

Jahresbericht / Annual Report

2023

SCIENCE IN FOCUS

we love
photonics



Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF

Science in Focus

Jahresbericht 2023

Annual Report 2023

Inhalt

Grußwort	4
Unser Institut	8
Wissenschaftliche Highlights	16
Perspektiven für das Fraunhofer IOF im Geschäftsfeld Photonische Quanten- technologien	18
Größte Metaoptik der Welt	22
QuNET testet hybride ad-hoc Quantenverbindungen	24
Maskenlose Mikrooptik für automotive Anwendungen	26
Polarisationserhaltende Mehrkernfasern ...	28
Weltraumtauglicher Hochleistungsmultiplexer bei 1 µm Wellenlänge	30
Satellitentechnologie ermöglicht nachhaltigen Wassereinsatz	32
Laser-Instrument erforscht Jupiters Eis-Monde	34
Funktionelle Beschichtung verhindert Beschlagen und Reflexionen	36
Mobile Erfassung von komplexen 3D-Strukturen	38
CubEniK: Sichere Quantenkommunikation über Kleinstsatelliten	40
Weitere Jahreshighlights	42
Applied Photonics Award 2023	44
Die Photonics Days Jena 2023	47
»IT-Sicherheit ist eine europäische Aufgabe«	50
»Let's start making Europe now!«	52
Auszeichnungen	54
Messebeteiligungen	55
Zahlen und strategische Projekte	56
Das Institut in Zahlen	58
Anhang	63

Content

Foreword	4
Our Institute	8
Scientific Highlights	16
Prospects for Fraunhofer IOF in the Photonic Quantum Technologies business area	18
Largest Meta-Optics Worldwide	22
QuNET tests Hybrid Ad-Hoc Quantum Communication	24
Maskless Micro-Optics for Automotive Applications	26
Polarization-Maintaining Multicore Fibers ...	28
High Power Wavelength Multiplexer in the 1 µm Spectral Region for Space Application	30
Satellite Technology Enables Sustainable Use of Water	32
Laser Instrument Measures Jupiter's Icy Moons	34
Functional Coating Prevents Fogging and Unwanted Reflections	36
Hand-held Acquisition of Complex 3D Structures	38
CubEniK: Secure Quantum Communication With Micro Satellites	40
Additional Highlights of the Year	42
Applied Photonics Award 2023	44
The Photonics Days Jena 2023	47
"IT Security is a European Task"	50
"Let's start making Europe now!"	52
Awards	54
Trade fair participations	55
Figures and Strategic projects.	56
The institute in figures	58
Appendix	63



Grußwort

Foreword



Wir blicken zurück auf ein ereignisreiches Jahr 2023. Unsere langjährigen Kooperationspartner Anne L’Huillier und Ferenc Krausz sowie Pierre Agostini wurden ausgezeichnet mit dem Nobelpreis für Physik – wir gratulieren von Herzen zu dieser herausragenden Leistung! Ihre Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung experimenteller Methoden zur Erzeugung von Attosekunden-Lichtpulsen. Dank dieser wegweisenden Arbeiten stehen uns heute Verfahren zur Verfügung, um Prozesse mit höchster Zeitauflösung zu untersuchen, einschließlich der Beobachtung der Elektronenbewegung in Atomen und Molekülen.

Auch wir als Fraunhofer IOF haben im vergangenen Jahr erneut wichtige Beiträge für die Grundlagenforschung und die Entwicklung innovativer Anwendungen geleistet. Mit der Mission JUICE etwa startete die ESA am 14. April zur Erkundung des Jupiters und seiner Monde. Für diese einzigartige Mission, welche erst im Jahr 2034 in die finale Umlaufbahn des Jupiter-Mondes Ganymed einschwenken wird, entwickelten unsere Forschenden gemeinsam mit dem Unternehmen HENSOLDT Optronics das erste »Deep-Space-Laseraltimeter« mit Namen GALA. Grundlage des Messinstruments ist eine nur wenige Millimeter dünne Hochleistungsspiegel-Optik, mit welcher über eine hochpräzise Oberflächenvermessung mögliche Wasservorkommen auf Ganymed untersucht werden sollen.

Auch in anderen gesellschaftlich bedeutenden Feldern, wie der Medizin und der Mikroelektronik, konnten wir durch Lösungen mit Licht zu weiterem Erkenntnisgewinn und Fortschritt befähigen. Die Untersuchung von Bakterien, Viren und mikroelektronischen Bauelementen zum Beispiel erfordert höchste Auflösungen in der Bildgebung. Bisher waren dafür teure und aufwändige Großforschungsanlagen, einschließlich langer Wartezeiten für deren Nutzung nötig, um die erforderliche kurzwellige Strahlung zu erzeugen. Für die Entwicklung eines kompakten Labor-Setups zur Erzeugung von extrem-ultraviolet-Strahlung (EUV) mittels Hochleistungsultrakurzpulslasern

We are looking back on an eventful 2023. Our long-term collaborators Anne L’Huillier and Ferenc Krausz as well as Pierre Agostini were awarded the Nobel Prize for Physics — we sincerely congratulate them on this outstanding achievement! Their research focuses on the development of experimental methods to generate attosecond pulses of light. Thanks to this groundbreaking work, we now have methods to study processes with the highest time resolution at our disposal, including the observation of electron movement in atoms and molecules.

In the past year, we as Fraunhofer IOF have once again also made important contributions to basic research and the development of innovative applications. The mission JUICE, for example, was launched by ESA on April 14 to explore Jupiter and its moons. For this one-of-a-kind mission, which will first reach the final orbit of Jupiter’s moon Ganymede in 2034, our researchers developed the first “deep space laser altimeter” named GALA in collaboration with the company HENSOLDT Optronics. The measuring device is built on the basis of a high-performance mirror optics just a few millimeters thick, which will be used to investigate possible water deposits on Ganymede via high-precision surface measurements.

We have also been able to further advance knowledge and progress through solutions with light in other critically important fields such as medicine and microelectronics. The study of bacteria, viruses, and microelectronic components, for example, requires the highest resolutions in imaging. Until now, expensive and complex large-scale research facilities with long wait times were necessary to generate the required short-wave radiation. For the development of a compact laboratory setup that generates extreme ultraviolet (EUV) radiation using high-performance ultrashort pulse lasers and its application for high-resolution lensless imaging of biological samples, the first prize for “Excellent Interdisciplinary Cooperation 2023” by Beutenberg Campus e.V. was awarded to researchers

und deren Anwendung für hochauflösende linsenlose Bildgebung an biologischen Proben wurden Forschende des Fraunhofer IOF sowie des Instituts für Angewandte Physik gemeinsam mit Partnern des Leibniz-HKI mit dem ersten Preis für »Exzellente interdisziplinäre Kooperation 2023« des Beutenberg-Campus e.V. ausgezeichnet. Die Promotionsarbeit zur Entwicklung der EUV-Strahlquelle von Dr. Robert Klas wurde außerdem mit dem Hugo-Geiger-Preis der Fraunhofer-Gesellschaft geehrt.

Eine besondere Auszeichnung mit dem Fraunhofer-Preis »Technik für den Menschen und seine Umwelt« 2023 erhielten zudem Forschende unseres Instituts gemeinsam mit unserer Ausgründung SPACEOPTIX sowie den Projektpartnern Fraunhofer EMI und deren Ausgründung constellr. Mit dem Ziel, den Gesundheitszustand von Pflanzen basierend auf deren Wasserhaushalt zu untersuchen, entwickelten die Partner innerhalb weniger Monate gemeinsam ein kompaktes Erdbeobachtungssystem. Die Leistungsfähigkeit des neuartigen Messprinzips und der Optik wurde erfolgreich auf einer Außenplattform der ISS getestet. Auf diese Weise wurde ein bedeutender Schritt zu einer künftig ressourcenschonenderen Landwirtschaft genommen.

Ebenso wie die Anwendungen der Photonik im Weltraum stellen auch die photonischen Quantentechnologien höchste Anforderungen an Komponenten und Systeme. Sie bieten jedoch ebenso umfassende Potentiale für innovative Anwendungen wie abhörsichere Kommunikation, hochempfindliche Sensorik und Bildgebung sowie leistungsfähiges Quantum-Computing. Mit einem erfolgreichen Quantenschlüssel-Austausch auf einer heterogenen Teststrecke aus Freistrahl- und Faserverbindungen als zweites Schlüsselexperiment der strategischen BMBF-Initiative QuNET, dem Kickoff zum BMBF-Projekt Q-net-Q zum Ausbau von Quanten-Kommunikationsstrecken nach Frankfurt, Berlin und Nordhausen sowie vielfältigen weiteren Forschungsprojekten konnten wir im vergangenen Jahr wichtige Meilensteine erreichen für den Transfer der modernen Quantentechnologien in innovative Anwendungen für die Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft.

Auch über diese bedeutenden Forschungsthemen hinaus hat sich unser Institut im vergangenen Jahr stetig weiterentwickelt und stellte sich dabei aktuellen gesellschaftlichen Herausforderungen. So arbeiten inzwischen mehr als 490 Mitarbeitende aus 40 Nationen gemeinsam in einer offenen Arbeitskultur. Diversität und Vielfalt sind Teil unserer Mission, wissenschaftliche Exzellenz ohne freies Denken nicht möglich. Seit Februar 2024 setzt sich das Fraunhofer IOF vor diesem Hintergrund auch als Mitglied der Initiative »Weltoffenes Thüringen« für eine freie Gesellschaft und eine Kultur der Vielfalt im Freistaat ein. Weiterhin engagieren wir uns durch vielfältige Angebote und Formate aktiv in der Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Dazu gehören unter anderem das MINT-Festival Jena für Schülerinnen und Schüler, der Wissenschaftscampus

from Fraunhofer IOF and the Institute of Applied Physics who collaborated with partners from Leibniz-HKI. Moreover, Dr. Robert Klas' doctoral thesis on the development of the EUV beam source was awarded the Fraunhofer-Gesellschaft's Hugo Geiger Prize.

A special honor that was awarded to researchers of our institute jointly with our spin-off company SPACEOPTIX and the project partners Fraunhofer EMI as well as their spin-off company constellr is the Fraunhofer Prize for "Human- and Environment-Centered Technology" 2023. Within just a few months, the partners developed a compact Earth observation system to study the health of plants on the basis of their water needs. The performance of the new measurement principle and optics was successfully tested on an external platform of the ISS. Doing so signified a major step towards a more resource-efficient agriculture in the future.



Für seine Forschung arbeitet Robert Klas (wie hier mit Bild) mit Hochleistungs-UltrakurzpulsLasern. / For his research, Robert Klas works with high-power ultrashort pulse lasers (pictured here).

Just like the application of photonics in space, photonic quantum technologies also place the highest requirements on components and systems. They offer similarly extensive potential for innovative applications such as secure communication, highly sensitive sensing and imaging as well as high performance quantum computing. In the past year, we were able to reach important milestones in the transfer of modern quantum technologies into innovative applications for industry, science, and society. These include the strategic BMBF (German Federal Ministry of Education and Research) initiative QuNET's successful second key experiment of a quantum key exchange on a heterogenous test route of free-space and fiber ►

2023 für Studierende aus MINT-Fächern, die Fraunhofer Photonica 2023 zur Gewinnung internationaler Nachwuchsforschender sowie die jährlich stattfindenden Photonics Days Jena mit in diesem Jahr über 165 internationalen Teilnehmenden. Zusätzlich haben wir auch 2023 erneut den Applied Photonics Award organisiert, einen Nachwuchsförderpreis zur Würdigung besonders herausragender Abschlussarbeiten mit relevantem Bezug zur Angewandten Photonik. Durch derlei Maßnahmen tragen wir dazu bei, Fachkräfte aus der ganzen Welt zu gewinnen, zu integrieren sowie exzellente Forschung am Fraunhofer IOF sowie am Forschungsstandort Thüringen, Deutschland und Europa zu fördern.

Ein besonderes Highlight stellte in diesem Jahr auch die positive Evaluation der Exzellenz-Graduiertenschule Max Planck School of Photonics dar. Gestartet in 2019 mit dem Ziel, themenbezogene und einrichtungsübergreifende Graduiertenprogramme zu schaffen, die mit den besten Universitäten und Institutionen weltweit konkurrieren können, zeigte sich das Gutachtergremium 2023 beeindruckt von den exzellenten Studierenden, der Adressierung vielfältiger Karrierepfade durch die enge Vernetzung mit Wissenschaft und Wirtschaft sowie der Möglichkeit eines gemeinsamen Master-Abschlusses an zwei Partneruniversitäten und den herausragende E-Learning-Methoden im »Digital Teaching Lab«. Das Gremium sprach sich ausdrücklich für eine Fortführung der »Max Planck School of Photonics« aus, welche wir mit großem Engagement gemeinsam mit unseren Partnern umsetzen wollen.

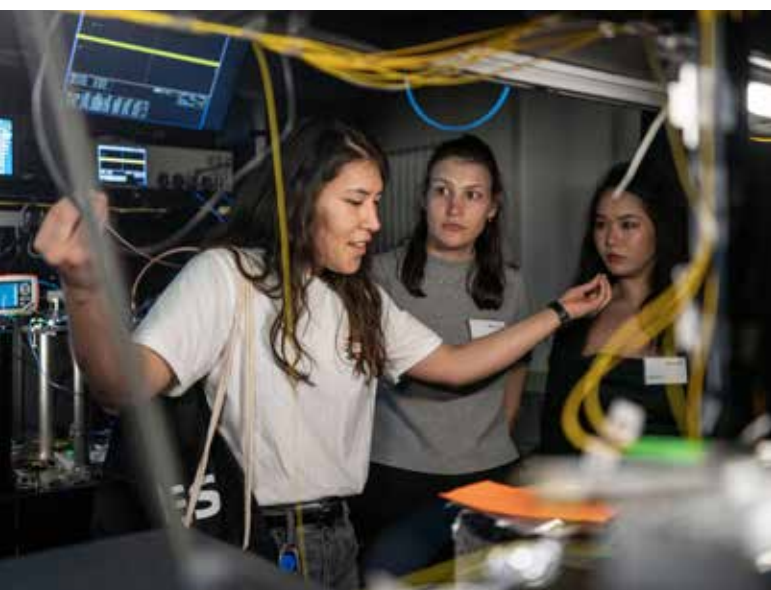
2023 konnten wir dank unserer exzellenten Partner aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik erneut zahlreiche

links, the kickoff for the BMBF project Q-net-Q for the expansion of quantum communication routes to Frankfurt, Berlin and Nordhausen as well as various other research projects.

In addition to these important research topics, our institute has continued to develop over the past year and addressed current societal challenges in the process. Currently, more than 490 staff members from 40 nations are working together in an open-minded workplace culture. Diversity is a part of our mission, scientific excellence without free thought is not possible. Against this backdrop, Fraunhofer IOF has also been a member of the "Weltoffenes Thüringen" (Thuringia Open to the World) initiative since February 2024, promoting a free society and a culture of diversity in the state. Furthermore, we are actively committed to the qualification of junior scientists through a variety of offers and formats. These include the MINT Festival Jena for students from primary up to high school, the Science Campus 2023 for MINT university students, the Fraunhofer Photonica 2023 to recruit international junior researchers as well as the yearly Photonics Days Jena with over 165 international participants this year. Furthermore, in 2023 we organized the Applied Photonics Award once again, an award for junior researchers that honors particularly excellent theses with a focus on applied photonics. Because of these activities, we contribute to recruiting and integrating skilled workers from all over the world and promote excellent research at Fraunhofer IOF as well as Thuringia, Germany and Europe as research hubs.

A special highlight in the past year was the positive evaluation of the excellence graduate school Max Planck School of Photonics. It was launched in 2019 with the goal of creating subject specific and cross-institutional graduate programs that can compete globally with the best universities and institutions. The 2023 review panel was impressed by the excellent students, the addressing of diverse career paths through close networking with science and industry as well as the possibility of a joint master's degree at two partner universities and the outstanding e-learning methods in the "Digital Teaching Lab". The panel strongly recommended the continuation of the Max Planck School of Photonics, which we intend to realize with great dedication in collaboration with our partners.

In 2023 we were once again able to successfully complete many projects and achieve impressive results with the help of our excellent partners in science, industry, and politics. I would therefore like to take this opportunity to especially thank our funders, cooperating companies, and partner institutions, who have aided and supported us in a variety of ways over the past year. The successful collaborative realization of excellent research and development to support German and European industry is only possible through open and reliable cooperation.



Studentinnen besuchen das Fraunhofer IOF zum Fraunhofer Wissenschaftscampus. / Female students visit Fraunhofer IOF during Fraunhofer Science Campus 2023.

