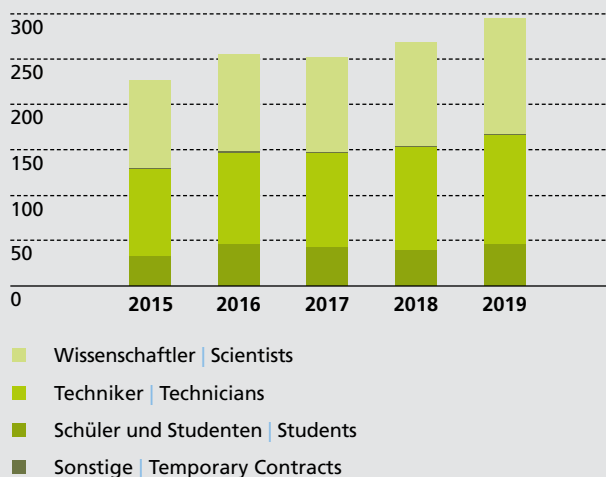
The IAP in figures 2019

The employees at the Institute of Applied Physics (IAP) acquired external funds worth 11.3 million euros in 2019 (see table). A total staff of 8 professors, 38 research assistants, 16 technical assistants, 104 doctoral candidates, and 70 students were working at IAP in 2019.

The majority of completed theses are listed in the attachment.

Fraunhofer IOF

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

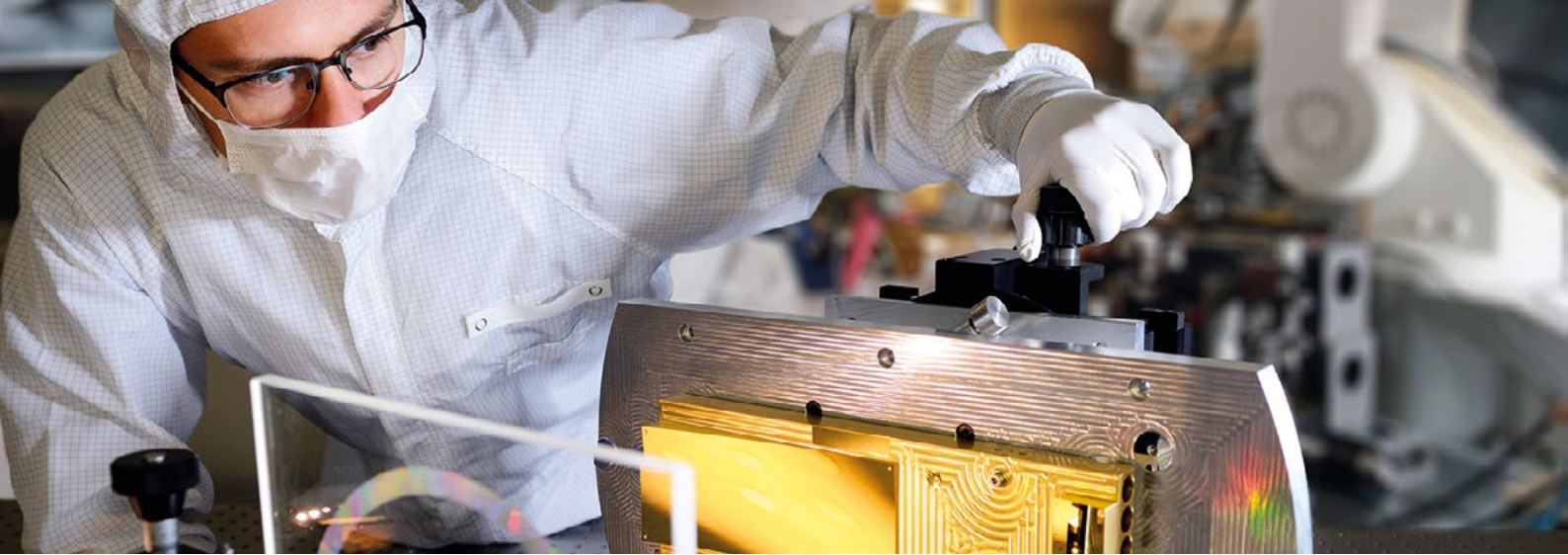


IAP

Drittmiteleinahmen IAP 2019 |

Contract research revenue IAP 2019

Fördergeber Contracts with	Zuwendung Funds T€
BMBF	3.607
DFG	1.737
EU	1.277
Thüringen Thuringia	1.463
Stiftungen Foundations	788
Industrie Industry	2.452



FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

FRAUNHOFER GROUP LIGHT & SURFACES

Der Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces bündelt die Kompetenzen von sechs Fraunhofer-Instituten auf den Gebieten Laser-, Optik-, Mess- und Beschichtungstechnik. Die Institute vereinen aufeinander abgestimmte Kompetenzen in den Bereichen Laserfertigungsverfahren, Laser-Strahlquellen, Messtechnik, Medizin und Life Sciences, Optische Systeme und Optikfertigung, EUV-Technologie, Prozess- und System-simulation, Werkstofftechnik, Mikro- und Nanotechnologie, Dünnschicht- sowie Plasma- und Elektronenstrahltechnik.

Kompetenz durch Vernetzung

Basierend auf grundlegenden Arbeiten in verschiedenen Anwendungsfeldern, gewährleistet der Verbund eine schnelle und flexible Realisierung kundenspezifischer Systemlösungen im Bereich Schichttechnik und Photonik. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Markts ausgerichtete Strategien, führen zu Synergieeffekten für den Kunden. In Kooperation mit den jeweils ortsansässigen Universitäten, bieten die Institute das gesamte Spektrum der studentischen Ausbildung bis hin zur Promotion. Auf diese Weise sind die Fraunhofer-Institute nicht nur Innovationspartner für technologische Entwicklungen, sondern dienen auch kontinuierlich als Quelle des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Kernkompetenzen des Fraunhofer-Verbunds

Die aufeinander abgestimmten Kompetenzen der sechs Verbundpartner gewährleisten eine schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an die unterschiedlichen Anforderungen aus den Bereichen: Laserfertigungsverfahren, Strahlquellen, Messtechnik, Medizin und Life Sciences, Werkstofftechnik, Optische Systeme und Optikfertigung, Mikro- und Nanotechnologien, Dünnschichttechnik, Plasmatechnik, Elektronenstrahltechnik, EUV-Technologie, Prozess- und Systemsimulation.

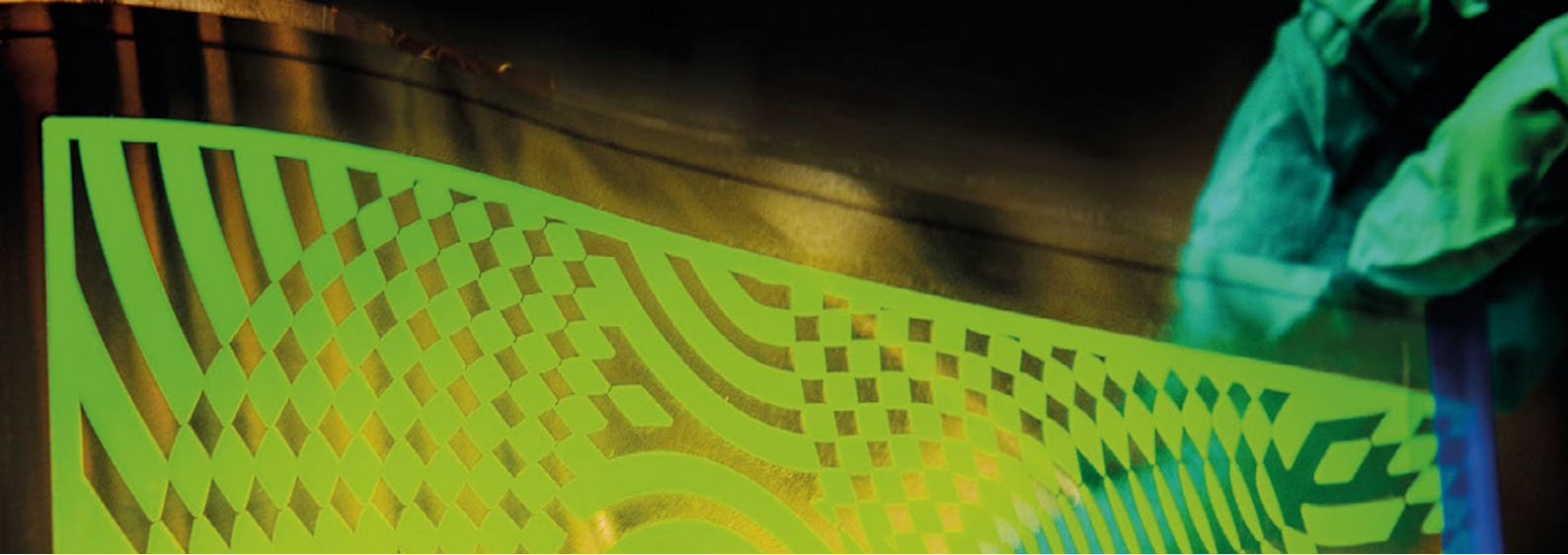
The Fraunhofer Group for Light & Surfaces combines six Fraunhofer institutes that cooperate in the fields of lasers, optics, metrology and coating technology. The institutes combine complementary skills in the following areas: laser manufacturing techniques, beam sources, metrology, medicine and life sciences, optical systems and optics manufacturing, EUV technology, process and system simulation, materials technology, micro- and nanotechnologies, and thin-film, plasma and electron beam technology.

Competency by networking

Building on their basic research in the various fields of application, the institutes work together to supply fast, flexible and customer-specific system solutions in the fields of coating technology and photonics. Strategy is coordinated to reflect current market requirements, yielding synergies that benefit the customer. The institutes also collaborate with their local universities to provide the full range of student education, up to and including doctoral studies. As a result, the Fraunhofer institutes are not only partners to technological development, but also a continuous source of new talent in the fields of coating technology and photonics.

Core competences of the Fraunhofer Group

The Fraunhofer institutes' competences are coordinated to ensure that research can be quickly and flexibly adapted to the requirements of the various fields of application: laser manufacturing, beam sources, metrology, medicine and life sciences, materials technology, optical systems and optics manufacturing, micro- and nanotechnologies, thin-film technology, plasma technology, electron beam technology, EUV technology, process and system simulation.



Die Anwendungsfelder

Mit dem umfangreichen Know-how der Institute können maßgeschneiderte laser- und prozessspezifische Lösungen realisiert werden, die Werkstoffe, Produktdesign, Konstruktion, Produktionsmittel und Qualitätssicherung umfassen. Dabei werden vielfältige Branchen adressiert: Automotive, Biotechnologie und Life Science, Elektronik und Sensorik, Energie und Umwelt, Luft- und Raumfahrt, Maschinen- und Anlagenbau, Werkzeugbau, Optik.

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 und IC-/ Systemdesign. Es bietet ein breites Spektrum an Forschungs-, Entwicklungs- und Pilotfertigungsmöglichkeiten,

Fields of application

The Fraunhofer institutes are able to draw on extensive process expertise to provide customers with tailored, laser- and process-specific solutions that take material and product design, construction, means of production and quality assurance into account. These solutions serve a wide range of industries: automotive, biotechnology and life sciences, electronics and sensor technology, energy and the environment, aerospace, mechanical and plant engineering, tool and die manufacturing, optics.