*Ausgezeichnetes mit dem Fraunhofer Preis
2023 (v.l.n.r.) / Awarded the 2023 Fraunhofer
Prize (from left): Cassi Welling (constellr
GmbH), Dr. Henrik von Lukowicz (Fraunhofer
IOF), Dr. Matthias Beier (SPACEOPTIX GmbH)
und Clemens Horch (Fraunhofer EMI)*

Projekte erfolgreich abschließen und beeindruckende Ergebnisse erzielen. Ich möchte mich an dieser Stelle daher auch explizit bei unseren Fördermittelgebern, kooperierenden Unternehmen sowie Partnereinrichtungen bedanken, die uns im letzten Jahr auf vielfältige Weise begleitet und unterstützt haben. Nur durch eine offene und vertrauensvolle Zusammenarbeit ist es möglich, exzellente Forschung und Entwicklung zur Unterstützung der deutschen und europäischen Industrie gemeinsam erfolgreich umzusetzen.

Mein besonderer Dank gilt weiterhin allen Mitarbeitenden des Fraunhofer IOF. Mit ihrem Engagement und ihrer außergewöhnlichen Leistungsbereitschaft haben sie wieder einmal herausragende Arbeiten ermöglicht und zur stetig wachsenden Exzellenz des Instituts beigetragen. Ich freue mich sehr auf die Zukunft und bin zuversichtlich, dass wir auch im kommenden Jahr gemeinsam Lösungen mit Licht für die Herausforderungen der Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft von Morgen entwickeln werden.

Ihr / Your



Andreas Tünnermann
Leiter des Fraunhofer IOF / [Director of Fraunhofer IOF](#)



My special thanks also go to all staff members at Fraunhofer IOF. With their commitment and exceptional dedication, they have once again enabled outstanding work and contributed to the institute's ever-growing excellence. I am very much looking forward to the future and am confident that in the coming year we will continue to develop solutions with light for the challenges of the economy, science, and society of tomorrow.



Unser Institut

Licht ist ein wandelbares Werkzeug. Wegen seiner vielen Einsatzmöglichkeiten sowie seiner einzigartigen Eigenschaften als elektromagnetische Welle und Lichtteilchen ist es Grundlage zahlreicher Schlüsseltechnologien für künftige Herausforderungen der modernen Welt. Unter diesem Gesichtspunkt forscht das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF mit Sitz in der traditionsreichen Optikstadt Jena an der Weiterentwicklung photonischer Technologien zur Lösung unterschiedlichster Fragestellungen und Anwendungsszenarien.

Die Arbeit des 1992 gegründeten Forschungsinstituts konzentriert sich auf die

anwendungsorientierte Erforschung der Lichterzeugung, -führung und -messung. Die interdisziplinäre Bündelung der institutseigenen Kompetenzen in den Bereichen Optik und Feinmechanik erlaubt es dem Fraunhofer IOF gemeinsam mit kooperierenden Einrichtungen, komplexe und einzigartige photonische Komponenten und Systeme zu entwickeln. Zusammen mit Partnerinnen und Partnern aus der Grundlagenforschung sowie Industrie entstehen innovative Lösungen, die in Wissenschaft und Wirtschaft einen technologischen Vorteil bedeuten. Für die Photonik werden neue Anwendungsfelder erschlossen und für die Gesellschaft ein relevanter Mehrwert geschaffen.



Our Institute

Light is a versatile tool. Due to its many applications as well as its unique properties as an electromagnetic wave and a light particle, it is the basis for key technologies for future challenges of the modern world. In this context, the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF, situated in the long-standing tradition of the optics hotspot Jena, is conducting research into the ongoing development of photonic technologies to solve a wide variety of problems and application scenarios.

The work of the research institute, founded in 1992, focuses on applied research into the generation, guidance and measurement of light. The interdisciplinary pooling of the institute's own expertise in the fields of optics and precision engineering allows Fraunhofer IOF, together with cooperating institutions, to develop complex and unique photonic components and systems. With partners from basic research and industry, innovative solutions are created that represent a technological advantage in science and business. New fields of application are opened up for photonics and relevant value is added for society.

Organisation Organization

INSTITUTE MANAGEMENT

Director

Prof. Dr.
Andreas
Tünnermann



Deputy director

Dr. Ramona
Eberhardt



Deputy director

Prof. Dr.
Stefan Nolte



ADMINISTRATION

Administration

(since 2024)
Anja Riedel



(until 2024)
Elke Heuer



Strategy and communication

Dr. Robert
Kammel



Technical services

Wieland
Stöckl



SCIENTIFIC DIRECTORATE

Prof. Dr.
Andreas
Tünnermann



Prof. Dr. Uwe
Detlef Zeitner



Dr. Ramona
Eberhardt



Prof. Dr.
Jens Limpert



Prof. Dr.
Gunther Notni



Prof. Dr.
Stefanie Gräfe



Prof. Dr.
Stefan Nolte



SCIENTIFIC DEPARTMENTS

Optical and Mechanical System Design

Dr. Robert Brüning



Micro- and Nanostructured Optics

Dr. Falk Eilenberger



Opto-mechatronic Components and Systems

Dr. Erik Beckert



Precision Optical Components and Systems

Dr. Stefan Risse



Functional Surfaces and Coatings

Dr. Sven Schröder



Laser and Fiber Technology

Dr. Thomas Schreiber



Imaging and Sensing

Dr. Peter Kühmstedt



Emerging Technologies

Dr. Ramona Eberhardt



STRATEGIC PROJECTS



QuNET
Quantum secure IT infrastructure



fo+
Regional growth core for freeform optics



Leistungszentrum Photonik
Center of Excellence



QUANTIFISENS
RUBIN-Alliance



Digital Innovation Hub Photonics
Hub for start-ups



Max Planck School of Photonics
Graduate school



Fraunhofer
Fraunhofer-Zentrum Erfurt
Collaborative research center



AMI
RUBIN-Alliance



Fraunhofer CAPS
Cluster of Excellence
Advanced Photon Sources

Kuratorium / Advisory Committee

Vorsitzender / Chair

- Dr. Michael Mertin
CeramTech Gruppe

Mitglieder / Members

- | | |
|----------------------------------|--|
| ■ Christian Amann | BMW Group |
| ■ Peggy Bärenklau | Heracle GmbH |
| ■ Dr. Klaus Bartholmé | Friedrich-Schiller-Universität Jena |
| ■ Robert Fetter | Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft |
| | microresist technology |
| ■ Gabi Grützner | VDI Technologiezentrum GmbH |
| ■ Dr. Holger Junge | Robert Bosch GmbH |
| ■ Katrin Kobe | Friedrich-Schiller-Universität Jena |
| ■ Prof. Dr. Walter Rosenthal | Schott AG |
| ■ Dr. Eveline Rudigier-Voigt | Trumpf GmbH + Co. KG |
| ■ Dr. Christian Schmitz | Universität Paderborn |
| ■ Prof. Dr. Christine Silberhorn | Helmholtz-Institut Jena |
| ■ Prof. Dr. Thomas Stoehlker | Carl Zeiss SMT GmbH |
| ■ Dr. Joachim Stühler | Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG |
| ■ Thomas Thöniß | Jenoptik AG |
| ■ Dr. Stefan Traeger | Airbus Defence and Space |
| ■ Dr. Dennis Weise | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| ■ Dr. Petra Wolff | |

Wissenschaftliche Fachabteilungen

Scientific Departments



Laser and Fiber Technology

Research focus

- Special fibers
- Custom laser systems for space, telecommunication, sensing, security, and quantum application
- EUV, MIR, and THz Application labs

Head of department

Dr. Thomas Schreiber

Scientific research groups

- **Laser Technology**
Dr. Till Walbaum
Group leader
- **Fiber Technology**
Dr. Nicoletta Haarlammert
Group leader



Opto-mechatrical Components and Systems

Research focus

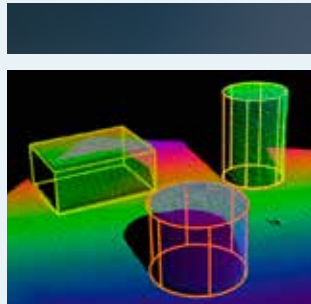
- Quantum technologies hard- and software
- Microassembly and packaging technologies
- Hybrid system integration
- Interlayer bonding technologies

Head of department

Dr. Erik Beckert

Scientific research groups

- **Microassembly and Printing**
Dr. Falk Kemper
Group leader
- **Quantum Hardware**
Dr. Erik Beckert
Group leader



Imaging and Sensing

Research focus

- 3D measurement methods
- Development of high-speed, real-time, in-line, and hand-held 3D measurement systems
- Imaging systems and their miniaturization

Head of department

Dr. Peter Kühmstedt

Scientific research groups

- **Image Processing and AI**
Dr. Andreas Breitbarth
Group leader
- **3D Sensing**
Dr. Stefan Heist
Group leader



Optical and Mechanical System Design

Research focus

- Optical design
- Mechanical design
- System design
- Simulation and analysis
- Optimization

Head of department

Dr. Robert Brüning

Scientific research groups

- **Advanced Optical Design**
Dr. Christian Vetter
Group leader
- **Micro-Optical Systems**
Dr. Norbert Danz
Group leader
- **Opto-Mechanical Design**
Dr. Thomas Peschel
Group leader



Micro- and Nano-structured Optics

Research focus

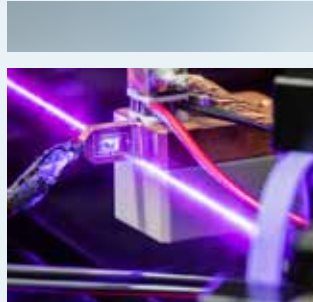
- Grayscale lithography
- Electron beam lithography
- Reactive ion etching
- Step & repeat replication
- Wafer-scale microoptical systems

Head of department

Dr. Falk Eilenberger

Scientific research groups

- **Center for Advanced Micro- and Nano-Optics**
Dr. Martin Rumpel
Group leader
- **Advanced Microoptical Components**
Dr. Robert Leitel
Group leader
- **Integrated Photonic Systems**
Dr. Sebastian Schmidt
Group leader



Emerging Technologies

Research focus

- Quantum communication technologies
- Quantum imaging technologies
- Active and adaptive optical components and systems

Head of department

Dr. Ramona Eberhardt

Scientific research groups

- **Quantum Communication**
Dr. Fabian Steinlechner
Group leader
- **Quantum Imaging**
Dr. Valerio Flavio Gili
Group leader
- **Active and Adaptive Optics**
Dr. Matthias Goy
Group leader



Precision Optical Components and Systems

Research focus

- Metal mirrors for EUV/VIS/NIR
- Telescopes and spectrometers
- Freeform components
- Additive manufacturing
- Surface finishing
- Direct bonding
- Systems integration

Head of department

Dr. Stefan Risse

Scientific research groups

- **Metal Optics**
Dr. Nils Heidler
Group leader
- **Surface Technologies**
Dr. Jan Kinast
Group leader
- **Precision Systems**
Dr. Henrik von Lukowicz
Group leader
- **Bonding Technologies**
Dr. Carolin Rothhardt
Group leader



Functional Surfaces and Coatings

Research focus

- Ultra-broadband AR and HR coatings
- Conformal coatings using atomic layer deposition
- Space-qualified coatings
- Metrology with light scattering and absorption

Head of department

Dr. Sven Schröder

Scientific research groups

- **Plastic Optics**
Dr. Astrid Bingel
Group leader
- **Precision Optics**
Dr. Stefan Schwinde
Group leader
- **Conformal Coatings**
Dr. Adriana Szeghalmi
Group leader
- **Surface and Coating Characterization**
Dr. Sven Schröder
Group leader

Geschäftsfelder des Fraunhofer IOF

Business areas of Fraunhofer IOF



Lichtquellen und Laser

Mit umfassender Expertise im Design von Faser- und Lasersystemen sowie der Erforschung neuer Materialien und Technologien wie den »Secondary Sources« ist das Fraunhofer IOF in der Lage, maßgeschneiderte optische Komponenten wie aktive und passive Fasern sowie Strahlführungssysteme zu entwickeln und herzustellen.

Dadurch werden kompakte Strahlquellen und leistungsstarke Laserkonzepte mit individuellen Parametern realisiert. Diese Strahlquellen decken einen breiten Wellenlängenbereich von EUV/XUV bis IR ab und können kontinuierliche oder gepulste Strahlung mit Leistungen im Multikilowatt-Bereich erzeugen. Sie kommen zum Einsatz in verschiedenen industriellen Applikationen und Märkten und ermöglichen visionäre Anwendungen, von Messtechnik und photonischen Quantentechnologien bis hin zur hochpräzisen Materialbearbeitung, Sicherheit und lasergestützten Kernfusion.

Light Sources and Lasers

With comprehensive expertise in the design of fiber and laser systems as well as in researching new materials and technologies like "Secondary Sources", Fraunhofer IOF is able to develop and manufacture customized optical components such as active and passive fibers as well as beam delivery systems.

Thereby, compact beam sources and powerful laser concepts with individual parameters are realized. These beam sources cover a broad wavelength range from EUV/XUV to IR and can generate continuous or pulsed radiation with outputs in the multi-kilowatt range. They are used in various industrial applications and markets and enable visionary applications ranging from metrology and photonic quantum technologies to high-precision material processing, security and laser-assisted nuclear fusion.



Sensorik und Metrologie

Als ein berührungsloses Präzisionsinstrument bietet Licht in der Messtechnik, Sensorik und Analytik eine Vielzahl von Möglichkeiten. Das Fraunhofer IOF widmet sich der Entwicklung optischer und opto-elektronischer Mess- und Sensorsysteme für verschiedene Anwendungen. Dazu zählen 3D-Digitalisierung, Qualitätssicherung, Fertigungsmesstechnik, Medizin und Biotechnologie.

Das breite Spektrum umfasst ultraschnelle und multimodale 3D-Messsysteme, die auf Muster- und Streifenprojektion basieren, sowie ultraflache und Multi-Apertur-Kameras. Des Weiteren werden Verfahren zur Oberflächen- und Schichtcharakterisierung eingesetzt. Zusätzlich werden am Institut spezialisierte Anwendungen wie biophotonische Sensoren und Unterwasser-Sensorik entwickelt.

Sensors and Metrology

As a non-contact precision instrument, light offers a range of possibilities in metrology, sensing and analytics. Fraunhofer IOF is dedicated to the development of optical and opto-electronic measurement and sensor systems for various applications. These include 3D digitization, quality assurance, production metrology, medicine and biotechnology.

The broad spectrum includes ultra-fast and multimodal 3D measurement systems based on pattern and structured light projection, as well as ultra-flat and multi-aperture cameras. Furthermore, methods for surface and layer characterization are used. In addition, specialized applications such as biophotonic and underwater sensors are developed at the institute.



Photonische Quantentechnologie

Als einer der führenden Akteure in der angewandten Quantenphotonik in Europa, widmet sich das Fraunhofer IOF der Erforschung und Entwicklung einzigartiger photonischer Quantensysteme für Wissenschaft und Wirtschaft. Insbesondere werden Anwendungen wie abhörsichere Quantenkommunikation, rauscharme Quantenabbildungssysteme und photonische Quantencomputer vorangetrieben.

Durch den Einsatz geschlossener quantentechnologischer Prozessketten und vielfältiger Alleinstellungsmerkmale ist das Fraunhofer IOF in der Lage, quantenoptische Komponenten und Systeme zu entwickeln, zu realisieren, zu optimieren, zu miniaturisieren und zu integrieren. Dies umfasst den gesamten Prozess von der Modellierung über den Systemaufbau bis hin zur Qualifizierung und Demonstration anwendungsspezifischer Prototypen.

Photonic Quantum Technology

As one of the leaders in applied quantum photonics in Europe, Fraunhofer IOF is dedicated to the research and development of unique photonic quantum systems for science and industry. In particular, applications such as secure quantum communication, low-noise quantum imaging systems and photonic quantum computers are being advanced.

By utilizing closed quantum-technology process chains and a variety of unique selling points, Fraunhofer IOF is able to develop, realize, optimize, miniaturize and integrate quantum-optical components and systems. This includes the entire process from modeling to system design, all the way to the qualification and demonstration of application-specific prototypes.



Opto-mechanische Systeme

Das Fraunhofer IOF beherrscht die gesamte Prozesskette im Spektralbereich von EUV bis THz. Dies umfasst das Design optischer und opto-mechanischer Komponenten und Systeme, die Entwicklung und Fertigung von Komponenten wie Gittern, Spiegeln, Beschichtungen und Wellenleitern sowie die Systemintegration und Charakterisierung für anspruchsvolle Anwendungen und verschiedene Märkte.