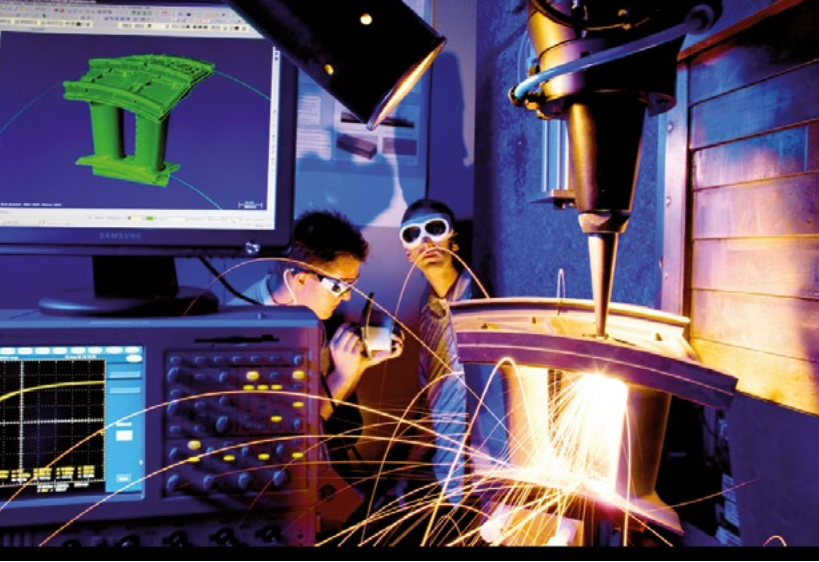
Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF

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 optoelectrical 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. Fraunhofer FEP continuously enhances them and makes them available to a wide range of industries: mechanical



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 Laseranlagen-technik, 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 und Fahrzeugtechnik, Luft- und

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

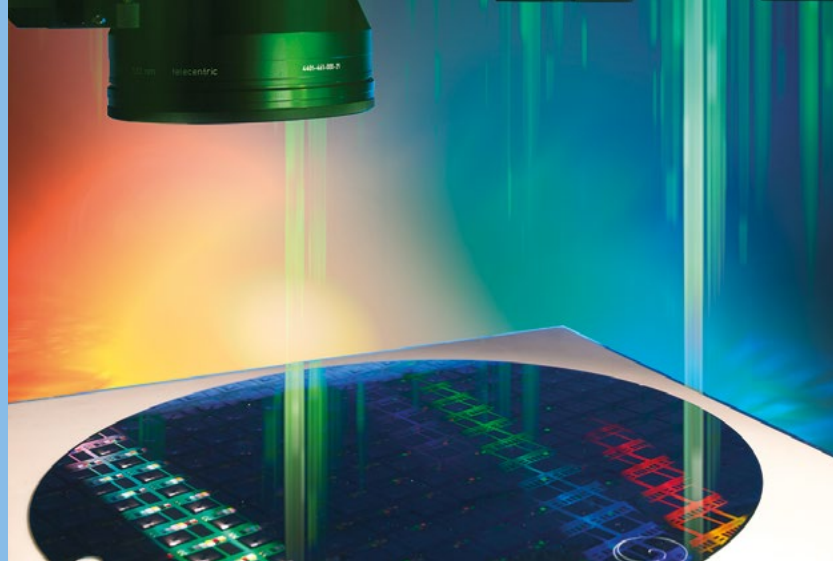
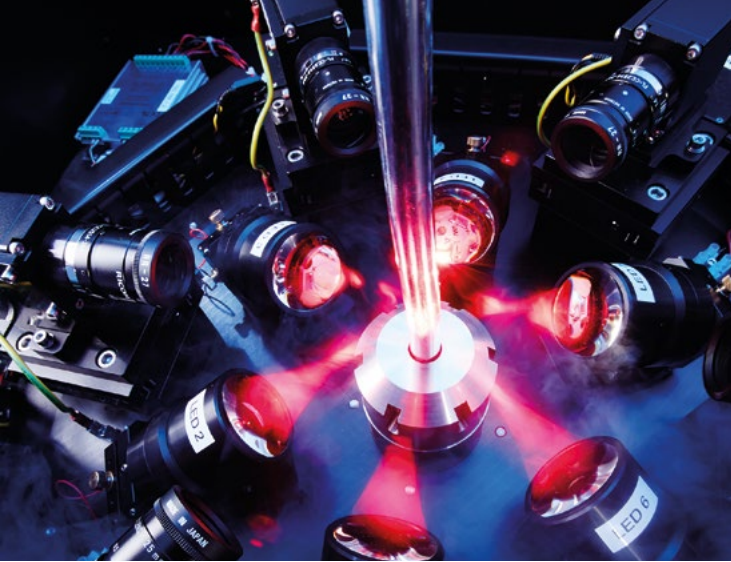
With more than 400 patents since 1985 the Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT develops innovative laser beam sources, laser technologies, and laser systems for its partners from the industry. Our technology areas cover the following topics: laser and optics, medical technology and biophotonics, 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



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 Formerfassung, der Gas- und Prozesstechnologie sowie im Bereich Funktionelle Materialien und Systeme.
www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Licht und Schicht: Das Fraunhofer IWS wirkt überall dort, wo Laser- auf Oberflächentechnik trifft. Wenn es darum geht, unterschiedliche Materialien Lage um Lage aufzutragen, zu fügen, zu trennen, zu funktionalisieren oder zu analysieren, kommt das Dresdner Institut ins Spiel. Von der Entwicklung neuer Verfahren über die Integration in die Fertigung bis hin zur anwendungsorientierten Unterstützung reicht das Angebot – alles aus einer Hand. Das Fraunhofer IWS stellt sich den Herausforderungen der Digitalisierung. Der Fokus liegt auf der Forschung und Entwicklung von Lösungen für »Industrie 4.0«.
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

Light and layer: Fraunhofer IWS works wherever lasers and surface technology meet. The Dresden institute comes into play if the task is to deposit different materials layer by layer, to join, cut, functionalize or analyze. Services range from developing new techniques via integration into manufacturing, up to user-oriented support – in single-source responsibility. The Fraunhofer IWS is meeting the challenges of digitization with a focus on researching and developing solutions for "Industry 4.0".
www.iws.fraunhofer.de

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

RESEARCH OF PRACTICAL UTILITY

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist die weltweit führende Organisation für anwendungsorientierte Forschung. Mit ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien sowie auf die Verwertung der Ergebnisse in Wirtschaft und Industrie spielt sie eine zentrale Rolle im Innovationsprozess. Sie ist Wegweiser und Impulsgeber für innovative Entwicklungen und wissenschaftliche Exzellenz. Mit inspirierenden Ideen und nachhaltigen wissenschaftlich-technologischen Lösungen fördert die Fraunhofer-Gesellschaft Wissenschaft und Wirtschaft und wirkt mit an der Gestaltung unserer Gesellschaft und unserer Zukunft.

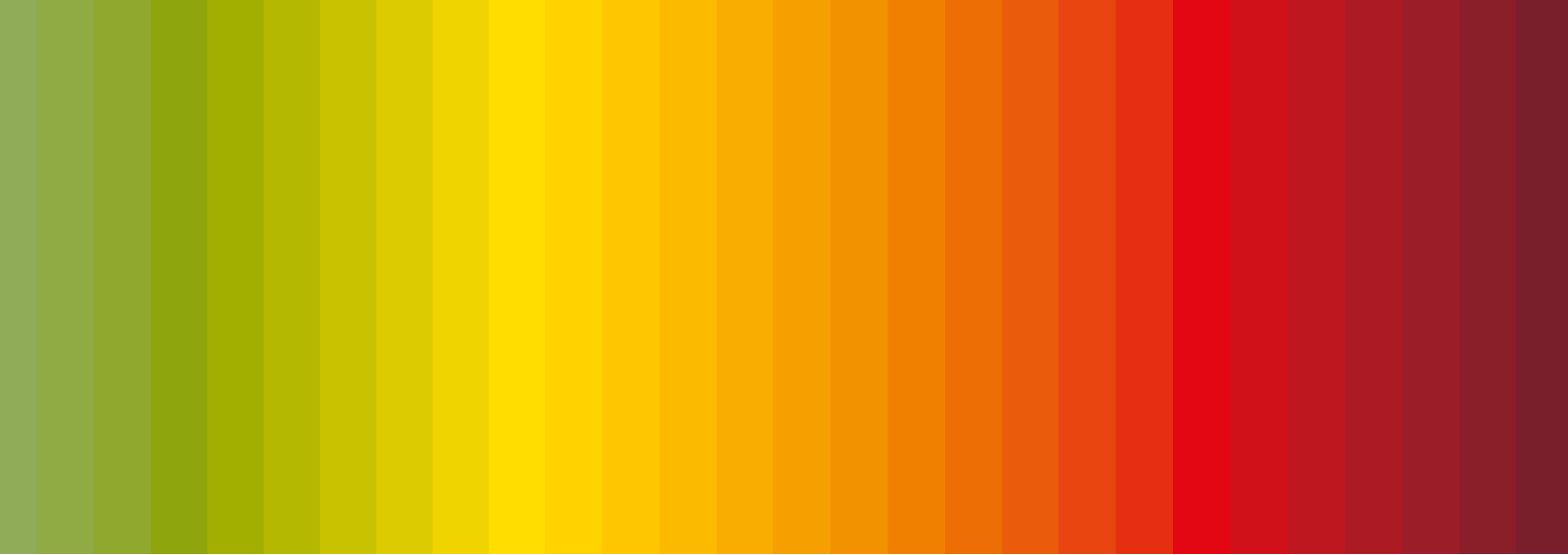
Interdisziplinäre Forschungsteams der Fraunhofer-Gesellschaft setzen gemeinsam mit Vertragspartnern aus Wirtschaft und öffentlicher Hand originäre Ideen in Innovationen um, koordinieren und realisieren systemrelevante, forschungspolitische Schlüsselprojekte und stärken mit wertorientierter Wertschöpfung die deutsche und europäische Wirtschaft. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Austausch mit den einflussreichsten Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 74 Institute und Forschungseinrichtungen. Rund 28 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,8 Milliarden Euro. Davon fallen 2,3 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent davon erwirtschaftet Fraunhofer mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 30 Prozent steuern Bund und Länder als Grundfinanzierung bei, damit die Institute schon heute Problemlösungen entwickeln können, die in einigen Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft entscheidend wichtig werden.

The Fraunhofer-Gesellschaft is the world's leading applied research organization. With its focus on developing key technologies that are vital for the future and enabling the commercial exploitation of this work by business and industry, Fraunhofer plays a central role in the innovation process. Based in Germany, Fraunhofer is an innovator and catalyst for groundbreaking developments and a model of scientific excellence. By generating inspirational ideas and spearheading sustainable scientific and technological solutions, Fraunhofer provides science and industry with a vital base and helps shape society now and in the future.

At the Fraunhofer-Gesellschaft, interdisciplinary research teams work together with partners from industry and government in order to transform novel ideas into innovative technologies, to coordinate and realize key research projects with a systematic relevance, and to strengthen the German and the European economy with a commitment to creating value that is based on human values. International collaboration with outstanding research partners and companies from around the world brings Fraunhofer into direct contact with the key regions that drive scientific progress and economic development.

Founded in 1949, the Fraunhofer-Gesellschaft currently operates 74 institutes and research institutions. The majority of our 28,000 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of 2.8 billion euros. Of this sum, 2.3 billion euros is generated through contract research. Around 70 percent of Fraunhofer's contract research revenue is derived from contracts with industry and publicly funded research projects. The remaining 30 percent comes from the German federal and state governments in the form of base funding. This enables the institutes to work on solutions to problems that are likely to become crucial for industry and society within the not-too-distant future.



Die Wirkung der angewandten Forschung geht weit über den direkten Nutzen für die Auftraggeber hinaus: Fraunhofer-Institute stärken die Leistungsfähigkeit der Unternehmen, verbessern die Akzeptanz moderner Technik in der Gesellschaft und sorgen für die Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Hochmotivierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf dem Stand der aktuellen Spitzenforschung stellen für uns als Wissenschaftsorganisation den wichtigsten Erfolgsfaktor dar. Fraunhofer bietet daher die Möglichkeit zum selbstständigen, gestaltenden und zugleich zielorientierten Arbeiten und somit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung, die zu anspruchsvollen Positionen in den Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft befähigt. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und des frühzeitigen Kontakts mit Auftraggebern 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

Applied research also has a knock-on effect that is felt way beyond the direct benefits experienced by the customer: our institutes boost industry's performance and efficiency, promote the acceptance of new technologies within society, and help train the future generation of scientists and engineers the economy so urgently requires.

Our highly motivated staff, working at the cutting edge of research, are the key factor in our success as a scientific organization. Fraunhofer offers researchers the opportunity for independent, creative and, at the same time, targeted work. We therefore provide our employees with the chance to develop the professional and personal skills that will enable them to take up positions of responsibility at Fraunhofer, at universities, in industry and within society. Students who work on projects at Fraunhofer Institutes have excellent career prospects in industry by virtue of the practical training they enjoy and the early experience they acquire of dealing with contract partners.