Basierend auf dieser Expertise werden leistungsstarke und miniaturisierte Bildgebungs- und Projektionssysteme für Bereiche wie Informationstechnologie, Kommunikation, Mobilität und Sicherheit entwickelt. Zudem werden Wafer- und Masken-Chucks für die Lithografie sowie Messtechnik, Spiegelsysteme und Spektrometer für die Erdbeobachtung und Astronomie entwickelt.

Opto-mechanical Systems

Fraunhofer IOF covers the entire process chain in the spectral range from EUV to THz. This includes the design of optical and opto-mechanical components and systems, the development and production of components such as grids, mirrors, coatings and waveguides as well as system integration and characterization for complex applications and various markets.

Based on this expertise, high-performance and miniaturized imaging and projection systems are developed for areas such as information technology, communication, mobility and security. In addition, wafer and mask chucks for lithography as well as metrology, mirror systems and spectrometers for earth observation and astronomy are developed.



Perspektiven für das Fraunhofer IOF im Geschäftsfeld Photonische Quan- tentechnologien

Quantenmechanische Funktionsprinzipien befördern derzeit einen fundamentalen Wandel in der Optik und Photonik zu einem neuen Regime an Leistungsparametern. Diese Entwicklung bietet die Grundlage für eine neue Generation an Kommunikations- und Informationstechnologien sowie gänzlich neue Konzepte für Bildgebung und Sensorik.

Vielfältige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF standen im vergangenen Jahr und zuvor im Zeichen dieser grundsätzlichen Erneuerung der Optik und Photonik, die auch zukünftig eine priorisierte Rolle in der strategischen Schwerpunktsetzung des Instituts einnehmen wird. Gemeinsam mit exzellenten Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft bearbeiten wir ausgewählte grundlegende Fragestellungen und befördern den Transfer dieser disruptiven Technologien in innovative Anwendungen mit Mehrwerten für die Gesellschaft.

Im europäischen Forschungsraum zeichnet sich in den aktuellen Entwicklungen der Quantentechnologien ein wichtiger Trend ab, der sich auch im globalen Wettbewerb zur ersten industriellen Wertschöpfung widerspiegelt: Optische Systeme, photonische Materialien und nanoskalige Produktionsverfahren zur Beförderung grundlegender Funktionsprinzipien der Quantentechnologien haben einen hohen Reifegrad erlangt. Zugleich sind geeignete Methoden und Strategien zur Integration und effektiven Skalierung eine große Herausforderung in der Weiterentwicklung zu leistungsfähigen Anwendungen.

Diese neue Phase in der Reife der Quantentechnologien stellt zugleich neue Fähigkeiten und Ressourcen für die Bewältigung zentraler gesellschaftlichen Herausforderungen in Aussicht. Digitale Infrastrukturen spielen eine zentrale Rolle in der Gewährleistung der technologischen Souveränität Europas und in der kompetitiven Positionierung der Industrie in Deutschland. Derzeit werden leistungsfähige, klassische photonische

Prospects for Fraunhofer IOF in the Photonic Quantum Technologies business area

With fundamentally new capabilities offered by the quantum approach, optical and photonic technologies are currently being redefined in their performance parameters across the full spectrum of application fields in sensing, communication, and computation.

In 2023 as well as in previous years, driving progress at the forefront of these developments has been the central priority in ongoing research efforts of the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF and will continue to play a primary role in the activities and the strategic focus of the institute. Together with excellent partners from science and industry, we work on specific fundamental questions and the transfer of these disruptive technologies into innovative applications with added value for society.

In this context, an important trend can be identified within the current state of developments in Europe as well as in the global competition to industrial adoption and commercialization of quantum technologies: Optical systems, photonic materials, and nanoscale production techniques capable of meeting the high technical demands for enabling the basic working principles of quantum devices have advanced significantly towards maturity. At the same time, the techniques for integration and the capabilities for an effective upscaling remain a central challenge for driving this emergent technology into broad application.

This new phase in the developments of quantum technologies is coming at a time in which this key emergent technology can play an important role in supporting central societal challenges with novel capabilities. Digital infrastructures have taken on a central priority for guaranteeing the technological sovereignty of Europe and a competitive position of

Technologien eingesetzt, um die Konnektivität in terrestrischen und satellitenbasierten Netzwerken zu befördern. Das beinhaltet auch eine neue Generation an Sensorik, die diese Datennetzwerke speist und die grundlegende Erweiterung von Hochleistungsrechenzentren, die die neuen Dimensionen an Daten in der Wertschöpfung bewältigen können. Die Entwicklung von digitalen Infrastrukturen mit leistungsfähigen, klassischen photonischen Technologien und die tiefe Integration skalierbarer Quantentechnologien bieten einen hohen Grad an technologischen und ökonomischen Synergien. Mit einem Tandem aus klassischen und quantenbasierten Ressourcen zur Befähigung digitaler Infrastrukturen können die ersten, konsequenten Schritte zur Wertschöpfung in den Quantentechnologien an der Spitze internationaler Entwicklungen erzielt werden.

Diese neue Phase der Entwicklung im Fortschritt zu den Quantentechnologien erfordert auch eine strategische Ausrichtung in den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Mit der festen Überzeugung, dass signifikanter Fortschritt zu neuen Schlüsseltechnologien nicht entkoppelt von realen Anforderungen etablierter Technologien und bestehender Infrastrukturen erfolgen kann, nehmen Methoden zur Integration und Skalierung eine zentrale Position im F&E-Portfolio des Instituts ein. Entscheidend für diese Ausrichtung ist eine umfassende Einbindung und Weiterentwicklung aller etablierten Kompetenzen und Ressourcen aus den primären Aktivitätsfeldern des Instituts entlang der gesamten photonischen Prozesskette. Das Portfolio des Instituts bietet hierzu eine ideale Grundlage durch die enge Verzahnung von Kompetenzen zu Theorie und Simulation mit einem umfassenden Spektrum an Verfahren zur Herstellung, Charakterisierung und Erprobung leistungsfähiger photonischer Komponenten und Systeme.

Um das Potenzial moderner Quantentechnologien zu untersuchen und in innovative Anwendungen zu überführen, realisiert das Fraunhofer IOF vielfältige interdisziplinäre Projekte in enger Kooperation mit renommierten Partnern aus Wissenschaft und Industrie. In Formaten wie der strategischen BMBF-Initiative QuNET werden hochsichere Kommunikationssysteme in heterogenen Testbeds mit Freiraum- und Glasfaserverbindungen entwickelt und evaluiert, insbesondere für Anwendungen in sicherheitskritischen Einrichtungen wie Bundesbehörden. Projekte wie PhoQuant zielen darauf ab, photonische Quantencomputer und Instrumentierung in integrierter und skalierbarer Bauweise zu entwickeln, um einzigartige Vorteile für die Berechnung von industrierelevanten Anwendungen zu bieten. Darüber hinaus konzentrieren sich Allianzen wie RUBIN QUANTIFISENS auf die Entwicklung omnifunktionaler Sensorplattformen, die z.B. quantenphysikalische Konzepte und vollintegrierte, flexible Fasersensorik kombinieren, um innovative Anwendungen für Zukunftsfelder wie Medizin, Umwelt oder Infrastrukturüberwachung zu erschließen. Im Querschnitt zu diesen Kompetenzen und strategischen Initiativen verfolgt das

the industry in Germany. Currently, advanced classical optical technologies are being deployed for achieving a high-throughput connectivity of terrestrial and space-based information networks. This includes the new optical imaging and sensor systems that feed these networks as well as new computational capacities for supercomputing centers for processing new dimensions of data in these networks. The deployment of advanced classical optical and photonic technologies for enabling digital infrastructures and the deep integration of scalable quantum resources offer a high degree of technological as well as strategic economic synergies. In a tandem of classical and quantum resources towards enabling digital infrastructures, the first decisive step to achieving true economic and societal benefit from the added value of quantum technologies can be achieved at the forefront of global developments.

This inflection point to a new phase in the developments to quantum technologies must also be addressed in a strategic orientation and priorities in research and development. With the strong conviction that no technological field can advance to broad application isolated and decoupled from established technologies and infrastructures, deep integration and dedicated upscaling of quantum technologies is a central focus for the research portfolio of the institute. Comprehensive inclusion of competencies of the institute along the entire photonic process chain is crucial for this implementation. These competencies are represented in the departments of the institute in a unique combination of expertise in theory and simulation together with a broad spectrum of production capabilities for key photonic enabling technologies.

To investigate and transfer the potential of modern quantum technologies into innovative applications with added value, manifold interdisciplinary projects are realized in close cooperation with renowned partners from science and industry. In formats such as the strategic BMBF initiative QuNET, highly secure communication systems are developed and evaluated on heterogeneous testbeds including free space and fiber links, in particular for applications in security-critical facilities such as federal authorities. Moreover, projects such as PhoQuant aim to develop photonic quantum computer and instrumentation in integrated and scalable designs to provide unique advantages for the computation of industry-relevant applications. In addition, alliances such as RUBIN QUANTIFISENS focus on the development of omni-functional sensor platforms that, for example, combine quantum technology concepts and fully integrated, flexible fiber sensor technology to open up innovative applications for future fields such as medicine, the environment or infrastructure monitoring.

In cross-section to these competencies and strategic initiatives, the institute pursues dedicated transfer strategies that empower partners in science and industry and pave the way for industrial application and value creation. Particular



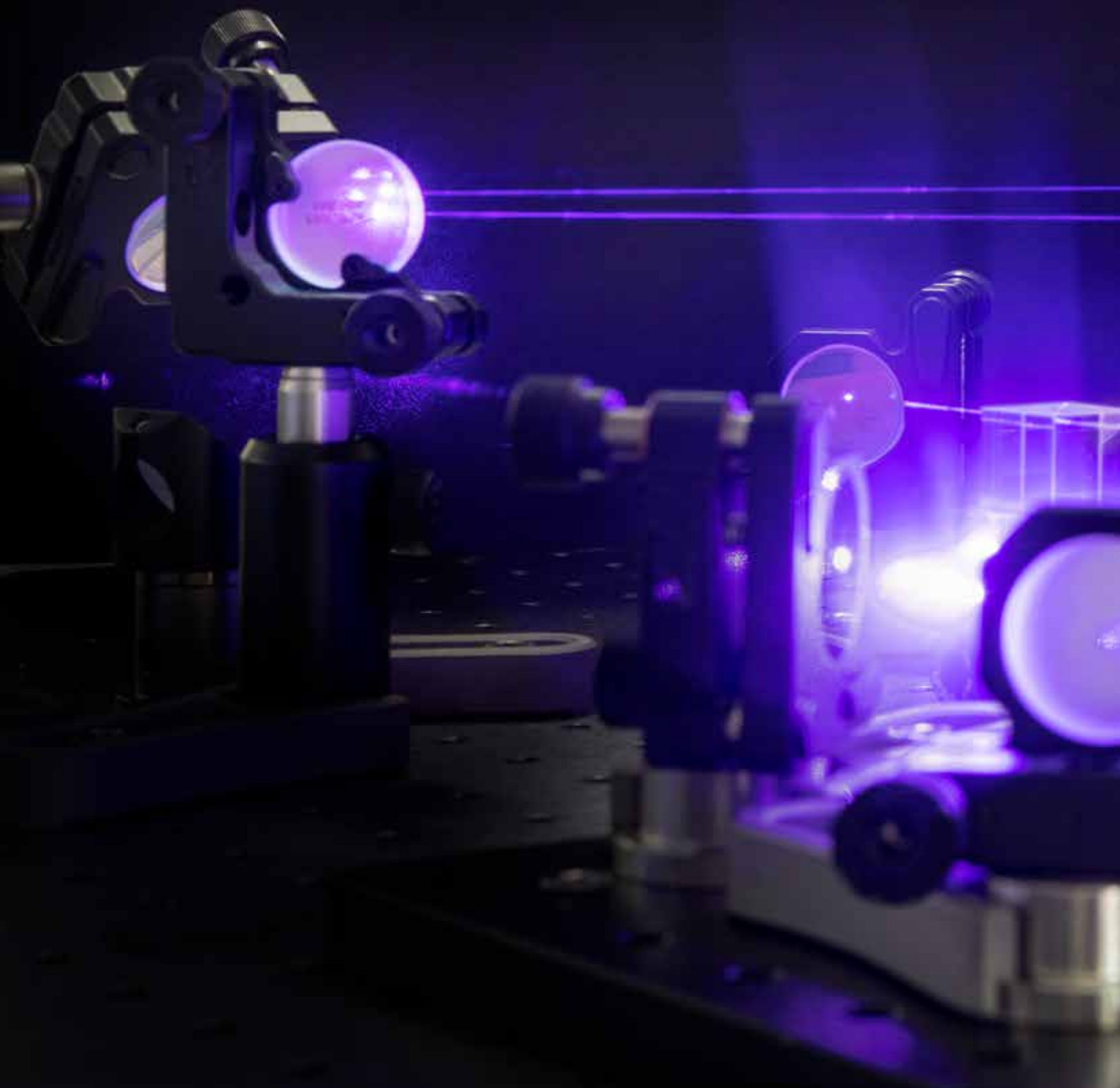
Institut dezidierte Transferstrategien, die Partner in Wissenschaft und Wirtschaft befähigen und den Weg zur industriellen Anwendung und Wertschöpfung ebnen. Besonderes betont werden der strategische Ausbau von Patentportfolios sowie Aktivitäten zur Standardisierung und Zertifizierung im engen Austausch mit Industriepartnern und Bundeseinrichtungen. Mit geförderten Projekten der EU, des Bundes sowie des Freistaates Thüringen, etwa Qu-Test und Qu-Pilot, dem BMBF-Schirmprojekt SQuAD, Q-NET-Q und dem Quantum Hub Thüringen, werden übergreifende Testbeds und Forschungsnetzwerke entwickelt und für Partner aus Wissenschaft und Industrie zur Erprobung bereitgestellt. Zur Befähigung der Industrie realisiert das Institut darüber hinaus Bildungsprogramme und Workshops für die berufliche Qualifizierung einer neuen Generation hochqualifizierter Arbeitskräfte, welche wie im Format qp-tech.edu sowohl die akademische Lehre bereichern als auch anwendungs- und marktorientierte Kompetenzen für die Industrie vermitteln. Mit der Start-up-Plattform Digital Innovation Hub Photonics begleitet das Institut aktiv Gründerinnen und Gründer sowie Start-ups bei der erfolgreichen Umsetzung innovativer Geschäftsideen in der Photonik und den Quantentechnologien. Gleichermaßen wird durch anwendungsorientierte Auftragsforschung die Entwicklung von Kompetenzen und Portfolios von Partnern der Industrie priorisiert unterstützt, um insbesondere deutschen und europäischen Startups und KMU eine führende Position im Aufbau dieses neuen, internationalen Industriesektors zu ermöglichen.