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



Messebeteiligungen I Fairs Participations

Consumer Electronics Show CES

8. – 11.1.2019, Las Vegas, USA

Student Recruitment Fairs

31.1. – 1.2.2019, Trondheim, Norwegen

SPIE Photonics West

5. – 7.2.2019, San Francisco, USA

DPG-Frühjahrstagung – Ausstellung

11. – 15.3.2019, Rostock, Germany

LASER World of PHOTONICS China

20. – 22.3.2019, Shanghai, China

Hannover Messe, „Research&Technology“

1. – 5.4.2019, Hannover, Germany

Control

7. – 10.5.2019, Stuttgart, Germany

Paris Air Show

17. – 23.6.2019, Le-Bourget Paris, Germany

LASER World of PHOTONICS

24. – 27.6.2019, München, Germany

DPG-Herbsttagung – Ausstellung

24. – 26.9.2019, Freiburg, Germany

SPIE.OPTIFAB

14. – 17.10.2019, New York, USA

Internationale Kunststoffmesse K2019

16. – 23.10.2019, Düsseldorf, Germany

COMPAMED

18. – 21.11.2019, Düsseldorf, Germany

SPACE TECH EXPO EUROPE

19. – 21.11.2019, Bremen, Germany

Aus- und Weiterbildung I Education and further training

Die umfangreichen Aktivitäten des Fraunhofer IOF auf dem Gebiet der Aus- und Weiterbildung erstrecken sich von der Ausbildung von Physiklaboranten, Industriemechanikern und Feinoptikern 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, industrial mechanics, and optics technicians 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.

LEFT *Physik-Nobelpreisträger Gérard Mourou vor dem Publikum der Photonics Days 2019. | Nobel laureate in physics Gérard Mourou in front of the audience of the Photonics Days 2019.*



Vorlesungen | Lectures

Dr.-Ing. Erik Beckert

Optikmontage

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Stefan Nolte

Atome und Moleküle II

Lasers in Medicine, Ultrafast optics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Gunther Notni

Systemtechnik und Systemtheorie der Bildverarbeitung

Koordinatenmesstechnik

Bildverarbeitung für die Qualitätssicherung

Aufnahme und Verarbeitung von 3D Daten

Technische Universität Ilmenau

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

Thin Film Optics, Structure of matter

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann / Dr. Fabian Steinlechner

Quantum Communication

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann / Dr. Markus Gräfe

Quantum Imaging and Sensing

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Andreas Tünnermann / Dr. Adriana Szeghalmi

Analytical Instrumentation

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Adriana Szeghalmi

Vakuum- und Dünnschichtphysik

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Herbert Gross

Design and correction of optical systems

Imaging and aberration theory, Lens design I, II

Physical Optics, Optical Engineering

Optical Metrology and Sensing

Friedrich-Schiller-Universität Jena

TOP *Teilnehmende der Photonics Days 2019 tüfteln an photonischen Lösungen beim Makeathon. |*

Participants of the Photonics Days 2019 are working on photonic solutions at the Makeathon.

Prof. Dr. Robert Brunner
Grundlagen Optik, Mikrooptik, Mikroskopie
Spektrale Sensorik, Geometrische Optik
Optische Instrumente, Optical Instrumentation
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Prof. Dr. Jens Limpert
Grundlagen der Laserphysik, Laser Physics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Thomas Pertsch
Quantum optics, Computational Physics
Computational photonics, Introduction to nanooptics
Fundamentals of modern optics,
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Uwe Detlef Zeitner
Micro- and Nano-Technology
Introduction to Optical Modeling
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Sebastian Händschke
Organisation, Organisationsstrukturen, Verhalten in
Organisationen, Führung und HRM
Organisationsstrukturen
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Sebastian Händschke
Einführung in die Betriebswirtschaftslehre
Bauhaus-Universität Weimar

Dr. Reinhold Pabst
Marketing in der Medizin
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Conferences – Workshops – Events

SPIE Photonics West
5. – 7.2.2019, San Francisco, USA

14. ThGOT Thementage Grenz- und Oberflächentechnik
12. – 14.3.2019, Zeulenroda, Germany

Forsche Schüler Tag
28.3.2019, Beutenberg Campus Jena, Germany

62nd SVC Annual Technical Conference
27.4. – 2.5.2019, Long Beach California, USA

EFDS-Workshop »Sputtern für die Präzisionsoptik«
9.5.2019, Fraunhofer IOF, Jena, Germany

OptecNet Jahrestagung
14. – 15.5.2019, Jena, Germany

OSA Optical Interference Coatings Conference
2. – 7.6.2019, New Mexico, USA

OptoNet Int. Summer School „Advanced Lens Design“
17. – 21.5.2019, Jena, Germany

1. Öffentlicher Workshop fo+ (Freeform Optics Plus),
FORUM: Laser and Optics
25.6.2019, Messe München, Messegelände, Germany

19th Int. Conference on Atomic Layer Deposition
21. – 24.7.2019, Bellevue, Washington, USA

Workshop „Sensing with Quantum Light“
15. – 18.9.2019, Bad Honnef, Germany

Joint IMEKO 2019 Int. Symposium for Photonics and
Education in Measurement Science
17. – 19.9.2019, Jena, Germany

PHOTONICS DAYS 2019
17. – 19.9.2019, Jena, Germany

3Dsensation - Mitgliederversammlung
24. – 25.9.2019, Jena, Germany

Lange Nacht der Wissenschaften
22.11.2019, Beutenberg Campus Jena, Germany

3. Öffentlicher Workshop: Tailored Optical Fibers
26.11.2019, Jena, Germany

Preise I Prizes

ERC Advanced Grant
Jens Limpert

LED professional Best Scientific Paper Award,
LED professional Symposium+EXPO 2019
Peter Schreiber



Hot Stuff Award 2019, Leistungszentrum Photonik

Paul Schenk

Posterpreis ThGOT 2019

Paul Schenk

SPIE Defense+Commercial Sensing, Rising Researcher 2019

Stefan Heist

Best Paper Award, SPIE.Photonics West 2019

Erik Beckert

Bachelorarbeiten | Bachelor Theses

Fiete Bauer

**Entwicklung und Evaluierung eines technologischen
Prozesses zur Herstellung von Hybridlinsen**
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Simon Bernet

Überschichtung von 2D-Materialien im Vakuumprozess
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Benedikt Bieberle

**Untersuchung ausgewählter Bildmerkmale und Ähnlich-
keitsmaße für den Einsatz in der Stereoskopie**
Technische Universität Ilmenau

Thomas Blankenburg

**Wellenlängenoptimierung und Charakterisierung eines
ns-gepulsten 100-µJ Erbium-dotierten Faserlasers**
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Sonja Bohn

**Schnelltestverfahren zum Ermitteln der Krümmungs-
radien an Cavity-Spiegeln**
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Florian Grimm

**Einsatz optischer und taktiler Messsysteme zur Ober-
flächenanalyse optischer Bauelemente**
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

TOP *Photonics Days 2019 – Michael Kaschke (ZEISS) spricht über die Zukunft der Photonik-Branche. |*

Photonics Days 2019 – Michael Kaschke (ZEISS) talks about the future of the photonics industry.

Axel Hartmann

**Sol-Gel-Beschichtungen zur Glättung des mittelfrequen-
ten Rauheitsspektrums und als Korrosionsschutz für
austenitischen nichtrostenden Stahl**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Jacob Hensel

**Computergestützte Messwertaufnahme und automati-
sierte akustische Auswertung von Prüfstandsläufen zur
Qualitätssicherung im Endfunktionstest der Dieselmoto-
renproduktion der MDC Power GmbH**

Technische Universität Ilmenau

Robin Horn

**Konstruktion eines automatisierten Prüfplatzes für den
Bereich Fertigung zur Funktions- und Qualitätskontrolle
telezentrischer Objektive**

Technische Universität Ilmenau

Ralf Hühn

**Characterization of the optical properties of mono-
layered MoS₂ in optical resonators**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Sebastian Illhardt

**Untersuchungen zu den Anforderungen der DIN EN ISO/
IEC 27001:2017-06 und zur Umsetzung am Beispiel der
SQB GmbH Ilmenau**

Technische Universität Ilmenau

Beatrice Korn

**Entwicklung des mechanischen Designs, Fertigungssteu-
erung und Inbetriebnahme eines bistabilen Lorentz-
kraftaktors im endoskopischen Bereich**

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Tom Lippoldt

Untersuchungen zur Laseremission von N₂+

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Jintao Liu

**Theoretische Untersuchungen zu Kalibrierverfahren und
zur Messunsicherheit an einem Messgerät für geometri-
sche Kenngrößen an Rohren**

Technische Universität Ilmenau

Sebastian Nölle

**Konstruktion und Aufbau eines justierfähigen Sensor-
positioniersystems**

Technische Universität Ilmenau

Markus Pöthe

**Gefügeoptimierung eines additiv erzeugten Aluminium-
Diamant-Verbundwerkstoffes als Substrat für Metall-
optiken**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Thomas Rölle

Simulation of partially coherent imaging

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Florian Scheinpflug

**Auswirkung von Plasmanachbehandlung und SiO₂-Über-
schichtung hybrider Nanostrukturen auf Benetzungsei-
genschaften, Klimastabilität und Abriebstabilität**

Ernst-Abbe-Hochschule

Nicolas Scheller

**Fertigungsprozessoptimierung von Ventilsitzen in der
Großserienproduktion von Saugrohreinspritzventilen**

Technische Universität Ilmenau

Rabea Sennlaub

**Automatische Zuordnung der Raumachsen in Manhattan-
Welten mit Methoden der Bildverarbeitung**

Technische Universität Ilmenau

Moritz Wilhelm Stettner

Charakterisierung von diffraktiven optischen Elementen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Lisa Vogt

**Sprühbeschichtung als flexibles Verfahren zur Herstel-
lung nanorauer Oberflächen am Beispiel von Glas und
Edelstahl 316L**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Michael Völz

**Technologieentwicklung zur Reduzierung mittelfrequen-
ter Oberflächenfehler mittels Politur**

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Silas Westhäuser

**Untersuchung des Ätzverhaltens einer reaktiven
Ionenstrahlätzanlage im Hinblick auf die Übertragung
laserlithografisch erzeugter Resiststrukturen**

Ernst-Abbe-Hochschule Jena



Karoline Wolkersdorfer

**Corporate Social Responsibility in der Bergbaubranche.
Eine Panelstudie zum Zusammenhang von Werten und
Strukturen**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Steven Walter Zander

**Einfluss der Prozessparameter beim Honen lichtbogen-
drahtgespritzter Schichten auf die Oberflächenqualität**

Technische Universität Ilmenau

Leo Maximilian Wilhelm

**Störlichtanalyse von mikrooptischen Multiaperturprojek-
toren**

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Lucas Zettlitzer

**Konstruktive Möglichkeiten zur Beeinflussung des Kan-
teneffektes beim Polieren ultrapräziser Metalloptiken**

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Diplomarbeiten | Diploma Theses

Johannes Frasch

**Analytische, numerische und experimentelle
Untersuchung SLM-gefertigter Leichtgewichts-
strukturen für den Einsatz in der Raumfahrt**

Technische Universität Dresden

Masterarbeiten | Master Theses

Michael Baranowski

**Beurteilung der Arbeitsgenauigkeit von
Industrierobotern für LMD-Applikationen**

Technische Universität Ilmenau

Joao Pedro Berti Ligabo

**Design and application of a miniaturized
multispectral camera**

Friedrich-Schiller-Universität Jena

TOP *Photonics Days 2019 – Kurze Pause, im Escape Room können auch kleinste Hinweise hilfreich sein. |*

Photonics Days 2019 – Short break, in the Escape Room even the smallest hints can be helpful.