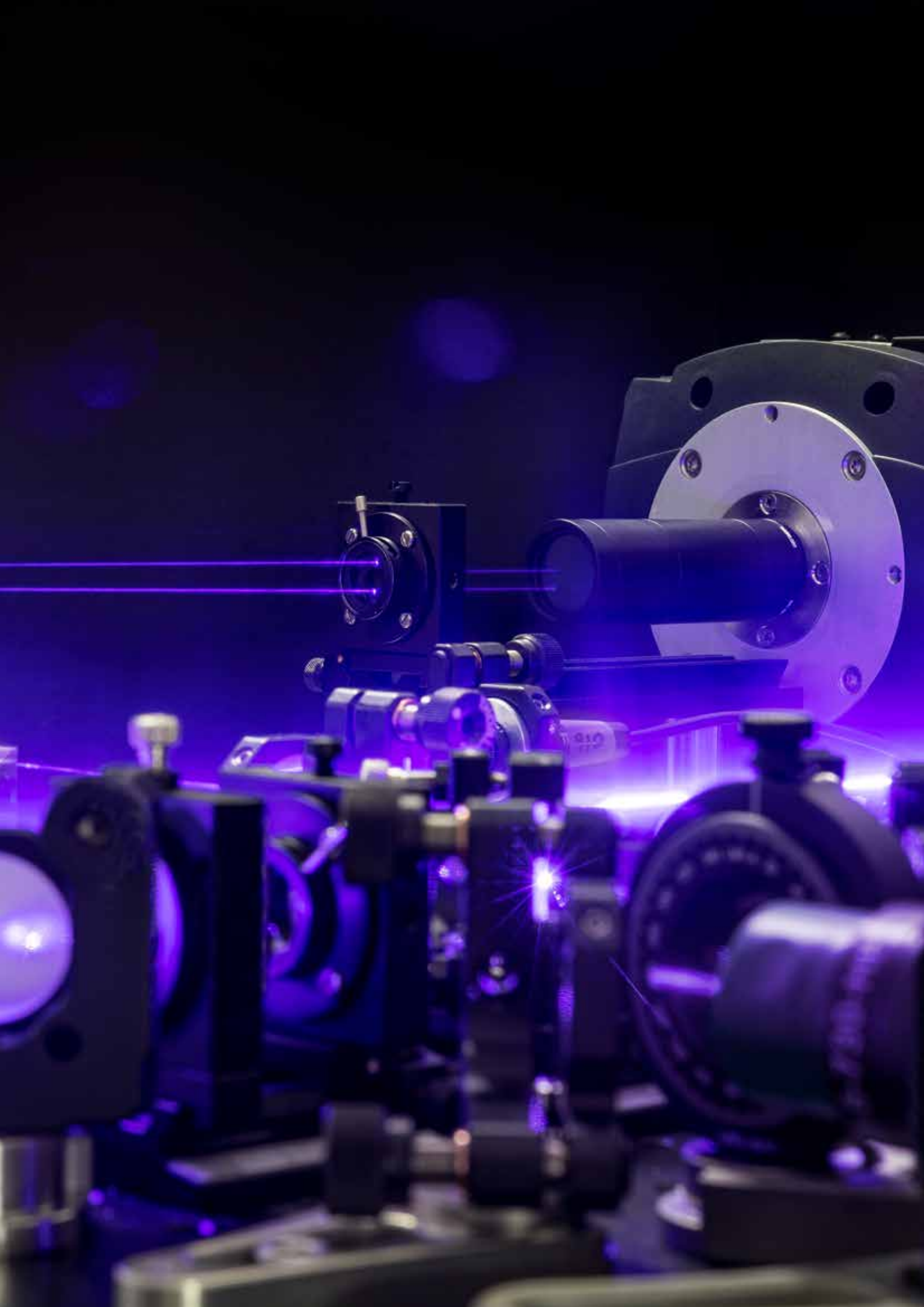
Die oben skizzierten Entwicklungen und Aktivitätsfelder stellen zugleich die ersten Keimungspunkte für eine gänzlich neue, international kompetitive europäische Wirtschaft dar, befördert durch öffentlich-private Kooperationen von exzellenten Forschungsorganisationen und der Industrie. Basierend auf dem Portfolio, das 2023 sowie in den Jahren zuvor etabliert wurde, werden die Ressourcen und Kompetenzen des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF auf diese nachhaltige Entwicklung der Quantentechnologien ausgerichtet – zum Ausbau von leistungsfähigen und resilienten digitalen Infrastrukturen und für Mehrwerte in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft.

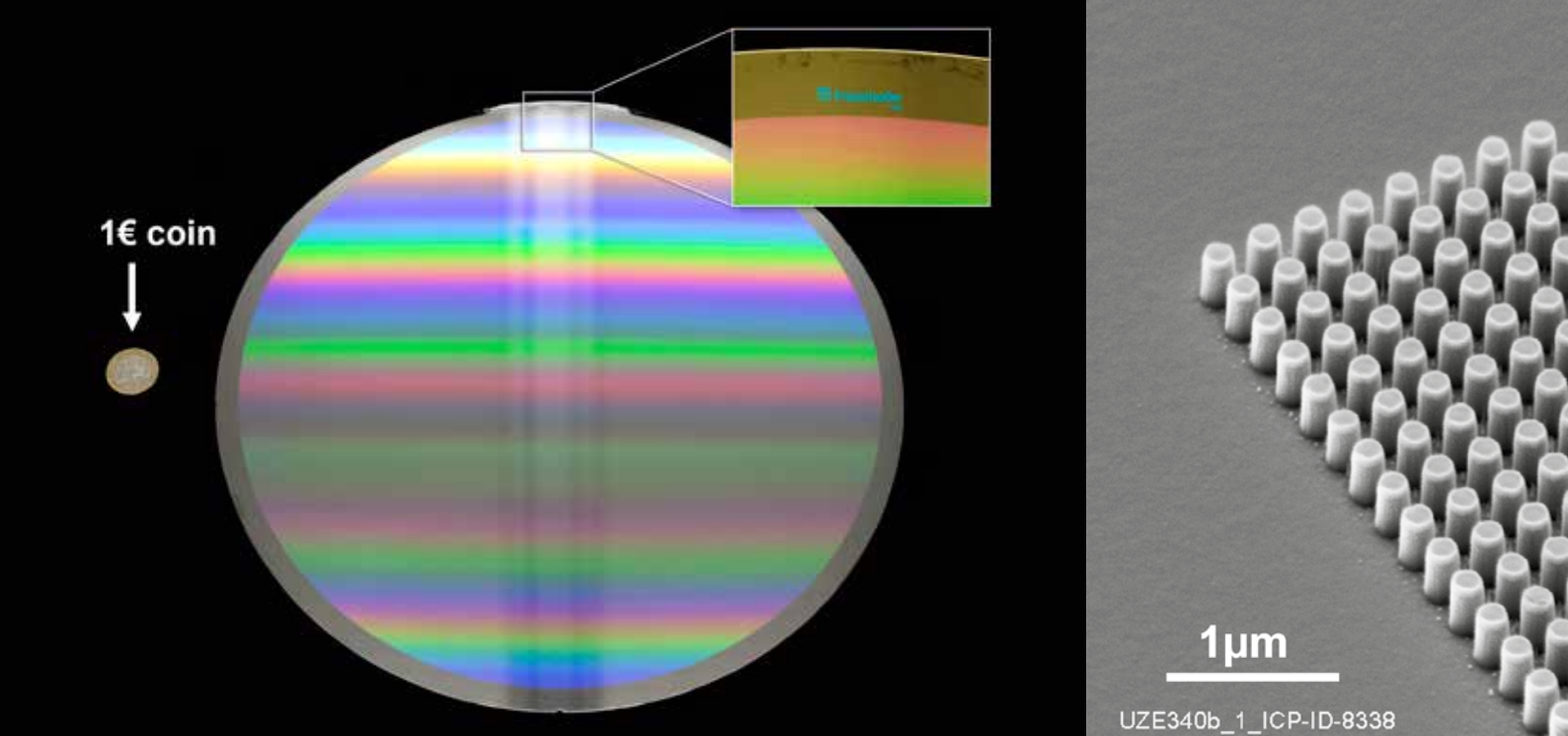
emphasis is placed on the strategic expansion of patent portfolios as well as standardization and certification activities in close cooperation with industrial partners and federal institutions. With projects funded by the EU, the federal government, and the Free State of Thuringia, such as Qu-Test and Qu-Pilot, the BMBF umbrella project SQuAD, Q-NET-Q and the Quantum Hub Thuringia, comprehensive testbeds and research networks are developed and made available for testing by partners from science and industry. To empower industry, the institute also implements educational programs and workshops for the professional qualification of a new generation of highly qualified workers, which, as in the qp-tech.edu format, both enrich academic teaching and impart application- and market-oriented skills for industry. With the start-up platform Digital Innovation Hub Photonics, the institute actively supports founders and start-ups in the successful implementation of innovative business ideas in photonics and quantum technologies. Similarly, the development of skills and portfolios of industry partners is prioritized through application-oriented contract research in order to enable German and European start-ups and SMEs in particular to take a leading position in the development of this new, international industrial sector.

These efforts can be a seeding point for a new internationally competitive European industry born out of the dedicated collaboration with excellent research partners in private-public joint ventures. Based on the portfolio that has been established in 2023 and in previous years, the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF will orientate its competences, resources, and research activities for taking a central position in the mission of sustainable developments of quantum technologies — for the development of powerful and resilient digital infrastructures and the benefit for science, industry, and society.

Wissenschaftliche Highlights Scientific Highlights







[1] Am Fraunhofer IOF wurde die erste Metaoberfläche mit einem Durchmesser von 30 cm realisiert (zum Vergleich eine Ein-Euro-Münze). / The first metasurface with a diameter of 30 cm was realized at the Fraunhofer IOF (for comparison, a one-euro coin).

Größte Metaoptik der Welt

Vor etwa 150 Jahren schufen Ernst Abbe, Carl Zeiss und Otto Schott in Jena die Grundlagen für die moderne Optik. Sie beruht bis heute im Wesentlichen auf Glas als Basismaterial für Linsen und Spiegel. Mit Metaoptiken kommt jetzt eine Technologie auf den Markt, bei der hauchdünne Nanostrukturen die Funktion klassischer Optik übernehmen. Metaoptiken lenken Lichtstrahlen mit meist periodischen Nanostrukturen auf ihrer Oberfläche ab. Diese Nanostrukturen sind deutlich kleiner als die Wellenlänge des einfallenden Lichts.

In Wissenschaft und Forschung kommen Metaoberflächen schon länger zum Einsatz. Allerdings sind die Bauteile hier oft nur einige Quadratmillimeter groß. Für die akademische Forschung ist das ausreichend, für viele industrielle Anwendungen aber nicht und erst recht nicht, um künftig eine reale Alternative zur klassischen Linse zu schaffen.

Forschende des Fraunhofer IOF präsentieren nun erstmals eine Metaoberfläche mit einem Durchmesser von 30 cm. Sie sind nicht die Erfinder der Metaoberflächen, aber die Einzigen, die das auf einer so großen Skala zeigen können.

Für die Herstellung der Metaoberfläche haben die Forschenden eine spezielle Schreibstrategie der Elektronenstrahlolithografie genutzt, die sogenannte Character-Projection. Die Character-Projection ist eine Methode, bei der ein komplexes Muster in kleinere Einheiten aufgeteilt wird. Anschließend wird ein

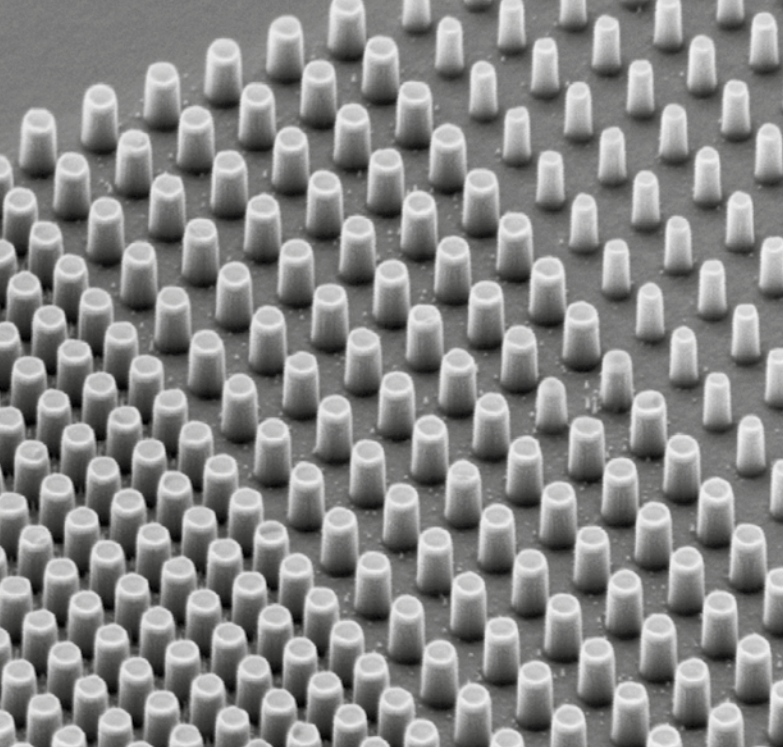
Largest Meta-Optics Worldwide

About 150 years ago, Ernst Abbe, Carl Zeiss, and Otto Schott laid the foundations for modern optics in Jena. To this day, it is essentially based on glass as the primary material for lenses and mirrors. With meta-optics, a technology is now coming into the market in which wavelength-thin nanostructures take over the function of classic glass optics. Meta optics direct light beams with mostly periodic nanostructures on their surface. These nanostructures are substantially smaller than the wavelength of the incident light.

Meta-surfaces have been used in science and research for some time already. However, the components used here are often only a few square millimeters in size. This is sufficient for academic research, but not for many industrial applications and certainly not to become a real alternative to classic lenses in the future.

Researchers at Fraunhofer IOF are now presenting a metasurface with a diameter of 30 cm for the first time. They are not the inventors of metasurfaces, but they are the only ones who can demonstrate this on such a large scale.

To produce the metasurface, the researchers used a special writing strategy in electron beam lithography known as character projection. Character projection is a method in which a complex pattern is divided into smaller units.



[2] Elektronenstrahlmikroskopische Aufnahme des Metagitters. Das Gitter besteht aus einer lateralen Abfolge maßgeschneiderter Nanostrukturen. / Electron beam microscope image of the meta grating. The grating consists of a lateral sequence of customized nano structures.

Authors

Prof. Dr. Uwe D. Zeitner
Dr. Michael Banasch
Dr. Marcus Trost

Contact

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

Elektronenstrahl verwendet, um jedes dieser kleinen Muster mit Hilfe einer Mikromaske hochparallelisiert immer wieder auf einer Oberfläche zu erzeugen. Dies ermöglicht die Herstellung komplexer Strukturen mit hoher Präzision und Effizienz. Für die Struktur mit 30 cm Durchmesser war nur etwa ein Tag Belichtungszeit nötig. Das ist ein bis zwei Größenordnungen schneller als herkömmliche Methoden der Elektronenstrahl-lithografie wären.

Die Metaoptik wurde auf einem Silizium-Wafer aufgetragen, das Verfahren ist jedoch übertragbar auf Glas, optische Kristalle oder Schichtsysteme. Die Positionierung der Nanostrukturen erfolgt mit interferometrischer Präzision über den gesamten Wafer.

Die neue Fertigungstechnologie kann dazu beitragen, optische Systeme künftig deutlich kompakter zu bauen. Das wäre für Virtual- oder Augmented-Reality Brillen vorteilhaft, aber auch für Smartphone-Kameras. Weitere Anwendungspotentiale liegen in der hochaufgelösten Spektroskopie oder in computer-generierten Hologrammen.

Erste Metaoptiken, die mit dieser Technologie hergestellt wurden, sind bereits im Weltraumeinsatz, so zum Beispiel als Spektrometergitter bei der GAIA-Mission der ESA.

An electron beam is then used to repeatedly generate each of these small patterns on a surface using a micromask. This enables the production of complex structures with high precision and efficiency. For the 30 cm diameter structure, only about one day of exposure time was required. This is one to two orders of magnitude faster than conventional electron beam lithography methods would be.

The meta-optics were created on a silicon wafer, but the process is transferable to glass, optical crystals, or layer systems. The nanostructures are positioned with interferometric precision over the entire wafer.

The new production technology can help to make optical systems significantly more compact in the future. This would be advantageous for virtual or augmented reality glasses, but also for smartphone cameras. Further potential applications lie in high-resolution spectroscopy or computer-generated holograms.

The first optics produced using this technology are already flying in space, for example as spectrometer grating in ESA's GAIA mission.

Literatur / References

- 1 U. D. Zeitner, M. Banasch, M. Trost, »Potential of E-beam lithography for micro- and nano-optics fabrication on large areas«, Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, Vol. 22, Issue 4, 041405 (June 2023). <https://doi.org/10.1117/1.JMM.22.4.041405>



[1] In der QuNET-Initiative werden Technologien für die sichere Quantenkommunikation entwickelt. / Within the QuNET initiative, researchers develop technologies for secure quantum communication.

QuNET testet hybride ad-hoc Quantenverbindungen

Im Rahmen der QuNET-Initiative kamen im Juni 2023 Forschende der QuNET-Partnerinstitute in Jena zusammen, um bei einem Verbundexperiment den Austausch von Quantenschlüsseln in heterogenen ad-hoc Links bei Tageslicht zu demonstrieren. Dabei tauschten sie eine Serie von Quantenschlüsseln zwischen zwei 1,7 km voneinander entfernten Punkten in Jena aus. Sie nutzten dafür eine Kombination aus Faserverbindungen und einer transportablen Freistrahilverbindung. Auf der heterogenen Teststrecke erreichten sie bei Tag Schlüsselübertragungsraten im Bereich von Kilobits pro Sekunde.

Die QuNET-Initiative ist eine vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Initiative der Fraunhofer-Gesellschaft, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, der Max-Planck-Gesellschaft und der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Im Rahmen der Initiative entwickeln die Partner hochsichere Kommunikationssysteme auf der Basis von modernsten Quantentechnologien. Sie tragen dazu bei, sichere und robuste IT-Netzwerke zu schaffen, die den Cyberangriffen von morgen standhalten.

Ziel des Schlüsselexperiments im Sommer 2023 war es, den Austausch von Quantenschlüsseln in heterogenen ad-hoc Links bei Tageslicht zu zeigen. Die kombinierte Freistrah- und Faserverbindung wurde in zwei Etappen umgesetzt: Auf dem Dach der Stadtwerke Jena stand ein Container mit dem Teleskop zum Senden von Quantenschlüsseln. Von hier wurden Quantensignale über 1,7 km Luftlinie als Freistrah zum

QuNET tests Hybrid Ad-Hoc Quantum Communication

Within the framework of the QuNET initiative, researchers of the QuNET partner institutes convened in Jena in June 2023 to demonstrate the exchange of quantum keys in heterogeneous ad-hoc links in daylight during a joint experiment. For this, they exchanged a series of quantum keys between two points about 1.7 km apart in Jena in June 2023. They used a combination of fiber connections and a transportable free-beam connection. On the heterogeneous test track, they achieved key transmission rates in the range of kilobits per second in daylight.

Funded by the Federal Ministry of Education and Research, the QuNET initiative unites researchers from the Fraunhofer-Gesellschaft, the German Aerospace Center, the Max Planck Gesellschaft, and the Friedrich-Alexander University Erlangen-Nuremberg. As part of the initiative, the partners are developing highly secure communication systems based on state-of-the-art quantum technologies. They are helping to create secure and robust IT networks that can withstand the cyber-attacks of tomorrow.

The aim of the key experiment carried out in summer 2023 was to demonstrate the exchange of quantum keys in heterogeneous ad-hoc links in daylight. The combined free-space and fiber link was implemented in two stages: A container with the telescope for sending quantum keys was located on the roof of the Stadtwerke Jena building. From here, quantum signals were transmitted via free space over 1.7 kilometers to



QuNET testet hybride ad-hoc Quantenverbindungen QuNET tests Hybrid Ad-Hoc Quantum Communication

[2] Die transportablen QuBUS Container erlauben den ad-hoc Aufbau von Freistrah-Quantenverbindungen. / The portable QuBUS containers allow the ad-hoc establishment of free-space quantum connections.

Authors

Prof. Dr. Fabian Steinlechner

Contact

Prof. Dr. Fabian Steinlechner
Phone +49 3641 807-733
fabian.steinlechner@
iof.fraunhofer.de

Beutenberg Campus übertragen. Das Teleskop in der dortigen Empfangsstation empfing die Signale und speiste sie in eine Faserverbindung ein. Nach einer 300-m-Faserstrecke wurde aus dem Photonensignal im Fraunhofer IOF ein Quantenschlüssel erzeugt. Eine verschränkungsbasierte Photonenquelle lieferte über die Freistrahverbindung alle 2 Minuten 15,6 kbit Schlüsselmaterial, das entspricht 60 AES-256-Schlüsseln.

Mit den verschiedenen Systemen wurden mehrere Protokolle für den Quantenschlüsselaustausch (QKD) erprobt. Dafür wurden neben einzelnen Photonen auch die elektrischen Felder vermessen. Es wurde gezeigt, dass dieser hybride Ansatz selbst bei den fluktuierenden Übertragungskanälen der Freistrahverbindung bei Tageslicht für den Quantenschlüsselaustausch ohne zusätzliche Filter geeignet ist.

Neben dem Tageslichtbetrieb ist der nomadische Charakter von Sender und Empfänger ein wichtiger Aspekt des Experiments. Die beiden Laborcontainer (QuBUS und Photon Box) sowie ein mobiles Transceiver-Teleskop auf einem Dreibein lassen sich mit einem Fahrzeug an einen beliebigen Ort bringen und können dort eine quantengesicherte Verbindung herstellen.

the Beutenberg Campus. There, the receiver telescope picked up the signals and fed them into a fiber link. After a 300 m fiber connection, a quantum key was generated at Fraunhofer IOF from the photon signal. An entanglement-based photon source delivered 15.6 kbit key material every 2 minutes via the free space link, which corresponds to 60 AES-256 keys.

Various protocols for quantum key distribution (QKD) were tested with the different systems. In addition to individual photons, the electric fields were also measured. It was shown that this hybrid approach is suitable for quantum key exchange without additional filters, even with the fluctuating transmission channels of the free space connection in daylight.

Besides the daylight operation, the nomadic character of transmitting and receiving system is another important aspect of the experiment. The two lab-containers (QuBUS and Photon Box) as well as a mobile transceiver telescope on a tripod can be transported to any location using a vehicle and can establish a quantum-secured connection there.

Literatur / References

- 1 A. Kržič, S. Sharma, C. Spiess, et al., »Towards metropolitan free-space quantum networks«, npj Quantum Inf 9, 95 (2023).
- 2 C. Spiess, S. Töpfer, S. Sharma, A. Kržič, M. Cabrejo-Ponce, U. Chandrashekhara, N. Döll, D. Rieländer, F. Steinlechner, »Clock Synchronization with Correlated Photons«, Phys. Rev. Applied 19, 054082 (2023)



[1] Künstlerische Darstellung der projizierten Lichtverteilung bei Tageslicht. / Artistic visualization of the projected distribution in daylight conditions.

Maskenlose Mikrooptik für automotive Anwendungen

Seit der Einführung des BMW Welcome Light Carpet im Jahr 2015 sind mikrooptische Projektoren für viele Straßenprojektionsanwendungen etabliert. Sie sind stark miniaturisierbar und eignen sich sowohl für die Car2X-Kommunikation als auch für projizierte Blinker und Rücklichter.¹ Bei ausreichend hoher Systemtransmission kann die Mikrooptik auch das Strahlungsfeld von Frontscheinwerfern formen.

Derzeit leiden die Mikrooptik-Architekturen allerdings unter Transmissionsverlusten durch vergrabene absorptive Masken. Die Maskenschichten führen auch zu höheren Herstellungskosten und verringern die Lebensdauer, was die Markteinführung erschwert. Ein neu entwickelter, maskenloser Designansatz adressiert diese Probleme durch die Verlagerung der Mustererzeugung bzw. Strahlformung von der Maske hin zu den Mikrolinsenarrays:² Dies erfordert den Übergang von regulären Linsenarrays zu individuell berandeten und optional dezentrierten Lensletsegmenten, die als irreguläre Arrays angeordnet sind (Abb. 2).

Das Mastering der neuen irregulären Arrays erfolgt mit Grautolithographie. Anschließend werden die Master mit einem High-end Imprintprozess als Polymer-auf-Glas Tandemarrays repliziert. Alternativ sind preiswerte Technologien wie Spritzgießen oder Heißprägen, die größere und optional gekrümmte Elemente bei minimal verschlechterter optischer Qualität ermöglichen, einsetzbar.¹

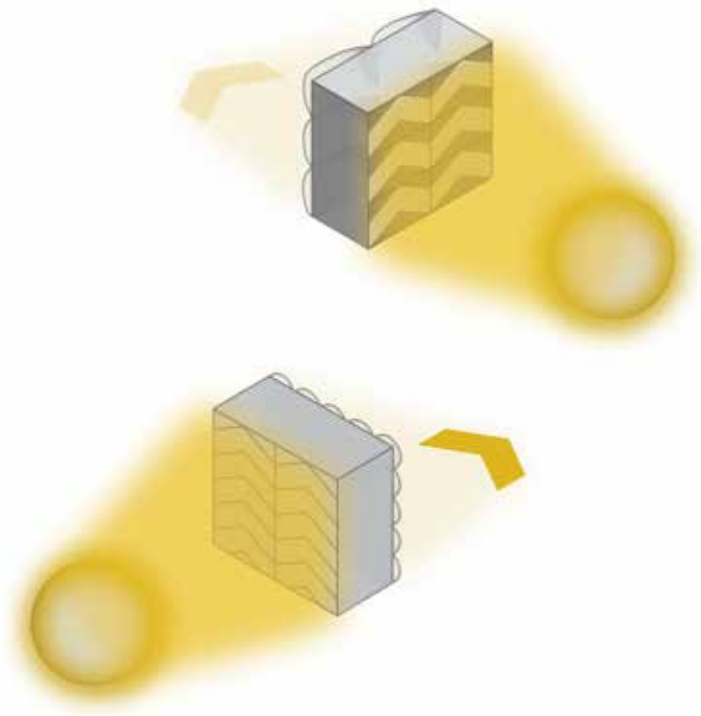
Maskless Micro-Optics for Automotive Applications

Since the introduction of the BMW Welcome Light Carpet in 2015, micro-optical projectors have been established for many road projection applications. Such projectors are highly miniaturizable and suitable for Car2X communication as well as for projected indicators and tail lights.¹ With sufficiently high system transmission the micro-optics also enables pattern shaping in headlamps.

However, micro-optical architectures currently suffer from transmission losses due to buried absorptive masks. The mask layers also increase manufacturing costs and reduce lifetime especially for headlamps, which complicates market launch. A newly developed maskless design approach addresses both problems by shifting pattern generation or beam shaping from the mask to the microlens arrays:² This requires transforming the regular lens arrays into individually contoured and decentered lenslet segments arranged as irregular arrays (Fig. 2).

The new irregular arrays are mastered by gray-scale lithography. The masters are then replicated as polymer-on-glass tandem arrays using a high-end imprint process. Alternatively, cost effective technologies such as injection molding or hot embossing, enabling larger and optionally curved elements with only slightly reduced optical quality, can be used.¹

The irregular tandem microlens arrays can be used in various applications for high brightness projection and pattern shaping:



[2] Prinzip des Strahlformers basierend auf Blenden (oben rechts) und auf einem irregularen Linsenarray (unten links). / Pattern shaping principle based on apertures (top right) and on an irregular lens array (bottom left).

Authors

Dr. Peter Schreiber
Rohan Kundu
Dmitrii Stefanidi
Leo Maximilian Wilhelm
Dr. Norbert Danz

Contact

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

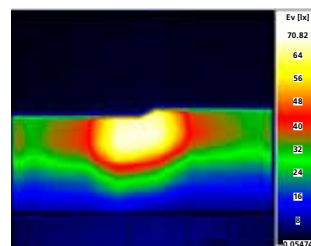
Die irregulären Tandem-Mikrolinsenarrays lassen sich an vielen Stellen für Musterprojektion und Strahlformung nutzen:

Ein projizierender Blinker (Abb. 1) zum Beispiel lässt sich in einem Bauraum von nur $35 \times 35 \times 55 \text{ mm}^3$ realisieren und erzeugt eine Illuminanz von über 7 klux auf der Straße bei einer elektrischen Eingangsleistung von 3,3 W¹. Die hohe Illuminanz zusammen mit einem dynamischen Lauflicht-Effekt ermöglichen Sichtbarkeit auch unter Tageslichtbedingungen. In einem Abblendlichtmodul von $60 \times 20 \times 35 \text{ mm}^3$ formen unterschiedlich berandete Kondensorlenslets eine scharfe Hell-Dunkelgrenze nach oben und einen kontinuierlichen Helligkeitsverlauf nach unten.³ Die Fernfeldverteilung des aus vier Modulen bestehenden Abblendlichts (Abb. 3) ist in guter Übereinstimmung mit UN-ECE-Standards und liefert eine Maximalintensität von 42 kcd bei 20 W elektrischer Eingangsleistung.

Die hohe Transmission von 70 %, neue künstlerische Designfreiheitsgrade und eine mögliche Kosteneinsparung durch Replikation mit Spritzgussverfahren machen dieses Design zu einer attraktiven Alternative sowohl zu traditionellen Einzelapertur- als auch zu mikrooptischen Mehrkanalscheinwerfern mit vergrabenen Blenden.

A projecting blinker module (Fig. 1), for example, is realized in only $35 \times 35 \times 55 \text{ mm}^3$ and generates an illuminance of over 7 klux on the road with an electrical input power of only 3.3 W. Combining the high illuminance with a dynamic chaser effect¹ improves the projection's visibility even under daylight conditions. In a low beam module of $60 \times 20 \times 35 \text{ mm}^3$, differently shaped condenser lenslets form a sharp cut-off line at the top and a continuous brightness gradient at the bottom.³ The complete low-beam headlamp consists of four modules, which create a UN-ECE compliant pattern of over 42 kcd maximum intensity at 20 W electrical input power.

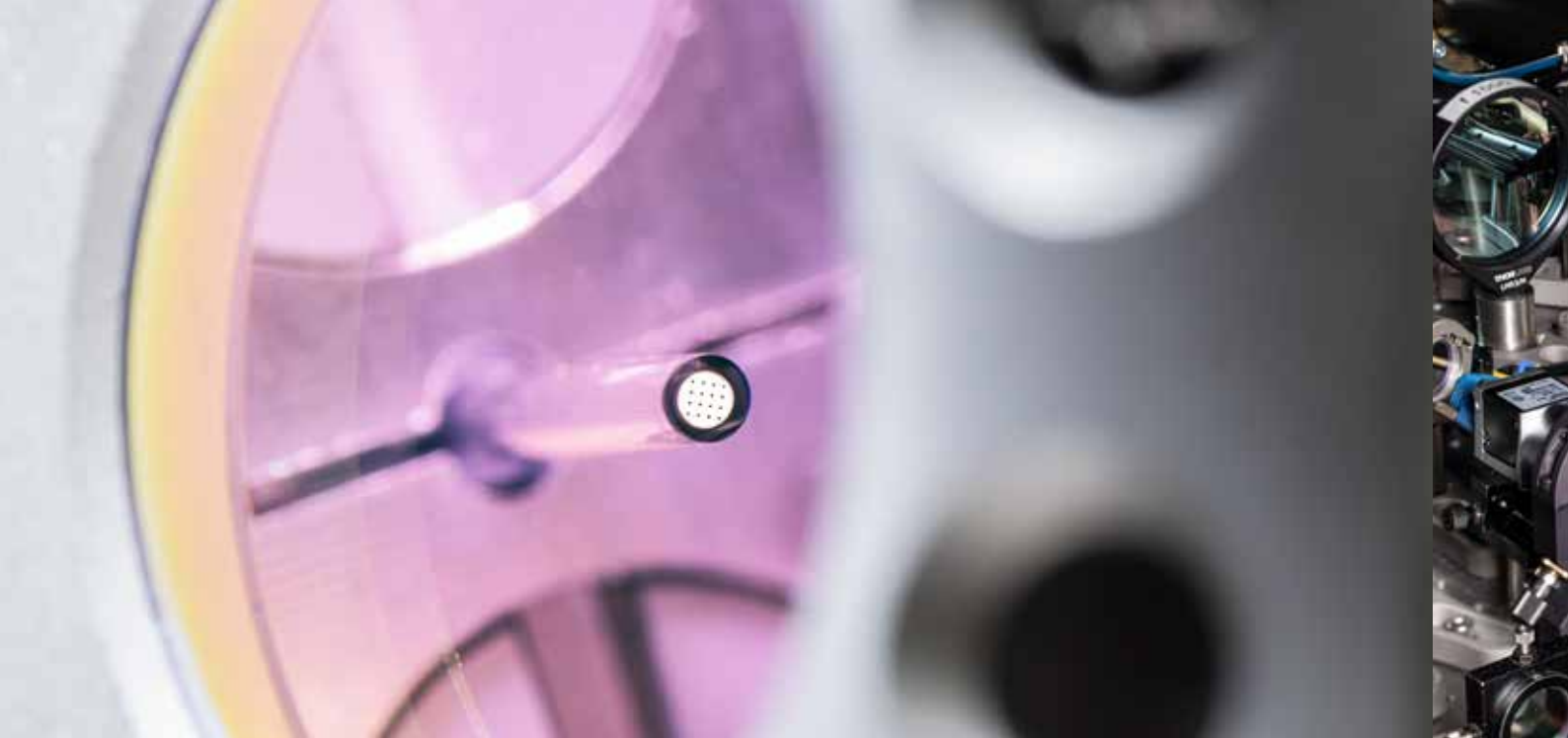
The high transmission of 70 %, the new artistic design freedom and possible cost savings through injection molding make this design an attractive alternative to both traditional single aperture and micro-optical multi-channel headlamps with buried apertures.



[3] Gemessenes Fernfeld des mikro-optischen Abblendlichts. / Measured farfield of the micro-optical low beam.

References / Literatur

- 1 R. Kundu et al., »Multi-aperture pattern projection using arbitrary shaped microlenslets«, SPIE 12666-8, 2023.
- 2 P. Schreiber et al., »Light Shaping with Micro-optical Irregular Fly's Eye Condensers«, SPIE 12078-13, IODC 2021.
- 3 D. Stefanidi et al., »Maskless irregular double-sided microlens arrays for auto-motive headlights«, Int. Symp. Automotive Lighting, Darmstadt, ISAL 2023.