Lena Bieberich

Verifizierung eines vorhandenen Messaufbaus mit anschließender Analyse und Bewertung der mechanischen Einflussfaktoren auf das Reinigungsergebnis eines Hartbodenreinigungsgerätes mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung

Technische Universität Ilmenau

Benedikt Binder

Untersuchung der Möglichkeiten und Wirtschaftlichkeit zur Steigerung der technischen Sauberkeit von Ansteuergeräten durch eine Verbesserung der serienbegleitenden Reinigung des inneren kritischen Bereichs

Technische Universität Ilmenau

Sascha Böhm

Erstellen einer Wertstromanalyse und Verbesserung des IST-Zustands in der Kunststoffspritzerei mit Hilfe von Six-Sigma Werkzeugen

Technische Universität Ilmenau

Sarah Breitfeld

Positive Organizational Scholarship: ein systematischer Literaturüberblick

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Kausihan Bremanandan

Modeling of Optical Media with Anisotropy and Applications for Waveplates

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Christin Claus

Freiwillige Arbeitgeberleistungen am Beispiel des Betrieblichen Gesundheitsmanagements: eine empirische Studie

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Amr Eldeibany

Analyse der gießtechnischen Parameter und der Einfluss auf ausgewählte Qualitätsmerkmale an einem Aluminium Druckguss Serienbauteil

Technische Universität Ilmenau

Shuo Feng

Konstruktion für H2L-Baukasten

Technische Universität Ilmenau

Wiebke Foorden

Untersuchungen zu Beleuchtungsstrategien für Bildverarbeitungssysteme zur qualitätssichernden Sichtprüfung

Technische Universität Ilmenau

Kristin Gerloff

Ein Freigeist im Brutkasten - Eigenschaften und Motive von Unternehmern in gründungsfördernden Programmen

Friedrich-Schiller-Universität

Tobias Gräf

Entwicklung eines einheitlichen Messdatenmanagements mittels Hard- und Software von National Instruments

Technische Universität Ilmenau

Sebastian Gründel

Pixelweise interferometrische MTF-Messung an ausgewählten Kamera-Sensoren

Technische Universität Ilmenau

Michael Hellinger

Konzipierung einer Notstrategie für die Montagestation RV4169 der Montagelinie M282 am Standort Kölleda zur Herstellung und Überprüfung des Kolben-Pleuel-Verbundes

Technische Universität Ilmenau

Annika Höft

Neue Kooperationsformen universitärer und außer-universitärer Forschungseinrichtungen am Beispiel der Max Planck School of Photonics

Technische Universität Berlin

Tobias Hustadt

Untersuchung der Formabweichung bei einem Strukturübertrag von einem Einzellinsen-Master auf Wafer-Level-Maßstab

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Andreas Hülfenhaus

Bewertung visueller Prüfmerkmale der 48-V-Batterie im Hinblick auf technische Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit sowie Validierung durch serienadaptierbares Baukastensystem

Technische Universität Ilmenau

Jiacen Jiang

X-ray optical systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Sophia Jobmann

Fehleridentifizierung im Selektiven Laserstrahlschmelzen (SLM) mit Hilfe der Auswertung von 2D-Bildinformationen durch CNNs

Technische Universität Ilmenau

Hendrik Jütte

Organisationen als soziale Akteure: Sprachäußerungen von Organisationen in sozialen Medien – selbständige und verantwortungsvolle Akteure?

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Atefeh Javadzadeh Kalahrodi

3D stiffness mapping of bovine cartilage by using the fast indentation FBG system

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Maria Kepper

Assembly and characterization of field-deployable quantum hardware

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Lisa Kette

Scheitern als Chance: Lernen aus und Transformation von Misserfolgen - Eine empirisch-induktive Analyse von Interviews mit UnternehmerInnen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dennis Kowollik

Entwicklung von Strategien zur Stützengenerierung im Metall-Laserschmelzprozess im Hinblick auf ein automatisiertes Entstützen von Metallbauteilen

Technische Universität Ilmenau

Miriam Regina Kuch

Organisationale Resilienz: ein „Narrative Review

Friedrich-Schiller-Universität Jena

DongHoon Lee

Building a Raman Spectra Analysis Program and Introduce Raman Spectra Analysis Tools

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Fubin Liu

Evaluation eines Weißlichtinterferometrie-Algorithmus für die parallele eingebettete Verarbeitung

Technische Universität Ilmenau

Anatolii Makhinia

Fully inkjet-printed Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs) for microfluidic lab-on-a-chip systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Alexandre de Matos Gomez Belsley

Photon-pair generation in lithium niobate waveguide systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Florian Müller

Untersuchungen zur Herstellung und Kopplung von Faserbündeln aus Seitenlichtfasern für leuchtende Textilien

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Henry Näder

Entwicklung einer Notstrategie für die Montagestation KOP80 in der Fertigungsline M260/M270 für Vierzylindermotoren für das Bestücken, Markieren und Gegenprüfen von Hauptlagerdeckeln auf Kurbelgehäusen

Technische Universität Ilmenau

Markus Omlor

Untersuchung und Neugestaltung der Wärmeabfuhr in einer wassergekühlten Leistungselektronik

Technische Universität Ilmenau

Nicole Opitz

Die Einflussfaktoren familieninterner Unternehmensnachfolge - ein systematischer Literaturüberblick

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Milind Patel

Development of Raman spectroscopic platform for dynamic cell scanning applications

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Pallabi Paul

Atomic Layer Deposition of Optical Coatings on Poly(methylmethacrylate) (PMMA)

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Yufei Peng

Wavefront Sensing Based on Coherent Diffractive Imaging

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Kaustuv Pokhriyal

Simulation and computational study of Bessel beam for optical trapping by means of optical fiber

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Roxana Preuß

Akademische High-Tech-Spin-Offs: Eine qualitativ-induktive Untersuchung von Inkubatorprogrammen

Friedrich-Schiller-Universität

Sai Priya

Preparation of in air assembly and alignment of opto-mechanical systems required for space applications

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Michael Rager

Prüfstands Aufbau zur Bestimmung der akustischen und schwingungstechnischen Haupteinflüsse von Elastomerlagern an Stabilisatoren

Technische Universität Ilmenau

David Rebhan

Radiometrische Erweiterung der EMVA1288-Messanordnung für Messungen in den Bereichen UV-A, VIS/NIR und NIR

Technische Universität Ilmenau

Stefanie Renatus

Untersuchung zur optischen Charakterisierung von Chromschichten für die Herstellung von Nanostrukturen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Marius Reubelt

Auslegung von Welle-Nabe Verbindungen für High-Performance Elektromotoren in automotiven Anwendungen

Technische Universität Ilmenau

Viktoria Schewior

Ausarbeitung eines Konzepts zur Planung, Implementierung und Stabilisierung von Logistikprojekten bei der BMW Group am Beispiel des Schiller Routenzugs

Technische Universität Ilmenau

Kassandra Schinz

Optimierung der Fehleraufnahme und -auswertung im Anlauf eines Automobilunternehmens

Technische Universität Ilmenau

Jonas Schöntag

Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Fügeverbindungen in automotiver Produktion unter Berücksichtigung qualitätstechnischer Kennzahlen

Technische Universität Ilmenau

David Schuhmacher

Unternehmensnachhaltigkeit: Eine empirisch-vergleichende Studie von unternehmerischer Sozialverantwortung (CSR) bei Outdoorsportartikelherstellern

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Jonas Schweinfurth

Untersuchung zur Reproduzierbarkeit eines neuen Verfahrens zur Herstellung poröser Schichten

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Udesha Luckshadi Senanayake

Fabrication and performance analysis of inkjet-printed Organic Photodiodes (OPDs)

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Marco Senfleben

Untersuchungen zu Anforderungen und zur Umsetzung der DIN ISO 45001: 2018-06, dargestellt am Beispiel Sandvik Tooling Supply Werke Renningen und Schmalkalden

Technische Universität Ilmenau

Katharina Seufferth

Analyse und Konzeptionierung der Reifegradplanung unter Berücksichtigung eines hybriden Projektmanagements für die Kaufteilqualität

Technische Universität Ilmenau

Jinhao Si

Programm unter VCWin/WebHMI zur Lösung von Messaufgaben mit einem Digitalen Profilprojektor

Technische Universität Ilmenau

Tusharkumar Sorathiya

Investigation of Multi-FBG-Arrays with Equal Wavelength for Sensing

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Malte Spiekermann

Entwicklung einer Methode zur Modenfeldanpassung in optischen Fasern durch kontrollierte Diffusion der Dotanden

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Christopher Spiess

Ultrashort Soliton Generation - Characterization and Modeling

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Liudmila Starodubtceva

Fabrication and investigation of a reactively sputtered black coating

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Christoph Stölze

Oberflächenprüfung mit Keyence-Bildverarbeitungskomponenten am Beispiel von Mehrschichtverbundrohren mit Aluminiumeinlage

Technische Universität Ilmenau

Marius Svensson

Entwicklung eines Konzeptes zur Automatisierung des Materialumschlags am Beispiel eines Fördergutherstellers

Technische Universität Ilmenau

Sebastian Töpfer

Aufbau und Optimierung eines mechanischen Musterprojektionsprinzips für die 3-dimensionale Messung basierend auf linearer Mustertranslation

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Isabell Wagner

Charakterisierung eines Hochgeschwindigkeits-3D-Sensors mit aktiver GOBO-Projektion

Technische Universität Ilmenau

Markus Walther

Methoden zur aktiven optischen Justage pixelierter nanooptischer Filterelemente auf CMOS-Sensoren

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Corinna Walz

Entwicklung eines Qualifizierungsbaujobs für den Produktionsanlauf eines additiv gefertigten Bauteils aus der Automobilindustrie

Technische Universität Ilmenau

Chunyu Wang

Experimentelle Untersuchung zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Herzrhythmus-Schätzung durch Analyse von Gesichtsbewegungen

Technische Universität Ilmenau

Jonathon White

Laser Pulse Optimization for Extreme Ultraviolet Attosecond Pulse Generation

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Richard Weddige

Untersuchungen zu Anforderungen und zur Umsetzung der DIN EN ISO 50001:2018, dargestellt am Beispiel des Sandvik Tooling Supply Werkes Schmalkalden und der Revision der DIN EN ISO 19011:2018

Technische Universität Ilmenau

Fransiska Widiyanti

Phase retrieval for laser beam characterization

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Marius Wyltschew

Streulichtsensorik zur flexiblen Charakterisierung von strukturierten und funktionalen Oberflächen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Jinggang Yan

Untersuchung zur Nutzbarkeit des Convolutional-Neural-Networks für die echtzeitfähige Objektdetektion auf Basis von Farb- und 3D-Bilddaten

Technische Universität Ilmenau

Soner Yakar

Wertstromanalyse in der Vorserienfertigung bei der Valeo-Siemens eAutomotive GmbH

Technische Universität Ilmenau

Kaida Zhang

Untersuchungen zum konstruktiven Entwurf eines modularen und justierbaren Systems für Kameras an einem Sichtprüfungsplatz

Technische Universität Ilmenau

Wenjia Zhou

Investigation of Optical Coupling Phenomenon in Silicon Metasurfaces

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dissertationen | Dissertations

Dr.-Ing. Klaus Bergner

In-Volumen-Bearbeitung von Glas mit raum-zeitlich geformten ultrakurzen Laserpulsen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Christoph Bösel

Freeform illumination design in optical systems with partial differential equations

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. André Dathe

Large Scale Tunneling Junctions for Electrically Driven Plasmonics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Nadja Felde

Design, manufacturing, and characterization of robust multifunctional surfaces

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. med. Katharina Frey

Modellierung und Simulation unterschiedlicher Netzhautgruben zur Erforschung ihrer optischen Eigenschaften
Universität Leipzig

Dr. rer. nat. Christian Gaida

Power-scaling of ultrafast Thulium-doped fiber laser systems

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Martin Heusinger

Untersuchungen zu deterministischem und stochastischem Streulicht in hocheffizienten binären Beugungsgittern

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Falk Kemper

Tintenstrahldruck wellenlängenselektiver optischer Detektoren zur Integration in mikrofluidische Lab-on-a-Chip Systeme

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Nina Leonhard

Adaptive Optics for Free-Space Communication with Entangled Orbital Angular Momentum Photons

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Chang Liu

Design strategy for imaging systems containing freeform surfaces

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Gregor Matz

Design, simulation, evaluation and application of miniaturized objectives for in-vivo endomicroscopy

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Daniel Richter

Ultrashort pulse written volume-Bragg-gratings

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Mateusz Oleszko

Analysis of freeform optical systems based on the decomposition of the total wave aberration into Zernike surface contributions

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Carolin Rothhardt

Plasma-aktiviertes Fügen von optischen Komponenten für Hochleistungslaser

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Getnet Kassa Tadesse

Nanoscale Coherent Diffractive Imaging using High-harmonic XUV-Sources

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Jannik Trapp

Holographic and Hybrid Spectacle Lenses

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Tina Weichelt

Neuartige Methoden diffraktiver Mask Aligner Lithografie zur flexiblen Erzeugung mikrooptischer Strukturen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Stefan Werrlich

Gestaltungskonzept für Augmented Reality unterstütztes Training an manuellen Montagearbeitsplätzen

Technische Universität Ilmenau

Dr.-Ing. Yueqian Zhang

Systematic Design of Microscope Objectives

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Schutzrechte I Intellectual Property

Patentoffenlegungen I Patent First Publications

Beckert, E.; Pabst, O.; Dannberg, P.

Verfahren zum Herstellen eines optischen Mikrolinsenarrays

US 2019/0369296 A1; CN 110520284 A

Brahm, A.; Gebhard, I.; Reinlein, C.

Projektionsvorrichtung und Projektionsverfahren

DE 10 2018 208 417 A1; CH 715 045 A2

Bräuer-Burchardt, C.; Wong, E.; Heist, S.; Kowarschik, R.
Verfahren und Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen dreidimensionaler Oberflächenkonturen
DE 10 2017 220 720 A1

Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.
Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung eines Objektbereichs
EP 3422694 A1

Chen, L.; Schreiber, P.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Fischer, S.
Optischer Strahlformer
DE 10 2017 217 345 A1

Duparre, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
TW 201910869 A

Duparre, J.; Wippermann, F.
Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
IN 201937041219 A

Duparre, J.; Wippermann, F.
Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
IN 201937035160 A

Finck, von A.; Schröder, S.; Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Duparré, A.; Notni, G.
Optische Beschichtung und Verfahren zur Herstellung einer optischen Beschichtung mit verminderter Lichtstreuung
EP 3420386 A1; US 2019/0086580 A1

Kaiser, N.; Schulz, U.; Rickelt, F.; Munzert, P.
Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht auf einer Silikonoberfläche und optisches Element
US 2019/0179056 A1

Kinast, J.; Risse, S.
Spiegelträger für einen optischen Spiegel aus einem Verbundwerkstoff und Verfahren zu dessen Herstellung
WO 2019/215243 A1

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Müller, M.; Kienel, M.; Klenke, A.
Optische Anordnung
US 2019/0013637 A1

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Stihler, C.; Jauregui Misas, C.
Vermeidung von Modeninstabilität in einer optischen Verstärkerfaser
DE 10 2017 121 368 A1

Lukowicz, H. v.; Hartung, J.; Risse, S.; Beier, M.
Halterung zur Fixierung und Referenzierung von mit einer Messvorrichtung an mehreren, nicht in einer gemeinsamen Ebene angeordneten Oberflächen in einer Einspannung zu vermessenden Bauteilen
DE 10 2018 209 017 A1

Naujok, P.; Yulin, S.; Kaiser, N.
Multilayer-Spiegel zur Reflexion von EUV-Strahlung und Verfahren zu dessen Herstellung
EP 3 523 684 A1; JP 2019-533197 A

Nolte, S.; Bergner, K.; Gebhardt, M.
Erzeugung von Mehrfach-Laserpulsen durch Überlagerung von Laserstrahlung
DE 10 2017 121 147 A1

Nolte, S.; Richter, D.; Krämer, R.; Goebel, T.A.; Siems, M. P.
Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung mittels interferierender Laserstrahlung
DE 10 2018 105 254 A1; WO 2019/170792 A1

Pfeiffer, K.; Schulz, U.; Szeghalmi, A.
Reflexionsminderndes Schichtsystem und Verfahren zu dessen Herstellung
DE 10 2018 105 859 A1

Popp, J.; Gottschall, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Meyer, T.
Erzeugung von synchronisierten Laserpulsen bei variablen Wellenlängen
WO 2019/012020 A1

Schreiber, T.; Stutzki, F.
Optische Anordnung und Verfahren zur Erzeugung eines kombinierten Strahls mehrerer Laserlichtquellen
DE 10 2017 115 786 A1; US 2019/0018253 A1; GB 2566145 A

Schröder, S.; Felde, N.; Coriand, L.; Trost, M.; Notni, G.
Kontaminationsabweisende Beschichtung für optische Komponenten
DE 10 2018 110 251 A1; US 2019/0333655 A1

Schröder, S.; Felde, N.; Coriand, L.; Gärtner, A.; Eberhardt, J.:
Notni, G.

**Verfahren zur Herstellung und Verwendung eines
Substrats mit einer funktionalisierten Oberfläche**
DE 10 2018 106 707 A1; WO 2019/180031 A1

Schulz, U.; Munzert P.; Wolleb, S.; Rickelt, F.; Knopf, H.
**Verfahren zur Herstellung eines reflexionsmindernden
Schichtsystems**
EP 3 559 710 A1; CN 110312949 A

Wippermann, F.; Reimann, A.; Bräuer, A.
**Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und
Verfahren zur Herstellung derselben**
ES 2714291 A1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit einer reflektie-
rende Facetten aufweisenden Strahlumlenkvorrichtung**
US 2019/0373154 A1; TW 201921026 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem
und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiapertur-
abbildungsvorrichtung**
US 2019/0222768 A1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem
und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs**
US 2019/0104242 A1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem
und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs**
US 2019/0011809 A1

Wippermann, F.; Duparre, J.; Brückner, A. Oberdörster, A.
Erzeugung von Panoramabildern
DE 10 2018 202 707 A1; WO 2019/162411 A3

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
**3D-Multiaperturabbildungsvorrichtung, Multiapertur-
abbildungsvorrichtung, Verfahren zum Bereitstellen
eines Ausgangssignals einer 3D-Multiaperturabbil-
dungsvorrichtung und Verfahren zum Erfassen eines
Gesamtgesichtsfeldes**
CN 109479126 A; US 2019/0068950 A1

Wippermann, F.; Duparré, J.

**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit geringer
Falschlichtempfindlichkeit, Abbildungssystem und
Verfahren zum Bereitstellen einer Multiapertur-
abbildungsvorrichtung**
DE 10 2017 211 586 A1; TW 201917443 A;
WO 2019/008063 A1

Wippermann, F.; Hagen, N.; Reimann, A.
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit geringer Bau-
höhe und umschaltbarer Blickrichtung, Abbildungssys-
tem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiapertur-
abbildungsvorrichtung**
DE 10 2017 216 172 A1; TW 2019 23 413 A;
WO 2019/052952 A2

Patenterteilungen I Patent Assignations

Berlich, R.; Reinlein, C.
**Vorrichtung zur Messung einer Aberration, Abbildungs-
systeme und Verfahren zur Messung einer Aberration**
US 10,324,306 B2

Böhme, S.; Harnisch, G.; Schreiber, T.
Verfahren zur Beschichtung von optischen Wellenleitern
EP 2 834 593 B1

Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.
**Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung eines Objekt-
bereichs**
KR 10-1953729 B1; JP 6580666 B2

Chen, L.; Schreiber, P.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Fischer, S.
Optischer Strahlformer
DE 10 217 217 345 B4

Danz, N.; Wächter, C.
**Anordnung zur orts- und wellenlängenaufgelösten
Erfassung von Lichtstrahlung, die von mindestens einer
OLED oder LED emittiert wird**
US 10,281,321 B2

Gräfe, M.; Gilaberte-Basset, M.; Eilenberger, F.; Setzpfand, F.
**Optische Anordnung für fluoreszenzmikroskopische
Anwendungen**
DE 10 2018 215 833 B1

Gräfe, M.; Gilaberte-Basset, M.; Eilenberger, F.; Setzpfand, F.
Optische Anordnung für fluoreszenzmikroskopische Anwendungen
 DE 10 2018 215 831 B1

Heist, S.; Kühmstedt, P.; Notni, G.;
Verfahren und Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen von Oberflächenkonturen
 US 10,302,421 B2

Kaiser, N.; Schulz, U.; Rickelt, F.; Munzert, P.
Verfahren zur Herstellung einer Entspiegelungsschicht auf einer Silikonoberfläche und optisches Element
 DE 10 2014 105 939 B4; US 10,247,856 B2

Kley, B.; Szeghalmi, A.; Schulz, U.; Ghazaryan, L.
Verfahren zur Herstellung einer porösen Gradientenschicht
 DE 10 2016 100 914 B4

Lange, N.; Wippermann, F.
Elektrostatischer Aktor und Verfahren zum Herstellen desselben
 US 10,256,748 B2

Präfke, C.; Schulz, U.; Kaiser, N.
UV-absorbierendes Schichtsystem und Verfahren zu dessen Herstellung
 DE 10 2010 006 134 B4

Risse, S.; Stöckl, W.; Gebhardt, A.; Peschel, T.
Substrat aus einer Aluminium-Silizium-Legierung oder kristallinen Silizium, Metallspiegel, Verfahren zu dessen Herstellung sowie dessen Verwendung
 EP 2470683 B1

Scheiding, S.; Damm, C.; Gebhardt, A.; Risse, S.; Scheiding, M.
Method for manufacturing a mirror comprising at least one cavity and optical mirror
 CA 2,843,478 C

Schulz, U.; Rickelt, F.; Bruynooghe, S.; Tonova, D.; Koch, T.
Verfahren zur Herstellung eines reflexionsmindernden Schichtsystems und reflexionsminderndes Schichtsystem
 DE 10 2014 100 769 B4

Schulz, U.; Szeghalmi, A.; Ghazaryan, L.; Kley, E.-B.
Verfahren zur Herstellung einer niedrigbrechenden Schicht und Schichtsysteme zur Entspiegelung
 DE 10 2016 100 907 B4

Schürmann, M.; Kaiser, N.; Schwinde, S.
Optisches Element mit einer reflektierenden Beschichtung
 US 10,429,549 B2

Wippermann, F.; Lange, N.; Reimann, A.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben
 KR 10-1991879 B1

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben
 US 10,429,607 B2; EP 300 496 1 B1

Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben
 US 14,797,011 B2

Wippermann, F.; Reimann, A.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben
 US 10,451,832 B2; JP 6571744 B2

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.
Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen einer Struktur, Abformwerkzeug
 DE 10 2009 055 080 B4

Wippermann, F.; Brückner, A.; Lange, N.; Bräuer, A.
Verfahren zur Herstellung einer falschlichtunterdrückenden Struktur und Vorrichtung mit derselben
 DE 10 2013 209 246 B4

Wippermann, F.; Reimann, A.; Dunkel, J.; Bräuer, A.
Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung einer Struktur aus aushärtbarem Material durch Abformung
 DE 10 2013 207 243 B4

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem
 US 10,334,172 B2

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
 KR 102047014 B1; US 10,270,974 B2; EP 3 225 021 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit Optiksubstrat
TW I652519 B

Wippermann, F.; Lange, N.; Pabst, O.
Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Verfahren zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes
EP 3 366 032 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs
KR 10 2018 702 295 2 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs
TW I651544 B; EP 3 371 650 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Datenformat für Multiaperturabbildungssysteme mit kanalweiser Aufteilung des Gesichtsfeldes
TW I665469 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Vorrichtung mit einer Multikanalabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Herstellen derselben
KR 10-2018-7007482 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
3D-Multiaperturabbildungsvorrichtung
TW I668989 B

Zeitner, U.; Flügel-Paul, T.; Michaelis, D.; Harzendorf, T.
Optische Anordnung zur spektralen Zerlegung von Licht
EP 3 267 230 B1

Zeitner, U.; Stürzebecher, L.; Harzendorf, T.; Völkel, R.; Vogler, U.
Verfahren und Vorrichtung zur Abstandsmessung mit einer diffraktiven Struktur
EP 2 834 593 B1

Wissenschaftliche Publikationen | Scientific Publications

Buchkapitel | Book chapters

Duparré, A.; S. Schröder
Light Scattering Techniques for the Inspection of Micro-components and Structures
in Optical Inspection of Microsystems, Second Edition, edited by W. Osten (2019), ISBN 978-1-498-77947-0

Jauregui C.; J. Limpert
Optical fibers for high-power operation
in Advances in High-Power Fiber and Diode Laser Engineering, edited by I. Divliansky (2019), ISBN 978-1-785-61751-5

Zou, C.; I. Staude, D. Neshev
Tunable Dielectric Metasurfaces & Metadevices
in Dielectric Metamaterials - Fundamentals, Designs, and Applications, edited by I. Brener, J. Valentine, C. Holloway, I. Staude, S. Liu (2019), ISBN 978-0-081-02403-4