[1] In Faserverstärker integrierte polarisationserhaltende 4x4 Multikernfaser / Polarization-maintaining 4x4 multicore fiber integrated in a fiber amplifier

Polarisationserhaltende Mehrkernfasern

Die parallele Verstärkung ultrakurzer Laserpulse in optischen Mehrkern-Fasern hat in den letzten Jahren zu einer bemerkenswerten Leistungssteigerung geführt. Theoretische¹ und experimentelle^{2,3} Ergebnisse zeigen ein vielversprechendes Skalierungspotenzial für Durchschnittsleistung und Pulsenergie, wobei Durchschnittsleistungen von mehreren Kilowatt und Femtosekundenpulse mit Energien von einigen 100 mJ in Reichweite sind. Die Anzahl der Komponenten eines Mehrkern-Faser-Aufbaus kann gegenüber separaten Einzelkernverstärkern massiv reduziert werden, was zu einer kompakteren Baugröße, geringerer Komplexität und niedrigeren Systemkosten führt.

Die meisten der bisher vorgestellten Mehrkern-Fasern sind nicht polarisationserhaltend. Für Systeme, die eine definierte Polarisation erfordern, ist das problematisch. Bisher wurden polarisationserhaltende (PM) Mehrkern-Fasern durch spannungsinduzierende Elemente zwischen den einzelnen Kernen realisiert,⁴ was jedoch die Freiheit der Kernpositionierung in der Faser einschränkt und in den meisten Fällen die Pumplichtabsorption verringert.

Diese Nachteile konnten in einem neu entwickelten Faserdesign ausgeräumt werden. In unserem Design werden in einem quadratischen 7x7 Mehrkern-Faserdesign die äußeren Kernreihen durch Spannung induzierende Elemente ersetzt. Die Positionierung der verbleibenden 5x7 laser-aktiv dotierten Kerne bleibt flexibel und die Pumplichtabsorption wird nur minimal beeinflusst. Ein Mikroskopbild einer im Fasertechnologiezentrum

Polarization-Maintaining Multicore Fibers

In recent years, the parallelization of the amplification of ultra-short laser pulses in multicore optical fibers has led to a remarkable increase in performance. Theoretical¹ and experimental^{2,3} results have already shown promising scaling potential for average power and pulse energy, with average powers of several kilowatts and femtosecond pulses with energies of several 100 mJ within reach. Compared to using multiple separate single-core amplifiers, the number of components in a multicore fiber setup can be massively reduced, resulting in a more compact size, lower complexity and reduced system costs.

Most of the multi-core fibers presented to date are not polarization-maintaining (PM). This is problematic for systems that require a defined polarization. Previous PM multicore fibers have been realized by placing stress-inducing elements between the individual cores,⁴ but this restricts the freedom of core positioning in the fiber and in most cases reduces pump light absorption.

These disadvantages could be eliminated in a newly developed fiber design. In our design, the outer rows of cores in a square 7x7 multi-core fiber design are replaced by stress applying parts. The flexibility of the positioning of the remaining 5x7 laser-actively doped cores is maintained and the pump light absorption is only minimally affected. A microscope image of a polarization-maintaining multicore fiber with this advantageous design realized at the Fiber Technology Centre is shown in Figure 3.



[2] Kompaktes Labor-Setup mit integrierten Multikernfasern /
Compact lab setup with integrated multicore fibers

Authors

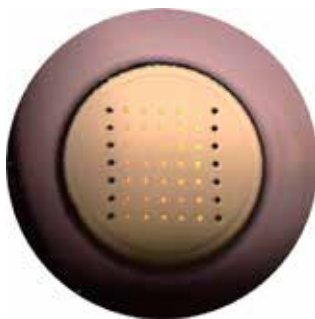
Dr. Nicoletta Haarlammert
Dr. Johannes Nold
Dr. Arno Klenke
Dr. Cesar Jauregui
Dr. Thomas Schreiber

Contact

Dr. Nicoletta Haarlammert
Phone +49 3641 807-334
nicoletta.haarlammert@
iof.fraunhofer.de

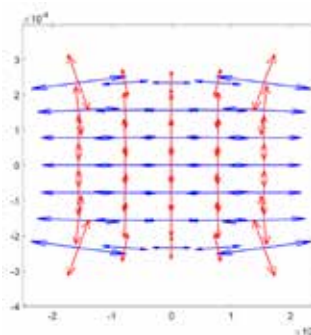
realisierten, polarisationserhaltenden Mehrkernfaser mit diesem vorteilhaften Design ist in Abbildung 3 zu sehen.

Unsere theoretischen Berechnungen der induzierten Doppelbrechung und der Polarisationsachse sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Simulation sagt eine einheitliche Orientierung der Polarisations-Achse für die Kerne in der Mitte der Faser voraus. Geringe Abweichungen der Achsenorientierung ist für die Eckkerne zu erkennen. Insgesamt werden die Polarisations-eigenschaften im Vergleich zu einer 7×7-Kernfaser ohne die Spannungs-induzierenden Elemente deutlich verbessert. Dies konnte auch experimentell bestätigt werden. An weiteren Verbesserungen des Faserdesigns zur verbesserten Orientierung der Polarisationsachsen insbesondere für die Kerne in den Ecken wird aktuell gearbeitet.



[3] Mikroskop Bild
der Endfläche einer
polarisationserhaltenden
Mehrkernfaser mit 5x7-laser
aktiv dotierten Kernen. /
Microscope image of the
end face of a polarization-
maintaining multicore
fiber with 5x7-laser
actively doped cores.

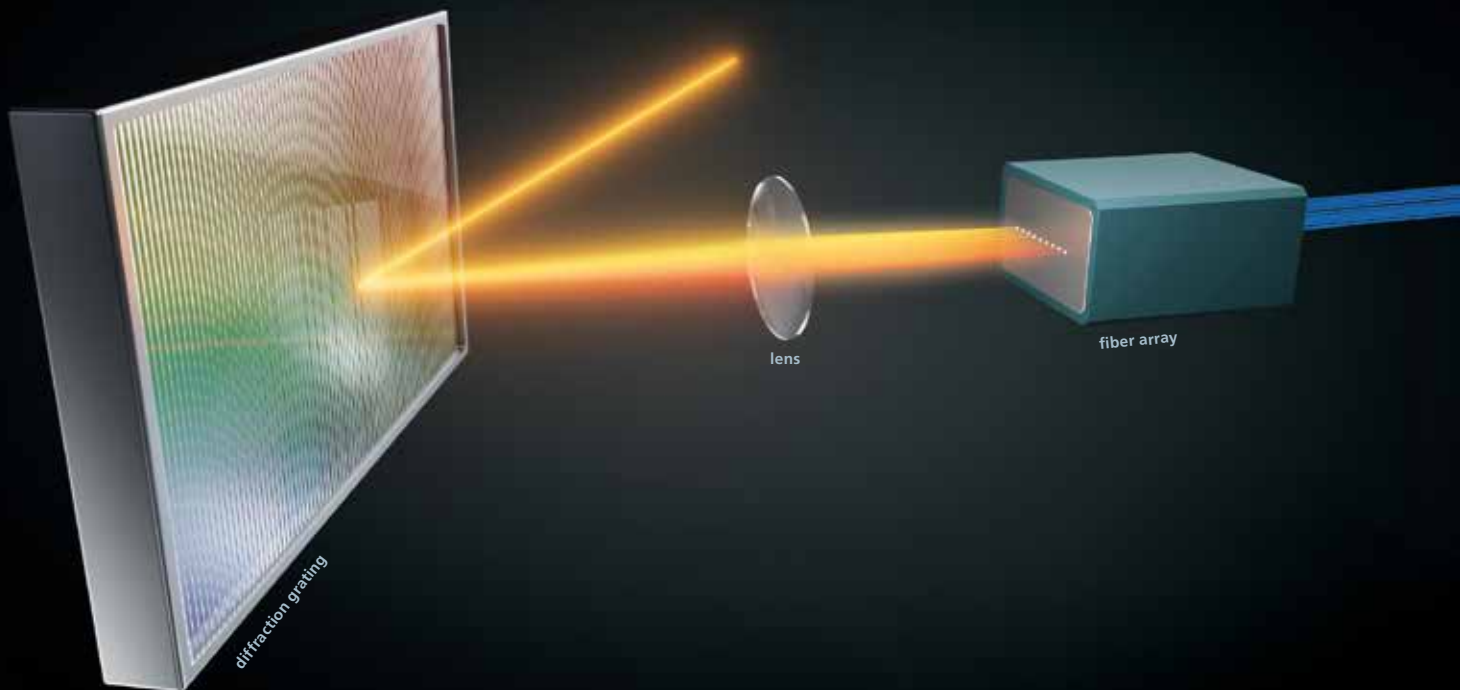
Our theoretical calculations of the induced birefringence and the polarization axis are shown in Figure 4. The simulation predicts a uniform orientation of the polarization axis for the cores in the center of the fiber. Slight deviations in the axis orientation can be seen for the corner cores. Overall, a significant improvement in the polarization properties can be achieved compared to a 7×7 core fiber without the stress applying parts. This was also confirmed experimentally. Work is currently underway on further improvements to the fiber design to improve the orientation of the polarization axes, particularly for the cores in the corners.



[4] Simulation der Ausrichtung
und Stärke der Polarisations-
achsen (blau: langsame Achse,
rot: schnelle Achse), die in
den Kernen durch die Stress-
induzierenden Elemente
induziert werden. / Simulation
of the orientation and
strength of the polarization
axes (blue: slow axis, red: fast
axis) induced in the cores by
the stress applying parts.

References / Literatur

- 1 A. Steinkopff, C. Jauregui, C. Aleshire, A. Klenke, and J. Limpert, Opt. Express 28, 38093 (2020).
- 2 L. P. Ramirez, et al., Opt. Express 23, 5406–5416 (2015).
- 3 A. Klenke, et al., Opt. Lett. 47, 345 (2022).
- 4 F. Prevost, L. Lombard, J. Primot, L. P. Ramirez, L. Bigot, G. Bouwmans, and M. Hanna, Opt. Express 25, 9528–9534 (2017).



[1] Design eines Multiplexers mit einem Beugungsgitter (linke Seite) am Ausgang und einem Faserarray (rechte Seite) am Eingang. / Design of an optical multiplexer using a diffraction grating (left side) and a fiber array as an input (right side).

Weltraumtauglicher Hochleistungsmultiplexer bei 1 μm Wellenlänge

Der weltweite Bedarf an schneller Datenübertragung wächst seit Jahren exponentiell. Um diese Nachfrage zu befriedigen, sollen Satelliten und Satellitenetze eingesetzt werden, die ihrerseits über optische Verbindungen untereinander und mit Bodenstationen kommunizieren. Verglichen mit Radiowellen bieten optische Verbindungen höhere Bandbreiten und ermöglichen effizientere Übertragungen. Aufgrund der großen Distanzen werden jedoch deutlich höhere Laserleistungen benötigt als sie in der terrestrischen, glasfasergebundenen Kommunikation üblich sind. Aus der Telekommunikation bekannte Systembausteine müssen daher neu entwickelt werden, damit sie sowohl für hohe optische Leistungen als auch für den Einsatz im Weltraum geeignet sind.

Am Fraunhofer IOF wurde 2022/2023 gemeinsam mit der europäischen Weltraumagentur ESA ein weltraumtauglicher Multiplexer, also ein Bauteil zur Kombination verschiedener Wellenlängenkanäle, für bis zu 100 W Gesamtlaserleistung entwickelt. Die Laserleistung der Einzelkanäle kann dabei jeweils bis zu 10 W betragen. Parallel wurde für die Empfängerseite ein entsprechender Demultiplexer realisiert.

Beide Geräte (Abb. 1) basieren auf dem Prinzip spektraler Kombination durch Beugungsgitter¹, welches am Fraunhofer

High Power Wavelength Multiplexer in the 1 μm Spectral Region for Space Application

The global demand for fast data transmission has been growing exponentially for years. To meet this demand, satellites and networks of satellites are to be used, which in turn communicate with each other and with ground stations via optical connections. Compared to radio waves, optical connections offer higher bandwidths and enable more efficient transmission. However, due to the long distances involved, significantly higher laser power is required than is used in terrestrial, fiber-optic communication. System components known from telecommunications must therefore be redeveloped so that they are suitable both for high optical power and for use in space.

In 2022/2023, Fraunhofer IOF collaborated with the European Space Agency ESA to develop a space-qualified multiplexer, i.e. a component for combining different wavelength channels, for up to 100 W total laser power. The laser power of the individual channels can be up to 10 W each. At the same time, a corresponding de-multiplexer was realized for the receiver side.

Both devices (Fig. 1) are based on the principle of spectral combination by diffraction gratings¹, which has been established at the Fraunhofer IOF for high laser powers², and use optical fibers as input and output for the spectrally separated channels. The combined signal is also fed through an optical



[2] Wellenlängenmultiplexer (links) und De-Multiplexer (rechts) mit Anschlussfasern. / Wavelength multiplexer (left) and de-multiplexer (right), including input fibers.

Authors

Dr. Till Walbaum
Marco Plötner
Dr. Thomas Schreiber

Contact

Dr. Till Walbaum
Phone +49 3641 807-705
till.walbaum@iof.fraunhofer.de

IOF für hohe Laserleistungen etabliert ist², und verwenden für die spektral getrennten Kanäle Glasfasern als Ein- und Ausgang. Das kombinierte Signal wird im Demultiplexer ebenfalls durch eine Glasfaser zugeführt, wohingegen es im Multiplexer als freier Strahl direkt in eine Sendeapertur überführt werden kann. Entsprechend basiert der Multiplexer auf einem hochleistungstauglichen Transmissionsgitter, das von einem fokussierten Bündel einzeln kollimierter Strahlen beleuchtet wird. Das Prinzip ist in Abbildung 2 dargestellt. Die zehn Eingangsstrahlen haben unterschiedliche Wellenlängen (optischer Frequenzabstand 100 GHz), die Zentralwellenlänge liegt bei 1064 nm. Eine gemeinsame Linse kollimiert die parallelen Einzelstrahlen individuell und lenkt sie zugleich auf den gleichen Punkt auf dem Transmissionsgitter, wo sie aufgrund der spektral abhängigen Beugungswinkel zu einem gemeinsamen Ausgangsstrahl kombiniert werden.

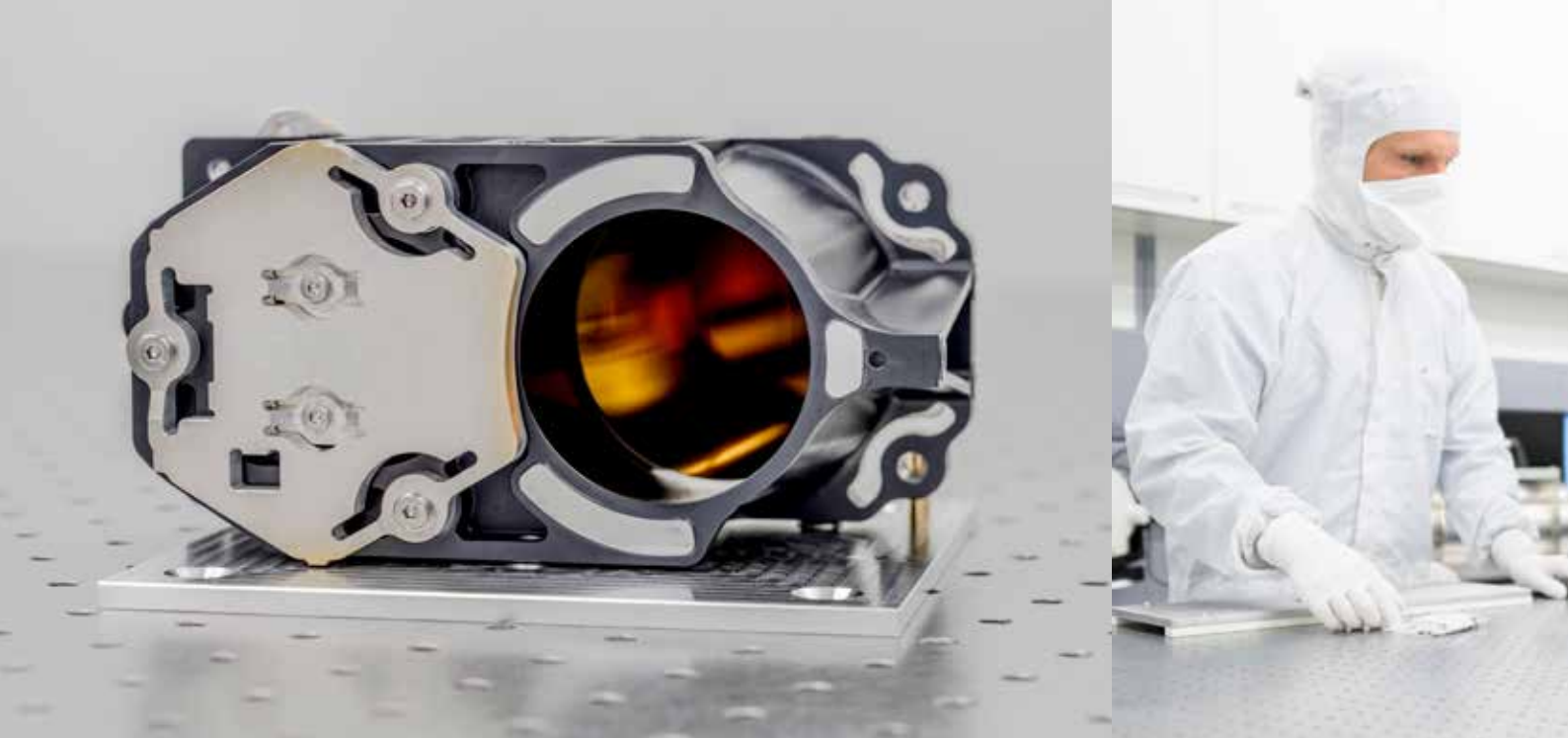
Das Gesamtsystem ist dank seiner geringen Größe ($300 \times 90 \times 90 \text{ mm}^3$) und Masse ($< 2 \text{ kg}$) zum Satelliteneinbau geeignet. Die erforderliche Temperaturstabilität (Betriebsbereich -5°C bis $+45^\circ\text{C}$) wurde durch Fertigung aus Invar und weltraumerprobte Verbindungstechniken erreicht. Je nach Bandbreite der Einzelkanäle kann eine Strahlqualität nahe dem Beugungslimit erreicht werden.

fiber in the demultiplexer, whereas in the multiplexer it can be transferred as a free beam directly into a transmission aperture. Accordingly, the multiplexer is based on a high-power transmission grating, which is illuminated by a focused bundle of individually collimated beams. The principle is shown in Figure 2. The ten input beams have different central wavelengths (optical frequency spacing 100 GHz), with the spectral region centered around 1064 nm (powerful and efficient laser systems are available in this range). A shared lens collimates the parallel single beams individually and at the same time directs them all to the same point on the transmission grating, where they are combined into a single output beam due to the spectrally dependent diffraction angles.