Zeitschriften | Journals

Abbasirad, N.; J. Berzins, K. Kollin, S. Saravi, N. Janunts, F. Setzpfandt, T. Pertsch
A fully automated dual-tip scanning near-field optical microscope for localized optical excitation and detection in the visible and near-infrared
Review of Scientific Instruments 90 (5) (2019) p. 053705, ISSN 0034-6748

Alberucci, A.; C.P. Jisha, U. Peschel, S. Nolte
Effective breaking of the action-reaction principle using spatial solitons
Physical Review A 100 (1) (2019) p. 011802, ISSN 1050-2947

Bagusat, V.; M. Kraus, E. Förster, D. Thomae, T. Hönle, R. Brüning, H. Hillmer, R. Brunner
Concept and optical design of a compact cross-grating spectrometer
Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 36 (3) (2019) p. 345-352, ISSN 1084-7529

Baladron-Zorita, O.; Z. Wang, C. Hellmann, F. Wyrowski
Isolating the Gouy phase shift in a full physical-optics solution to the propagation problem
Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 36 (9) (2019) p. 1551-1558, ISSN 1084-7529

- Barysheva, M.; S.A. Garakhin, S.Yu.Zuev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo, S. Yulin
Comparison of approaches in the manufacture of broadband mirrors for the EUV range: Aperiodic and stack structures
Quantum Electronics 49 (4) (2019) p. 380-385, ISSN 1063-7818
- Basset, M.; F. Setzpfandt, F. Steinlechner, E. Beckert, T. Pertsch, M. Gräfe
Perspectives for Applications of Quantum Imaging
Laser & Photonics Reviews 13 (10) (2019) p. 1900097, ISSN 1863-8880
- Berzins, J.; S. Fasold, T. Pertsch, S.M.B. Bäumer, F. Setzpfandt
Submicrometer Nanostructure-Based RGB Filters for CMOS Image Sensors
ACS Photonics 6 (4) (2019) p. 1018, ISSN 2330-4022
- Bilal, M.; A.V. Volotka, R. Beerwerth, J. Rothhardt, V. Hilbert, S. Fritzsche
High-precision calculations of the $1s(2)2s2p\ P-1(1) \rightarrow 1s(2)2s(2)\ S-1(0)$ spin-allowed E1 transition in C III
Physical Review A 99 (6) (2019) p. 062511, ISSN 1050-2947
- Bösel, C.; H. Gross
Compact freeform illumination system design for pattern generation with extended light sources
Applied Optics 58 (10) (2019) p. 2713-2724, ISSN 1559-128X
- Brady, A.; C. Rossler, N. Leonhard, M. Gier, P. Bottner, R. Eberhardt, A. Tünnermann, C. Reinlein
Validation of pre-compensation under point-ahead-angle in a 1 km free-space propagation experiment
Optics Express 27 (13) (2019) p. 17840-17850, ISSN 1094-4087
- Bucher, T.; A. Vaskin, R. Mupparapu, F.J.F. Löchner, A. George, K.E. Chong, S. Fasold, C. Neumann, D.-Y. Choi, F. Eilenberger, F. Setzpfandt, Y.S. Kivshar, T. Pertsch, A. Turchanin, I. Staude
Tailoring Photoluminescence from MoS₂ Monolayers by Mie-Resonant Metasurfaces
ACS Photonics 6 (4) (2019) p. 1002-1009, ISSN 2330-4022
- Butler, T.; D. Gerz, C. Hofer, J. Xu, C. Gaida, T. Heuermann, M. Gebhardt, L. Vamos, W. Schweinberger, J.A. Gessner, T. Siefke, M. Heusinger, U. Zeitner, A. Apolonski, N. Karpowicz, J. Limpert, F. Krausz, I. Pupe
Watt-scale 50-MHz source of single-cycle waveform-stable pulses in the molecular fingerprint region
Optics Letters 44 (7) (2019) p. 1730-1733, ISSN 0146-9592
- Cai, D.; H. Gross
Obscuration elimination in three-dimensional non-symmetrical optical systems
Journal of Physics: Photonics 1 (4) (2019) p. 044002
- Carletti, L.; C. Li, J. Sautter, I. Staude, C. De Angelis, T. Li, D. N. Neshev
Second harmonic generation in monolithic lithium niobate metasurfaces
Optics Express 27 (23) (2019) p. 33391-33398, ISSN 1094-4087
- Chen, Y.; M. Fink, F. Steinlechner, J.P. Torres, R. Ursin
Hong-Ou-Mandel interferometry on a biphoton beat note
Npj Quantum Information 5 (2019) p. 43, ISSN 2056-6387
- Chung, H.; C.-H. Lee, K.-H. Huang, S.-L. Yang, K. Wang, A. S. Solntsev, A. A. Sukhorukhov, F. Setzpfandt, Y.-H. Chen
Broadband on-chip polarization mode splitters in lithium niobate integrated adiabatic couplers
Optics Express 27(2) (2019) p. 1632-1645, ISSN 1094-4087
- Claus, I.; K. Frey, T. Hönle, M. Francke, R. Brunner, R. Brünig, A. Reichenbach
Comprehensive optical design model of the goldfish eye and quantitative simulation of the consequences on the accommodation mechanism
Vision Research 154 (2019) p. 115-121, ISSN 0042-6989
- Danson, C.; C. Haefner, J. Bromage, T. Butcher, J.-C.-F. Chanteloup, E. A. Chowdhury, A. Galvanauskas, L. A. Gizzi, J. Hein, D. I. Hillier, N. W. Hopps, Y. Kato, E. A. Khazanov, R. Kodama, G. Korn, R. Li, Y.
Petawatt and exawatt class lasers worldwide
High Power Laser Science and Engineering 7 (2019) p. e54, ISSN 2095-4719
- Danz, N.; B. Hofer, E. Forster, T. Flügel-Paul, T. Harzendorf, P. Dannberg, R. Leitel, S. Kleinle, R. Brunner
Miniature integrated micro-spectrometer array for snapshot multispectral sensing
Optics Express 27 (4) (2019) p. 5719-5728, ISSN 1094-4087
- Dietrich, K.; M. Zilk, M. Steglich, T. Siefke, U. Hübner, T. Pertsch, C. Rockstuhl, A. Tünnermann, E. B. Kley
Merging top-down and bottom-up approaches to fabricate artificial photonic nanomaterials with a deterministic electric and magnetic response
Advanced Functional Materials 30 (2019) p. 1905722, ISSN 1616-301X

Dietrich, P.; S. Heist, M. Landmann, P. Kühmstedt, G. Notni
BICOS-An Algorithm for Fast Real-Time Correspondence Search for Statistical Pattern Projection-Based Active Stereo Sensors
Applied Sciences-basel 9 (16) (2019) p. 3330, ISSN 0003-6951

Ecker, S.; F. Bouchard, L. Bulla, F. Brandt, O. Kohout, F. Steinlechner, R. Fickler, M. Malik, Y. Guryanova, R. Ursin, M. Huber
Overcoming Noise in Entanglement Distribution
PHYSICAL REVIEW X 9 (4) (2019) p. 041042, ISSN 2160-3308

Elsmann, T.; M. Becker, O. Olusoji, S. Unger, K. Wondraczek, C. Aichele, F. Lindner, A. Schwuchow, J. Nold, M. Rothhardt
Two-step-model of photosensitivity in cerium-doped fibers
Optical Materials Express 9 (4) (2019) p. 1654-1666, ISSN 2159-3930

Elu, U.; T. Steinle, D. Sanchez, L. Maidment, K. Zawilski, R. Schunemann, U.D. Zeitner, C. Simon-Boisson, J. Biegert
Table-top high-energy 7 μm OPCPA and 260 mJ Ho:YLF pump laser
Optics Letters 44 (13) (2019) p. 3194-3197, ISSN 0146-9592

Fink, M.; F. Steinlechner, J. Handsteiner, J.P. Dowling, T. Scheidl, R. Ursin
Entanglement-enhanced optical gyroscope
NEW JOURNAL OF PHYSICS 21 (2019) p. 053010, ISSN 1367-2630

Geib, N.; M. Zilk, T. Pertsch, F. Eilenberger
Common pulse retrieval algorithm: a fast and universal method to retrieve ultrashort pulses
Optica 6 (4) (2019) p. 495-505, ISSN 2334-2536

George, A.; C. Neumann, D. Kaiser, R. Mupparapu, T. Lehnert, U. Hübner, Z. Tang, A. Winter, U. Kaiser, I. Staude
Controlled growth of transition metal dichalcogenide monolayers using Knudsen-type effusion cells for the precursors
Journal of Physics: Materials 2 (1) (2019) p. 016001

Gerz, D.; W. Schweinberger, T.P. Butler, T. Siefke, M. Heusinger, T. Amotchkina, V. Pervak, U. Zeitner, I. Pupeza
Mid-infrared long-pass filter for high-power applications based on grating diffraction
Optics Letters 44 (12) (2019) p. 3014-3017, ISSN 0146-9592

Ghazaryan, L.; Y. Sekman, S. Schröder, C. Muhlig, I. Stevanovic, R. Botha, M. Aghaee, M. Creatore, A. Tünnermann, A. Szeghalmi
On the Properties of Nanoporous SiO₂ Films for Single Layer Antireflection Coating
Advanced Engineering Materials 21 (6) (2019) p. 1801229, ISSN 1438-1656

Gierschke, P.; C. Jauregui, T. Gottschall, J. Limpert
Relative amplitude noise transfer function of an Yb³⁺-doped fiber amplifier chain
Optics Express 27 (12) (2019) p. 17041-17050, ISSN 1094-4087

Goldenstein, J.; P. Poschmann, S. G.M. Händschke, P. Walgenbach
Global and local orientation in organisational actorhood: A comparative study of large corporations from Germany, the United Kingdom, and the United States
European Journal of Cultural and Political Sociology 6 (2) (2019) p. 201-236, ISSN 2325-4823

Gottwald, A.; K. Wiese, T. Siefke, M. Richter
Validation of thin film TiO₂ optical constants by reflectometry and ellipsometry in the VUV spectral range
Measurement Science and Technology 30 (4) (2019) p. 045201, ISSN 0957-0233

Harhausen, J.; R. Foest, O. Stenzel, S. Wilbrandt, C. Franke, R.P. Brinkmann
Concepts for in situ characterization and control of plasma ion assisted deposition processes
Thin Solid Films 673 (2019) p. 94-103, ISSN 0040-6090

Heck, M.; G. Schwartz, R.G. Krämer, D. Richter, T.A. Goebel, C. Matzdorf, A. Tünnermann, S. Nolte
Control of higher-order cladding mode excitation with tailored femtosecond-written long period fiber gratings
Optics Express 27 (4) (2019) p. 4292-4303, ISSN 1094-4087

Heck, M.; J.C. Gauthier, A. Tünnermann, R. Vallee, S. Nolte, M. Bernier
Long period fiber gratings for the mitigation of parasitic laser effects in mid-infrared fiber amplifiers
Optics Express 27 (15) (2019) p. 21347-21357, ISSN 1094-4087

Heck, M.; R.G. Krämer, T. Ullsperger, T.A. Goebel, D. Richter, A. Tünnermann, S. Nolte
Efficient long period fiber gratings inscribed with femtosecond pulses and an amplitude mask
Optics Letters 44 (16) (2019) p. 3980-3983, ISSN 0146-9592

Herffurth, T.; M. Trost, M. Beier, R. Steinkopf, N. Heidler, T. Pertermann, S. Schröder
Assessing surface imperfections of freeforms using a robotic light scattering sensor
Optical Engineering 58 (9) (2019) p. 092609, ISSN 0091-3286