The overall system is suitable for satellite installation due to its small size ($300 \times 90 \times 90 \text{ mm}^3$) and mass ($< 2 \text{ kg}$). The required temperature stability (operating range -5°C to $+45^\circ\text{C}$) was taken into account by manufacturing from Invar and space-proven connection techniques. Depending on the bandwidth of the individual channels, a beam quality close to the diffraction limit can be achieved.

References / Literatur

- 1 P. Madasamy, T. Loftus, A. Thomas, P. Jones, E. Honea, »Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems,« Proc. SPIE 6952, Laser Source Technology for Defense and Security IV, 695207 (3 April 2008).
- 2 M. Strecker et al., »Highly efficient dual-grating 3-channel spectral beam combining of narrow-linewidth monolithic cw Yb-doped fiber amplifiers up to 5.5 kW,« Proc. SPIE 10897, Fiber Lasers XVI: Technology and Systems, 108970E (7 March 2019).



[1] Das von Forschenden in Jena und Freiburg entwickelte Spiegelteleskop soll künftig den Wasserkreislauf der Erde vermessen. / The mirror telescope developed by researchers in Jena and Freiburg is intended to measure the Earth's water cycle in future.

Satellitentechnologie ermöglicht nachhaltigen Wassereinsatz

In Zeiten des Klimawandels ist Wasser eine zunehmend wertvolle Ressource. Wer den Wasserbedarf von Pflanzen in der Landwirtschaft messen kann, kann auch den Wasserverbrauch regeln. Genau das ermöglicht eine neuartige Kamertechnologie, die schon auf der Internationalen Raumstation ISS erprobt wurde. Daten solcher Kamerasysteme sollen es künftig ermöglichen, Pflanzen bedarfsgerecht zu bewässern und einen nachhaltigen Umgang mit der lebenswichtigen Ressource sicherzustellen.

Im Mai 2023 wurde mit dem Fraunhofer-Preis »Technik für den Menschen und seine Umwelt« die Arbeit des Entwicklungsteams des Fraunhofer-Instituts für Kurzzeiddynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI und des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF sowie der beiden Ausgründungen constellr GmbH und SPACEOPTIX GmbH gewürdigt. Im Zentrum der Technologie steht die Infrarotkamera LisR, was für »Longwave infrared sensing demonstrator« steht. Dank spezieller Freiform-Optiken ist LisR extrem miniaturisiert. Gleichzeitig ist ihre Auflösung am Boden 150-fach höher als bei aktuellen kommerziellen Großsatelliten. Außerdem wurde ein athermales Design angewandt, was die Optik unabhängig von der Temperatur stabil funktionieren lässt.

LisR kam im Februar 2022 mit dem Raumfrachter Cygnus zur Internationalen Raumstation ISS. Mit Thermalinfrarotbildern

Satellite Technology Enables Sustainable Use of Water

Water is an increasingly valuable resource. If you can measure the water requirements of plants in agriculture, you can also regulate water consumption. This is exactly what a new type of camera technology facilitates. A prototype has already been tested on the International Space Station (ISS). With the data from such camera systems, it should be possible to irrigate plants as needed and ensure the sustainable use of this vital resource.

On May 25, 2023, a team of researchers from the Fraunhofer Institute for High-Speed Dynamics, Ernst-Mach-Institut, EMI and the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF as well as the two spin-offs constellr GmbH and SPACEOPTIX GmbH received the Fraunhofer Prize "Technology for People and their Environment" for the development of this technology. At the heart of the technology is the infrared camera LisR, which stands for "Longwave infrared sensing demonstrator". Thanks to special free-form optics, LisR is extremely miniaturized. At the same time, its resolution on the ground is 150 times higher than that of current large commercial satellites. In addition, an athermal design was used, which allows a stable function of the optics regardless of the temperature.

LisR arrived at the International Space Station (ISS) on board the Cygnus spacecraft in February 2022. Thermal infrared



Authors

Dr. Henrik von Lukowicz
Dr. Thomas Peschel
Lucas Zettlitzer
Eric Schmucker
Dr. Stefan Risse

Contact

Dr. Henrik von Lukowicz
Phone +49 3641 807-396
henrik.von.lukowicz
@iof.fraunhofer.de

[2] Mit ihren Teams sie haben gemeinsam das neue Teleskop entwickelt (v. l. n. r.): Dr. Henrik von Lukowicz (Fraunhofer IOF), Dipl.-Ing. Marius Bierdel (constellr) und Dr. Matthias Beier (SPACEOPTIX). / Together with their teams they developed the new telescope (from left to right): Dr. Henrik von Lukowicz (Fraunhofer IOF), Dipl.-Ing. Marius Bierdel (constellr) and Dr. Matthias Beier (SPACEOPTIX)

von LisR wurde die Oberflächentemperatur sowie der Wasserhaushalt von Pflanzen erfasst. Zukünftig kann mit solchen Messungen innerhalb von 24 Stunden an jedem Punkt der Erde die Oberflächentemperatur sowie der Trockenstand bestimmt werden.

Etwa so groß wie ein Schuhkarton, ermöglicht LisR deutlich kostengünstigere Missionen. Bisherige Satellitensysteme zur Überwachung der Oberflächentemperatur der Erde kamen eher in Bus-Größe und kosteten mehrere zehn oder gar hundert Millionen Euro pro Mission. Die neue Technologie kann mit Mikrosatelliten für einen Bruchteil der Kosten realisiert werden. Auf diese Weise wird auch ein Netz aus Kleinsatelliten möglich, dass ein weltweites Monitoring des Temperatur- und Wasserhaushaltes erlaubt.

LisR leistet einen wichtigen Beitrag zur effizienten und nachhaltigen Gestaltung der Landwirtschaft der Zukunft. Gefördert wurde die Entwicklung vom »Digital Innovation Hub Photonics« am Leistungszentrum Photonik in Jena, einer Initiative zur Förderung von Gründungsvorhaben im Bereich Optik und Photonik, getragen vom Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft.

images from LisR were used to record the surface temperature and water balance of plants. In future, it will be possible to use such measurements to determine the surface temperature and dryness at any point on Earth within 24 hours.

About the size of a shoebox, LisR enables significantly more cost-effective missions. Previous satellite systems for monitoring the Earth's surface temperature tended to be the size of a bus and cost tens or even hundreds of millions of euros per mission. The new technology can be realized with microsatellites for a fraction of the cost. In this way, a network of small satellites becomes possible, allowing to monitor temperature and water balance over wide areas.

LisR makes an important contribution to the efficient and sustainable design of the agriculture of the future. The development was funded by the "Digital Innovation Hub Photonics" at the Photonics Performance Center in Jena, an initiative to promote start-up projects in the field of optics and photonics, supported by the Thuringian Ministry of Economic Affairs, Science and Digital Society.

References / Literatur

- 1 T. Peschel, H. von Lukowicz, et al., »Miniature three-mirror telescope for the thermal infrared«, Int. Conf. on Space Optics ICSO 2022; 127772Y (2023) <https://doi.org/10.1117/12.2690313>
- 2 L. Zettlitzer, H. von Lukowicz, et al., »Design and fabrication of a miniaturized metallic telescope for earth observation.« Proceedings of The 45 Symposium. 2022.



[1] Der Metallspiegel im GALA-Instrument wurde für niedriges Gewicht und höchste Präzision optimiert. / The metal mirror in the GALA instrument has been optimized for low weight and maximum precision.

Laser-Instrument erforscht Jupiters Eis-Monde

Im April 2023 startete die ESA die Mission JUICE zur Erkundung des Jupiters und seiner eisbedeckten Monde. Mit an Bord der Raumsonde ist das Messinstrument GALA. Mit Hilfe von Laserpulsen soll es die Oberfläche des erdähnlichen Mondes Ganymed präzise vermessen.

Entwickelt wurde das Instrument von Forschenden des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena gemeinsam mit der Firma HENSOLDT Optronics. Die Projektleitung lag beim DLR-Institut für Planetenforschung. Neben HENSOLDT Optronics GmbH aus Oberkochen in Baden-Württemberg und dem Fraunhofer IOF aus Thüringen waren weitere Partner aus Deutschland, aber auch Japan, der Schweiz und Spanien beteiligt.

Die Mission JUICE versucht, eine der grundlegenden Fragen der Menschheit zu beantworten: Ist Leben außerhalb der Erde möglich? Dafür fliegt die Sonde JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) acht Jahre durch das Weltall zum Jupiter. In der Zeit müssen die Instrumente an Bord Temperaturen zwischen -50 °C und $+150\text{ °C}$ sowie starke kosmische Strahlung überstehen. Die Beschleunigungen beim Raketenstart gehen bis zum 120-fachen der Erdbeschleunigung. Den Eintritt in den Orbit um Ganymed erwartet die ESA für Dezember 2034. In etwa einer Milliarde Kilometer Entfernung von der Erde soll dann GALA, das Ganymed Laser Altimeter, die Oberfläche

Laser Instrument Measures Jupiter's Icy Moons

In April 2023, ESA launched the JUICE mission to explore Jupiter and its ice-covered moons. On board the spacecraft is the GALA measuring instrument. It will use laser pulses to precisely measure the surface of the Earth-like moon Ganymede.

The instrument was developed by researchers at the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF in Jena together with the company HENSOLDT Optronics. The project was managed by the DLR Institute of Planetary Research. In addition to HENSOLDT Optronics GmbH from Oberkochen in Baden-Württemberg and the Fraunhofer IOF from Thuringia, other partners from Germany, Japan, Switzerland, and Spain were also involved.

The JUICE mission is attempting to answer one of the fundamental questions of mankind: Is life beyond Earth possible? To this end, the JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) spacecraft will fly to Jupiter for eight years. During this time, the instruments on board will have to withstand temperatures between -50 °C and $+150\text{ °C}$ as well as strong cosmic radiation. The accelerations during the launch are up to 120 times of earth's gravity. ESA expects to enter orbit around Ganymede in December 2034, when GALA, the Ganymede Laser Altimeter, will measure the surface of the icy moon to an accuracy of 10 cm from a 500 km high orbit. This is achieved with high-precision metal optics in the GALA telescope. Its mirror is extremely

[2] Das GALA-Empfangsteleskop montiert auf der Optischen Bank. / The GALA receiver telescope mounted at the optical bench.

Authors

Dr. Henrik von Lukowicz
Dr. Stefan Risse
Sandra Müller
Mathias Rohde
Robert Jende

Contact

Dr. Henrik von Lukowicz
Phone +49 3641 807-396
henrik.von.lukowicz
@iof.fraunhofer.de

des eisigen Mondes aus 500 km Höhe auf 10 cm genau vermessen. Erreicht wird das mit einer hochgenauen Metalloptik im GALA-Teleskop. Es ist gleichzeitig extrem leicht und sehr präzise. Der Spiegel hat einen Durchmesser von etwa 300 mm und nur 4 mm Wandstärke. 90 % des einfallenden Lichtes werden auf nur 38 μm fokussiert. Dieses Instrument ist das weltweit erste Deep-Space Altimeter. Da Signale von der Erde etwa 1,5 h zur Sonde brauchen, wird sie weitgehend autonom arbeiten. Das Ende der Mission wird für 2035 erwartet, die Sonde wird dann auf Ganymed einschlagen.

Für die wissenschaftliche und unternehmerische Partnerschaft speziell zwischen der Firma HENSOLDT und dem Fraunhofer IOF wurden die beteiligten Teammitglieder im November 2021 mit dem Lothar-Späth-Award ausgezeichnet. Die Lothar-Späth-Stiftung verleiht die Auszeichnung an kooperativ entstandene, herausragende Innovationen bei Produkten, Verfahren und Dienstleistungen in Baden-Württemberg und Thüringen.

light and yet very precise. It has a diameter of around 300 mm and a wall thickness of just 4 mm. 90 % of the incident light is focused to just 38 μm . GALA is the world's first deep-space altimeter working at about 1 billion kilometers away from us. As signals from Earth take around 1.5 hours to reach the spacecraft, it will operate largely autonomously. The mission is expected to end in 2035, when the probe will impact on Ganymede.

In November 2021, the team members involved received the Lothar Späth Award for the scientific and entrepreneurial partnership between HENSOLDT and the Fraunhofer IOF in particular. The Lothar Späth Foundation presents the award to outstanding innovations in products, processes and services in Baden-Württemberg and Thuringia that are the result of cooperation.

References / Literatur

- 1 H. von Lukowicz, J. Hartung, et al., »Development and manufacturing of the receiver telescope for the Ganymede Laser Altimeter (GALA)«; SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation; 2022
- 2 F. Luedicke, H. Hussmann, et al., »The Ganymede Laser Altimeter (GALA) on ESA's JUICE mission: Overview of the instrument design«; Europlanet Science Congress 2020
- 3 K. Enya, M. Kobayashi, et al., »The Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE): Mission, science, and instrumentation of its receiver modules«, Adv. Space Research, 69 (5) 2283–2304, 2022



[1] Das neue Beschichtungssystem kombiniert beschlagmindernde und antireflektierende Eigenschaften. / The new coating system combines anti-fogging and anti-reflective properties.

Funktionelle Beschichtung verhindert Beschlagen und Reflexionen

Optiken, die nicht beschlagen und dabei über einen großen Wellenlängenbereich hinweg kaum reflektieren – das ist mit einem am Fraunhofer IOF neu entwickelten Schichtsystem möglich. Diese innovative Lösung trägt dazu bei, die optische Performance von z. B. Optiken in LiDAR-Systemen in Hinblick auf künftiges autonomes Fahren oder kalten LED-Beleuchtungsoptiken zu verbessern. Dies ist besonders wichtig, da es hier vor allem bei extremen Temperaturunterschieden zwischen der Umgebung und dem Messsystem zum Beschlagen von optischen Oberflächen kommen kann, was wiederum zu einer Herabsetzung des Kontrastes führt.