- Hilpert, E.; J. Hartung, H. von Lukowicz, T. Herffurth, N. Heidler
Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy for space applications
Optical Engineering 58 (9) (2019) p. 092613, ISSN 0091-3286
- Jin, C.; M. Afsharnia, R. Berlich, S. Fasold, C. Zou, D. Arslan, I. Staude, T. Pertsch, F. Setzpfandt
Dielectric metasurfaces for distance measurements and three-dimensional imaging
Advanced Photonics 1(3) (2019) p. 036001, ISSN 2577-5421
- Jisha, C.; A. Alberucci, J. Beeckman, S. Nolte
Self-Trapping of Light Using the Pancharatnam-Berry Phase
Physical Review X 9 (2) (2019) p. 021051, ISSN 2160-3308
- Jisha, C.; A. Alberucci, J. Beeckman, S. Nolte
Non-linear localization via Pancharatnam-Berry phase
Optics & Photonics News Dec (2019) p. 47
- Jisha, C.; J. Beeckman, F. Van Acker, K. Neyts, S. Nolte, A. Alberucci
Generation of multiple solitons using competing nonlocal non-linearities
Optics Letters 44 (5) (2019) p. 1162-1165, ISSN 0146-9592
- Jisha, C.; S. Nolte, A. Alberucci
Polarization-insensitive wavefront shaping using the Pancharatnam-Berry phase
Optics Letters 44 (22) (2019) p. 5517-5520, ISSN 0146-9592
- Kämmer, H.; G. Matthäus, K.A. Lammers, C. Vetter, M. Chambonneau, S. Nolte
Origin of Waveguiding in Ultrashort Pulse Structured Silicon
Laser & Photonics Reviews 13 (2) (2019) p. 1800268, ISSN 1863-8880
- Knopf, H.; N. Lundt, T. Bucher, S. Hofling, S. Tongay, T. Taniguchi, K. Watanabe, I. Staude, U. Schulz, C. Schneider, F. Eilenberger
Integration of atomically thin layers of transition metal dichalcogenides into high-Q, monolithic Bragg-cavities: an experimental platform for the enhancement of the optical interaction in 2D-materials
Optical Materials Express 9 (2) (2019) p. 598-610, ISSN 2159-3930
- Krämer, R.; C. Matzdorf, A. Liem, V. Bock, W. Middents, T.A. Goebel, M. Heck, D. Richter, T. Schreiber, A. Tünnermann, S. Nolte
Femtosecond written fiber Bragg gratings in ytterbium-doped fibers for fiber lasers in the kilowatt regime
Optics Letters 44 (4) (2019) p. 723-726, ISSN 0146-9592
- Kühl, S.; M. Mozaffari, C. Paetz, S. Schröder, M. Trost, G. Notni
Streulichtsimulation für Beleuchtungsoptiken
Photonik 4 (2019) p. 65-69
- Lammers, K.; M. Ehrhardt, T. Malendevych, X.Y. Xu, C. Vetter, A. Alberucci, A. Szameit, S. Nolte
Embedded nanograting-based waveplates for polarization control in integrated photonic circuits
Optical Materials Express 9 (6) (2019) p. 2560-2572, ISSN 2159-3930
- Landmann, M.; S. Heist, P. Dietrich, P. Lutzke, I. Gebhart, J. Templin, P. Kühmstedt, A. Tünnermann, G. Notni
High-speed 3D thermography
Optics and Lasers in Engineering 121 (2019) p. 448-455, ISSN 0143-8166
- Löchner, F.; R. Mupparapu, M. Steinert, A. George, Z. Tang, A. Turchanin, T. Pertsch, I. Staude, F. Setzpfandt
Controlling second-harmonic diffraction by nanopatterning MoS₂ monolayers
Optics Express 27 (24) (2019) p. 376062, ISSN 1094-4087
- Lu, X.; O. Rodenko, Y.Q. Zhang, H. Gross
Efficient simulation of autofluorescence effects in microscope lenses
Applied Optics 58 (13) (2019) p. 3589-3596, ISSN 1559-128X
- Lu, X.; Y.Q. Zhang, H. Gross
General analysis and optimization strategy to suppress autofluorescence in microscopic lenses
Applied Optics 58 (27) (2019) p. 7404-7415, ISSN 1559-128X
- Lundt, N.; M. Klaas, E. Sedov, M. Waldherr, H. Knopf, M. Blei, S. Tongay, S. Klemmt, T. Taniguchi, K. Watanabe, U. Schulz, A. Kavokin, S. Höfling, F. Eilenberger, C. Schneider
Magnetic-field-induced splitting and polarization of monolayer-based valley exciton polaritons
Physical Review B 100 (2019) p. 121303, ISSN 1098-0121
- Maes, F.; C. Stihler, L.P. Pleau, V. Fortin, J. Limpert, M. Bernier, R. Vallee
3.42 μ m lasing in heavily-erbium-doped fluoride fibers
Optics Express 27 (3) (2019) p. 2170-2183, ISSN 1094-4087
- Merx, S.; J. Stock, H. Gross
Fast computation and characterization of perturbed Bessel-Gauss beams
Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 36 (11) (2019) p. 1892-1897, ISSN 1084-7529

Meyer, T.; R. Ackermann, R. Kammel, M. Schmitt, S. Nolte, A. Tünnermann, J. Popp
CARS-imaging guidance for fs-laser ablation precision surgery
 Analyst 144 (24) (2019) p. 7310-7317, ISSN 0003-2654

Muniz, A.; A. Alberucci, C. P. Jisha, M. Monika, S. Nolte, R. Morandotti, U. Peschel
Kapitza light guiding in photonic mesh lattice
 Optics Letters 44 (24) (2019) p. 6013-6019, ISSN 0146-9592

Nagy, T.; S. Hädrich, P. Simon, A. Blumenstein, N. Walther, R. Klas, J. Buldt, H. Stark, S. Breitskopf, P. Jojart, I. Seres, Z. Varallyay, T. Eidam, J. Limpert
Generation of three-cycle multi-millijoule laser pulses at 318 W average power
 Optica 6 (11) (2019) p. 1423-1424, ISSN 2334-2536

Occhicone, A.; A. Sinibaldi, F. Sonntag, P. Munzert, N. Danz, F. Michelotti
Study of fluid dynamics at the boundary wall of a micro-channel by Bloch surface waves
 Optics Letters 44 (8) (2019) p. 1932-1935, ISSN 0146-9592

Occhicone, A.; G. Sinibaldi, N. Danz, C.M. Casciola, F. Michelotti
Cavitation bubble wall pressure measurement by an electro-magnetic surface wave enhanced pump-probe configuration
 Applied Physics Letters 114 (13) (2019) p. 134101, ISSN 0003-6951

Palma-Vega, G.; T. Walbaum, M. Heinzig, S. Kuhn, C. Hupel, S. Hein, G. Feldkamp, B. Sattler, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann
Ring-up-doped fiber for the generation of more than 600 W single-mode narrow-band output at 1018 nm
 Optics Letters 44 (10) (2019) p. 2502-2505, ISSN 0146-9592

Pancrazzi, M.; F. Landini, C. Baccani, M. Romoli, V. Noce, M. Focardi, C. Casini, A. Dinescu, G. Adam, A. Scippa, G. Giachi, M. Beier
Updates on the PeNCIL project
 Nuovo Cimento C-colloquia and Communications in Physics 42 (1) (2019) p. 25

Pfeiffer, K.; L. Ghazaryan, U. Schulz, A. Szeghalmi
Wide-Angle Broadband Antireflection Coatings Prepared by Atomic Layer Deposition
 ACS Applied Materials & Interfaces 11 (24) (2019) p. 21887-21894, ISSN 1944-8244

Pfeiffer, K.; W. Dewald, A. Szeghalmi
Antireflection coating with consistent near-neutral color on complex-shaped substrates prepared by ALD
 Optics Letters 44 (13) (2019) p. 3270-3273, ISSN 0146-9592

Rahimzadegan, A.; D. Arslan, D. Dams, A. Groner, R. Alaei, I. Fernandez-Corbaton, T. Pertsch, I. Staude, C. Rockstuhl
Beyond dipolar Huygens' metasurfaces for full-phase coverage and unity transmittance
 Nanophotonics 9 (1) (2019) p. 75-82, ISSN 2192-8606

Rahimzadegan, A.; D. Arslan, R.N.S. Suryadharma, S. Fasold, M. Falkner, T. Pertsch, I. Staude, C. Rockstuhl
Disorder-Induced Phase Transitions in the Transmission of Dielectric Metasurfaces
 Physical Review Letters 122 (1) (2019) p. 015702, ISSN 0031-9007

Ran, Y.; M. Junghanns, A. Boden, S. Nolte, A. Tünnermann, R. Ackermann
Temperature and gas concentration measurements with vibrational ultra-broadband two-beam femtosecond/picosecond coherent anti-Stokes Raman scattering and spontaneous Raman scattering
 Journal of Raman Spectroscopy 50 (9) (2019) p. 1268-1275, ISSN 0377-0486

Reupert, A.; M. Heck, S. Nolte, L. Wondraczek
Side-emission properties of femtosecond laser induced scattering centers in optical fibers
 Optical Materials Express 9 (6) (2019) p. 2497-2510, ISSN 2159-3930

Ribes-Pleguezuelo, P.; N. Pavel, E. Beckert, C. Damm, A. Bodemann, O.-V. Grigore, G. Croitoru, C.-A. Brandus, N.-T. Vasile, R. Eberhardt, A. Tünnermann,
Assembly process and optical performances for a golden laser spark-plug device
 Optical Engineering 58 (6) (2019) p. 065101, ISSN 0091-3286

Rothhardt, J.; M. Bilal, R. Beerwerth, A.V. Volotka, V. Hilbert, T. Stöhlker, S. Fritzsche, J. Limpert
Lifetime measurements of ultrashort-lived excited states in Be-like ions
 X-Ray Spectrometry 49 (1) (2019) p. 165-168, ISSN 0049-8246

Samsonova, Z.; S. Hofer, V. Kaymak, S. Alisauskas,
V. Shumakova, A. Pugzlys, A. Baltuska, T. Siefke, S. Kroker,
A. Pukhov, O. Rosmej, I. Uschmann, C. Spielmann, D. Kartashov
**Relativistic Interaction of Long-Wavelength Ultrashort
Laser Pulses with Nanowires**
Physical Review X 9 (2) (2019) p. 021029, ISSN 2160-3308

Saravi, S.; T. Pertsch, F. Setzpfandt
**Photonic crystal waveguides as sources of counterpropa-
gating factorizable biphoton states**
Optics Letters 44 (1) (2019) p. 69-72, ISSN 0146-9592

Saule, T.; S. Heinrich, J. Schötz, U. Kleineberg, I. Pupeza, N.
Lilienfein, M. Högner, O. deVries, M. Plötner, J. Weitenberg, D.
Esser, J. Schulte, P. Russbueltd, J. Limpert, M.F. Kling
**High-flux ultrafast extreme-ultraviolet photoemission
spectroscopy at 18.4 MHz pulse repetition rate**
Nature communications 10 (1) (2019) p. 458, ISSN 2041-1723

Sautter, J.; L. Xu, A. Miroshnichenko, M. Lysevych, I. Volkovs-
kaya, D. A. Smirnova, R. Camacho-Morales, K. Z. Kamali,
F. Karouta, K. Vora, H. H. Tan, M. Kauranen, I. Staude, C.
Jagadish, D. N. Neshev, M. Rahmani
**Tailoring Directional Scattering of Second-Harmonic
Generation from (111)-GaAs Nanoantennas**
Nano Letters 19 (2019) p. 3905-3911, ISSN 1530-6984

Schmidt, D.; K. Pollok, G. Matthäus, S. Nolte, F. Langenhorst
**Nanodeformation in enstatite single crystals: Simulation
of micrometeoroid impacts by femtosecond pulsed laser
experiments**
Geochemistry 79 (4) (2019) p. UNSP 125542, ISSN 0009-2819

Schulz, U.
**Hybrid organic-inorganic materials for broadband
antireflection coatings: Towards broadening the AR
spectral range to address curved lenses and oblique light
incidence**
SVC-Bulletin Spring 2019 (2019) p. 38-43

Schwinde, S.; M. Schürmann, R. Schlegel, J. Kinast, R.J. Dorn,
J.L. Lizon, S. Tordo, N. Kaiser
Protected silver coatings for reflectors
Ceas Space Journal 11 (4) (2019) p. 579-587, ISSN 1868-2502

Seiboth, F.; M. Kahnt, M. Lyubomirskiy, M. Seyrich, F. Wittwer,
T. Ullsperger, S. Nolte, D. Batey, C. Rau, C.G. Schroer
Refractive hard x-ray vortex phase plates
Optics Letters 44 (18) (2019) p. 4622-4625, ISSN 0146-9592

Sepe, E.; A. Sinibaldi, N. Danz, P. Munzert, F. Michelotti
**Anisotropic Fluorescence Emission and Photobleaching
at the Surface of One-Dimensional Photonic Crystals
Sustaining Bloch Surface Waves. II. Experiments**
Journal of Physical Chemistry C 123 (34) (2019) p. 21176-
21184, ISSN 1932-7447

Sephton, B.; A. Valles, F. Steinlechner, T. Konrad, J.P. Torres, F.S.
Roux, A. Forbes
Spatial mode detection by frequency upconversion
Optics Letters 44 (3) (2019) p. 586-589, ISSN 0146-9592

Shcherbakov, M.; F. Eilenberger, I. Staude
**Interaction of semiconductor metasurfaces with short
laser pulses: From non-linear-optical response toward
spatiotemporal shaping**
Journal of Applied Physics 126 (2019) p. 085705, ISSN 0021-8979

Simmen, K.; B. Buch, A. Breitbarth, G. Notni
**Non-destructive inspection system for MAG welding
processes by combining multimodal data**
Quantitative InfraRed Thermography Journal 0 (2019) p. 0,
ISSN 1768-6733

Sorelli, G.; N. Leonhard, V.N. Shatokhin, C. Reinlein, A.
Buchleitner
**Entanglement protection of high-dimensional states by
adaptive optics**
New Journal of Physics 21 (2019) p. 023003, ISSN 1367-2630

Sperrhake, J.; M. Decker, M. Falkner, S. Fasold, T. Kaiser,
I. Staude, T. Pertsch
**Analyzing the polarization response of a chiral metasur-
face stack by semi-analytic modeling**
Optics Express 27 (2) (2019) p. 1236-1248, ISSN 1094-4087

Stark, H.; J. Buldt, M. Müller, A. Klenke, A. Tünnermann,
J. Limpert
**23 mJ high-power fiber CPA system using electro-
optically controlled divided-pulse amplification**
Optics Letters 44 (22) (2019) p. 5529-5532, ISSN 0146-9592

Staude, I.; T. Pertsch, Y. S. Kivshar
All-Dielectric Resonant Meta-Optics Lightens up
ACS Photonics 6 (4) (2019) p. 802-814, ISSN 2330-4022

Stella, U.; L. Boarino, N. De Leo, P. Munzert, E. Descrovi
**Enhanced Directional Light Emission Assisted by Reso-
nant Bloch Surface Waves in Circular Cavities**
ACS Photonics 6 (8) (2019) p. 2073-2082, ISSN 2330-4022

Steinkopff, A.; C. Jauregui, F. Stutzki, J. Nold, C. Hupel, N. Haarlammert, J. Bierlich, A. Tünnermann, J. Limpert
Transverse single-mode operation in a passive large pitch fiber with more than 200 μm mode-field diameter
 Optics Letters 44 (3) (2019) p. 650-653, ISSN 0146-9592

Stenzel, O.; S. Wilbrandt
Beta-distributed oscillator model as an empirical extension to the Lorentzian oscillator model: Physical interpretation of the β_{do} model parameters
 Applied Optics 58 (33) (2019) p. 9318-9325, ISSN 1559-128X

Stenzel, O.; S. Wilbrandt, S. Stempfhuber, D. Gabler, S.J. Wolleb
Spectrophotometric Characterization of Thin Copper and Gold Films Prepared by Electron Beam Evaporation: Thickness Dependence of the Drude Damping Parameter
 Coatings 9 (3) (2019) p. 181, ISSN 2079-6412

Stock, C.; T. Siefke, U. Zeitner
Metasurface-based patterned wave plates for VIS applications
 Journal of the Optical Society of America B-optical Physics 36 (5) (2019) p. D97-D102, ISSN 0740-3224

Stock, J.; M. Beier, J. Hartung, S. Merx, H. Gross
Simulation and analysis of optical imaging systems including real freeform components
 Advanced Optical Technologies 8 (2) (2019) p. 111-117, ISSN 2192-8576

Szeghalmi, A.
Optical Coatings with Atomic Precision
 Photonics Spectra Jun (2019) p. 78-83, ISSN 0731-1230

Tadesse, G.; W. Eschen, R. Klas, M. Tschernajew, F. Tuitje, M. Steinert, M. Zilk, V. Schuster, M. Zurch, T. Pertsch, C. Spielmann, J. Limpert, J. Rothhardt
Wavelength-scale ptychographic coherent diffractive imaging using a high-order harmonic source
 Scientific Reports 9 (2019) p. 1735, ISSN 20145-2322

Tang, Z.; M. Sonntag, H. Gross
Ant colony optimization in lens design
 Applied Optics 58 (23) (2019) p. 6357-6364, ISSN 1559-128X

Trapp, J.; T.G. Jabbour, G. Kelch, T. Pertsch, M. Decker
Hybrid refractive holographic single vision spectacle lenses
 Journal of the European Optical Society-rapid Publications 15 (2019) p. 14, ISSN 1990-2573

Turunen, J.; F. Wyrowski
Time-dependent physical Stokes parameters and degree of polarization of light
 Physical Review A 99 (2) (2019) p. 023824, ISSN 1050-2947

Vaskin, A.; R. Kolkowski, A.F. Koenderink, I. Staude
Light-emitting metasurfaces
 Nanophotonics 8 (7) (2019) p. 1151-1198, ISSN 2192-8606

Vaskin, A.; S. Mashhadi, M. Steinert, K. E. Chong, D. Keene, S. Nanz, A. Abass, E. Rusak, D.-Y. Choi, I. Fernandez-Corbaton, T. Pertsch, C. Rockstuhl, M. A. Noginov, Y. S. Kivshar, D. N. Neshev, N. Noginova, I. S
Manipulation of magnetic dipole emission from Eu^{3+} with Mie-resonant dielectric metasurfaces
 Nano Letters 19 (2) (2019) p. 1015-1022, ISSN 1530-6984

Vetter, C.; R. Steinkopf, K. Bergner, M. Ornigotti, S. Nolte, H. Gross, A. Szameit
Realization of Free-Space Long-Distance Self-Healing Bessel Beams
 Laser & Photonics Reviews 13 (10) (2019) p. 1900103, ISSN 1863-8880

von Finck, A.; T. Herffurth, A. Duparré, S. Schröder, M. Lequime, M. Zerrad, S. Liukaityte, C. Amra, S. Achour, M. Chalony, Q. Kuperman, Y. Cornil, A. Bialek, T. Goodman, C. Greenwell, B. Gur, S. Brinkers, G.
International round-robin experiment for angle-resolved light scattering measurement
 Applied Optics 58 (24) (2019) p. 6638-6654, ISSN 1559-128X

W. Kim, D.; T. Suratwala, S. Schröder
Ultraprecision optics fabrication and characterization
 Optical Engineering 58 (9) (2019) p. 092601, ISSN 0091-3286

Wang, Z.; S. Zhang, O. Baladron-Zorita, C. Hellmann, F. Wyrowski
Application of the semi-analytical Fourier transform to electromagnetic modeling
 Optics Express 27 (11) (2019) p. 15335-15350, ISSN 1094-4087

Werdehausen, D.; S. Burger, I. Staude, T. Pertsch, M. Decker
Dispersion-engineered nanocomposites enable achromatic diffractive optical elements
 Optica 6 (8) (2019) p. 1031-1038, ISSN 2334-2536

Williams, G.; H.-K. Chung, S. Künzel, V. Hilbert, U. Zastra, H. Scott, S. Daboussi, B. Iwan, A. I. Gonzalez, W. Boutu, H. J. Lee, B. Nagler, E. Granados, E. Galtier, P. Heimann, B. Barbre, R.W. Lee, B. I. Cho, P.

Impact of free electron degeneracy on collisional rates in plasmas

Physical Review Research 1 (3) (2019) p. 033216

Wondraczek, L.; A. Grundler, A. Reupert, K. Wondraczek, M.A. Schmidt, G. Pohnert, S. Nolte

Biomimetic light dilution using side-emitting optical fiber for enhancing the productivity of microalgae reactors

Scientific Reports 9 (2019) p. 9600, ISSN 20145-2322

Wong, E.; S. Heist, C. Bräuer-Burchardt, A. Stark, H. Babovsky, R. Kowarschik

Optimization-based extrinsic calibration of a three-dimensional sensor composed of an array projector and a single camera

Optical Engineering 58 (10) (2019) p. 104109, ISSN 0091-3286

Worku, N.; H. Gross

Propagation of truncated Gaussian beams and their application in modeling sharp-edge diffraction

Journal of the Optical Society of America A-optics Image Science and Vision 36 (5) (2019) p. 859-868, ISSN 1084-7529

Xu, Z.; L. Coriand, R. Loeffler, J. Geis-Gerstorfer, Y. Zhou, L. Scheideler, M. Fleischer, F.K. Gehring, F. Rupp

Saliva-coated titanium biosensor detects specific bacterial adhesion and bactericide caused mass loading upon cell death

Biosensors & Bioelectronics 129 (2019) p. 198-207, ISSN 0956-5663

Zhang, Y.; H. Gross

Systematic Design of Microscopic Lenses I

Advanced Optical Technology 8 (5) (2019) p. 313, ISSN 2192-8576

Zhang, Y.; H. Gross

Systematic Design of Microscopic Lenses II

Advanced Optical Technology 8 (5) (2019) p. 349, ISSN 2192-8576

Zhang, Y.; H. Gross

Systematic Design of Microscopic Lenses III

Advanced Optical Technology 8 (5) (2019) p. 385, ISSN 2192-8576

Zou, C.; A. Komar, S. Fasold, J. Bohn, A. Muravsky, A. Murauski, T. Pertsch, D. Neshev, I. Staude

Electrically tunable transparent displays for visible light based on dielectric metasurfaces

ACS Photonics 6 (6) (2019) p. 1533-1540, ISSN 2330-4022

Zou, C.; J. Sautter, F. Setzpfandt, I. Staude

Resonant Dielectric Metasurfaces - Active Tuning and Non-linear Effects

Journal of Physics D-Applied Physics 52 (373002) (2019) p. 27, ISSN 0022-3727

Zubyuk, V.; P. Vabishchevich, M. Shcherbakov, A. Shorokhov, A. Fedotova, S. Liu, G. Keeler, T. Dolgova, I. Staude, I. Brener, A. Fedyanin

Low-power absorption saturation in semiconductor metasurfaces

ACS Photonics 6 (2019) p. 2797–2806 , ISSN 2330-4022

IMPRESSUM IMPRINT

Herausgeber | Editor

Fraunhofer-Institut für Angewandte
Optik und Feinmechanik IOF
Albert-Einstein-Straße 7
07745 Jena
Telefon +49 3641 807-0

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
Anne Groß
Sylvia Bathke
Annika Höft
Dr. Stephanie Hesse-Ertelt
Adlin Bruns

Redaktionsschluss | Editorial deadline

1.4.2020

Gestaltung | Graphic design

Walter Oppel

Druck | Print

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

Bildnachweis | Photo Acknowledgements

Seite | page: 21, 23(2), 24(3), 27, 29, 31, 32, 33, 42(1),
43, 45, 46(2), 47, 55, 56(2), 57, 58, 60, 61, 62,
63, 67, 68, 69, 70, 71

© Die Autorinnen und Autoren / the authors /
Fraunhofer IOF

Seite | page: 16, 22, 25, 36(2), 37, 46(1), 59, 60:

© Christian Süß / Fraunhofer IOF

Seite | page: Titel / Cover, 3, 4, 8, 12, 14, 19, 20, 23(1),
24(1,2), 26, 28, 30, 34, 38, 40, 41, 42(2), 44,
48, 50, 52, 54, 56, 64, 66, 72, 74, 76, 78, 80,
81, 82, 86, 88, 89, 98, 100, 102, 104:

© Walter Oppel / Fraunhofer IOF

Seite | page: 92: © Michael Weimer / Fraunhofer IOF

Seite | page: 36: © Der Roland / Adobe Stock

Seite | page: 84: © David Ausserhofer /
Max-Planck-Gesellschaft

Seite | page: 93: © Fraunhofer FEP

Seite | page: 94(l): © Fraunhofer ILT

Seite | page: 94(r): © Fraunhofer IST

Seite | page: 95(l): © Fraunhofer IPM

Seite | page: 95(r): © Fraunhofer IWS