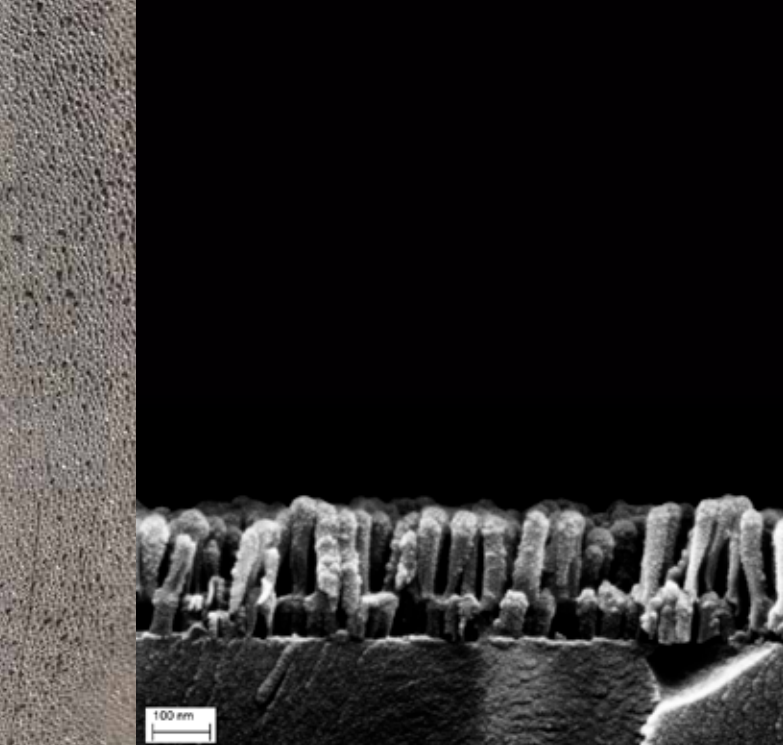
Die Grundlage für das neue Schichtsystem bildet die am Fraunhofer IOF entwickelte AR-plas2-Technologie. Mit dieser Technologie können Nanostrukturen aus Siliziumdioxid hergestellt werden, die eine genau definierte Größe und Brechzahl besitzen. Die Strukturen sind wasseranziehend, also hydrophil und bieten auch ein gewisses Volumen zur reversiblen Wasseraufnahme. Zwei dieser Strukturen werden so aufeinander gestapelt, dass ein Brechzahlgradient entsteht und die Reflexion im Spektralbereich der Anwendung nahezu vollständig verschwindet. Ein solches Schichtsystem wurde bereits für ein Lidar-Projekt entwickelt, welches eine Restreflexion von unter 0,1 % für eine Laserwellenlänge von 1064 nm erreichte.^{1,2} Das System lässt sich aber auch für jede andere Wellenlänge vom UV- bis zum NIR-Bereich auslegen.

Functional Coating Prevents Fogging and Unwanted Reflections

Optics that remain unfogged and at the same time minimally reflect over a broad wavelength range — this is possible with a new coating system developed at Fraunhofer IOF. This innovative solution helps to improve the optical performance of, for example, optics in LiDAR systems addressing future autonomous driving or cold LED lighting optics. This is particularly crucial as extreme temperature differences between the environment and the measuring system can cause optical surfaces to fog up, resulting in reduced contrast.

The basis for the new layer system is the AR-plas2 technology developed at Fraunhofer IOF. This technology enables the production of nanostructures made from silicon dioxide with precise size and refractive index control. These structures are attracted to water, i.e. hydrophilic, and offer a unique volume for reversible water absorption. By stacking two of these structures on top of each other, we can create a refractive index gradient that eliminates nearly all reflections in the spectral range of the application. Such a coating system has already been developed for a lidar project, which achieved a residual reflection of less than 0.1 % for a laser wavelength of 1064 nm.^{1,2} However, the system can also be designed for any other wavelength from the UV to the NIR range.

A big advantage of the technology is that the nanostructures can be applied independently of the substrate material or



Funktionelle Beschichtung verhindert Beschlagen und Reflexionen Functional Coating Prevents Fogging and Unwanted Reflections

[2] Bei diesem Verfahren wurden zwei Nanostrukturen übereinanderstehend hergestellt. / In this process, two nanostructures were manufactured on top of each other.

Authors

Anne Gärtner
Dr. Ulrike Schulz
Friedrich Rickelt
Dr. Astrid Bingel
Sabrina Wolleb

Contact

Dr. Astrid Bingel
Phone +49 3641 807-279
anne.gaertner@iof.fraunhofer.de

Ein großer Vorteil der Technologie ist, dass die Nanostrukturen unabhängig vom Substratmaterial aufgebracht oder mit Interferenzschichten kombiniert werden können. Dadurch kann man noch breitbandigere optische Antireflexsysteme entwickeln, die selbst unter hohen Lichteinfallswinkeln eine gute Antireflexwirkung zeigen. Im Rahmen diverser Projekte wird das AR-plas2 System gegenwärtig für verschiedene Anwendungen auf Glas, Quarz und Kunststoff optimiert. So werden beispielsweise im internen Fraunhofer SME-Projekt »KABO« diese Schichtsysteme für kalte Beleuchtungsoptiken optimiert.³

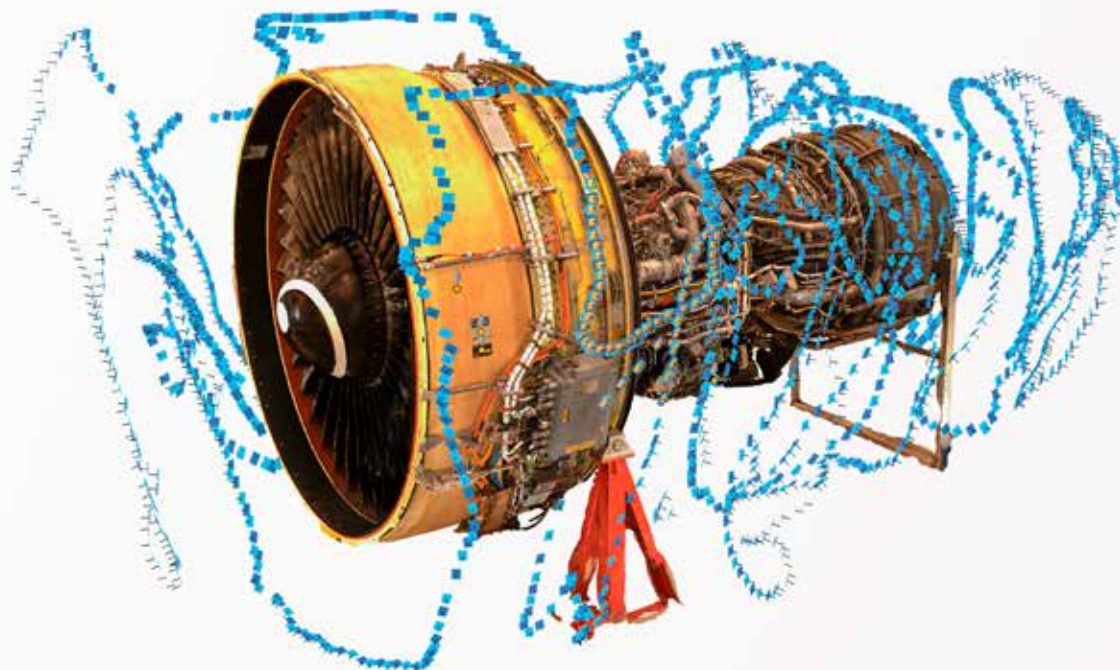
Mit der AR-plas2-Technologie können daher spezielle Anwendungen mit extremen Anforderungen hinsichtlich Restreflexion, Wellenlängen- und Winkelbereich, Polarisationsneutralität und Phasenerhaltung adressiert werden, für die es mit klassischen Schichtsystemen keine Lösung gibt.⁴ Das betrifft z. B. Antireflex-Beschichtungen im Quantum Computing oder auch im Astronomie Bereich. Da eine konventionelle Vakuumbeschichtungsanlage verwendet wird, wie sie bei der Beschichtung von Brillengläsern üblich ist, ist die Technologie kostengünstig und massenprodukttauglich. Ein großer Vorteil ist außerdem, dass die Herstellung von Nanostrukturen und die Kombination mit Interferenzschichtsystemen in einem Beschichtungsprozess erfolgt.

combined with interference layers. This allows even more broadband optical anti-reflective systems to be developed, ensuring excellent anti-reflective performance even at high angles of incidence. The AR-plas2 system is currently being optimized for different applications on glass, quartz and plastic as part of various projects. For example, these coating systems are being optimized for cold light optics in the Fraunhofer internal SME project "KABO".³

AR-plas2 technology can therefore be used to address special applications with extreme requirements in terms of residual reflection, wavelength and angle range, polarization neutrality and phase preservation, for which there is no solution with conventional coating systems.⁴ This applies, for example, to anti-reflective coatings in quantum computing or in the field of astronomy. By utilizing a conventional vacuum coating system, commonly used in the coating of spectacle lenses, the technology is cost-effective and suitable for mass production. One of the key advantages is that nanostructures are produced and combined with interference layer systems in one single coating process.

References / Literatur

- 1 A Gärtner, A. Sabbagh, U Schulz, F. Rickelt, A. Bingel, S. Wolleb, S. Schröder, A. Tünnermann, »Combined antifogging and antireflective double nanostructured coatings for LiDAR applications«, Applied Optics, 62, 7, 112–116 (2023)
- 2 <https://phys.org/news/2023-01-optical-coating-approach-fogging-unwanted.html>
- 3 Fraunhofer internes Forschungsprojekt »Schichten für kalte Beleuchtungsoptik«
- 4 U. Schulz, F. Rickelt, A. Gärtner, A. Bingel, »Broadband antireflection coatings with low polarization splitting« Applied Optics, 62, 7, B87-B91 (2023)



[1] Turbine mit Scanner-Trajektorie (blaue Linie). / Turbine with scanner-trajectory (blue line).

Mobile Erfassung von komplexen 3D-Strukturen

Viele industrielle Anwendungen erfordern eine genaue 3D-Erfassung von komplexen Objekten – möglichst mit einem einfachen mobilen Scanner. Die Anforderungen an Qualität und Vollständigkeit der Daten, wie auch an Handhabbarkeit und Aufnahmedauer des Aufnahmesystem stellen entsprechend hohe Anforderungen bei der Entwicklung eines neuen 3D-Scannersystems. Ein einfaches Anwendungsbeispiel ist die Wartung von Flugzeugtriebwerken, wo der Eingangs- und der Ausgangszustand dieser komplexen Objekte genau dokumentiert werden müssen. Bislang wurden dafür klassische Kompaktkameras genutzt, mit denen die Triebwerke nur unvollständig erfasst wurden. Eine ähnliche Aufgabe ergibt sich, wenn reale Objekte als »digitale Zwillinge« für die Erstellung virtueller 3D-Modelle erfasst werden sollen.

Mit dem goSCOUT3D hat ein Team am Fraunhofer IOF dafür einen tragbaren 3D-Scanner entwickelt, der eine unkomplizierte und anwenderfreundliche Lösung zur vollständigen 2D- und 3D-Digitalisierung bietet. Mit einer hochauflösenden 20-Megapixel-Farbkamera und einer Inertial-Messeinheit (IMU) arbeitet der Scanner nach dem fotogrammetrischen Messprinzip. Durch eine Reihe von Assistenztools wurde das System noch benutzerfreundlicher gemacht. Zur Steigerung der Aufnahmeeffizienz wird zum Beispiel die Scaneinheit live mit bisher aufgenommenen Daten verknüpft. Im 5,5" Scannerdisplay werden bereits gemessene Objektbereiche grün angezeigt – ausstehende Stellen sind dadurch schnell ersichtlich.

Hand-held Acquisition of Complex 3D Structures

Many industrial applications require precise 3D capture of complex objects — preferably with a simple mobile scanner. The requirements for the quality and completeness of the data, as well as the manageability and recording time of the recording system, are contradictory and place correspondingly high demands on the development of a new 3D scanner system.

A simple example of such an application is the maintenance of aircraft engines, where the initial and final condition of these complex objects must be precisely documented. Up to now, classic compact cameras have been used for this purpose, with which the engines were only incompletely recorded. A similar task arises when real objects are to be captured as "digital twins" for the creation of virtual 3D models.

With the goSCOUT3D, a team at Fraunhofer IOF has developed a portable 3D scanner that offers an uncomplicated and user-friendly solution for complete 2D and 3D digitization. With a high-resolution 20-megapixel color camera and an inertial measurement unit (IMU), the scanner works according to the photogrammetric measurement principle. The system has been made even more user-friendly with a range of assistance tools. For example, the scanning unit is linked live with previously recorded data to increase recording efficiency. In the 5.5" scanner display, object areas that have already been measured are shown in green — outstanding areas can therefore be quickly identified.



[2] Mobil und handlich: goSCOUT3D will die 3D-Vermessung künftig flexibler und einfacher gestalten. / Mobile and handy: goSCOUT3D makes 3D mapping more flexible and easier.

Authors

Dr. Christian Bräuer-Burchardt
Marc Preißler
Roland Ramm
Dr. Stefan Heist
Dr. Peter Kühmstedt

Contact

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

Ein weiteres Highlight des Messsystems ist die Möglichkeit, bei einer nachfolgenden Datenanalyse das automatisch erstellte 3D-Gesamtmodell detailgetreu zu visualisieren. Objektstellen von besonderem Interesse können durch virtuellen Knopfdruck in das 3D-Modell in unterschiedlichen Blickrichtungen in hoher Auflösung angezeigt werden. Diese Möglichkeit ermöglicht dem goSCOUT3D eine schnelle 360°-Rundumvermessung von großvolumigen Objekten wie Flugzeugtriebwerken, Fahrzeugen oder Innenräumen. Die Scangeschwindigkeiten liegen dabei bei bis zu 6 m² / min mit bis zu 120 Millionen Punkten pro Sekunde.

Das System wird 2023/24 bei einem Kunden im Bereich Luftfahrt Maintenance an das interne Enterprise-Content-Management-System angebunden. Der offizielle Roll-out des Verfahrens ist für Mitte 2024 geplant. Der goSCOUT3D-Handscanner bietet dem Anwender die Möglichkeit, die Oberfläche komplexer Objekte detailgenau in Farbe und Textur sowie geometrisch maßstabsgetreu zu erfassen. Die 3D-Modelle können in Bereichen wie der Qualitätssicherung oder der Digitalisierung genutzt werden, um komplexe Objekte zu analysieren, zu dokumentieren oder digital darzustellen.

Another highlight of the measuring system is the ability to visualize the automatically generated 3D overall model in detail during a subsequent data analysis. Object points of particular interest can be displayed in different viewing directions in high resolution by virtually pressing a button in the 3D model. This option enables the goSCOUT3D to perform a fast 360° all-round measurement of large-volume objects such as aircraft engines, vehicles or interiors. The scanning speed is up to 6 m² / min with up to 120 million points per second.

The system will be connected to the internal enterprise content management system of a customer in the aviation maintenance sector in 2023/24. The official roll-out of the process is planned for mid-2024. The goSCOUT3D handheld scanner enables users to capture the surface of complex objects in color and texture as well as geometrically true to scale. The 3D models can be used in areas such as quality assurance or digitization to analyse, document or digitally display complex objects.

References / Literatur

- 1 C. Bräuer-Burchardt et al., »Mobile 3D sensor for documenting maintenance processes of large complex structures«, Proc. 60th ISC, Engineering for a Changing World (2023).
- 2 C. Bräuer-Burchardt, M. Preißler, R. Ramm, S. Heist, P. Kühmstedt, G. Notni, »3D-Handscanner erfasst Form und Farbe zugleich«, Inspect Fachmagazin 1/2023, S. 48–49 (2023).
- 3 M. Preißler, R. Ramm, C. Bräuer-Burchardt, S. Heist, P. Kühmstedt, G. Notni, »3D-, Farb- und Texturerfassung komplexer Objekte mit einem photogrammetrischen Handscanner«, 124. DGaO-Jahrestagung (2023).



[1] Der vorläufige Entwurf von CubEniK zeigt, wie verschränkte Photonen simultan von einem Mikrosatelliten aus verteilt werden können. / The preliminary design of CubEniK shows how entangled photons can be distributed from a cubesat.

CubEniK: Sichere Quantenkommunikation über Kleinstsatelliten

Innerhalb der Quantentechnologien gehören die Systeme für die sichere Kommunikation, genauer gesagt für die Verteilung von Quantenschlüsseln (QKD), zu den technologisch reifsten Lösungen. Dabei werden Schlüssel aus den Eigenschaften einzelner Photonen generiert, die zwischen den Kommunikationspartnern übertragen werden. Die Reichweite derartiger Systeme ist begrenzt, mit faserbasierten Systemen können nur bis etwa 100 km überbrückt werden.

Eine alternative Lösung zur Quantenschlüsselverteilung über Strecken größer als 100 km basiert auf einem Satelliten, der verschränkte Photonen simultan an zwei Bodenstationen sendet. Ein Team unter Leitung des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena hat sich der Herausforderung gestellt, ein derartiges System auf einem Kleinsatelliten zu implementieren.

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz hat das Projektteam die Vorentwurfsphase des Projekts CubEniK abgeschlossen. Das Akronym steht für »**C**ubeSat Demonstration of **E**ntangled Photon **P**air **K**ey Distribution«.

Das CubEniK-Konsortium vereint zwei Ausgründungen von Fraunhofer, Quantum Optics Jena und SPACEOPTIX, die das Missionsdesign und die Teleskopoptik liefern. Ergänzt wurden sie durch das Zentrum für Telematik in Würzburg

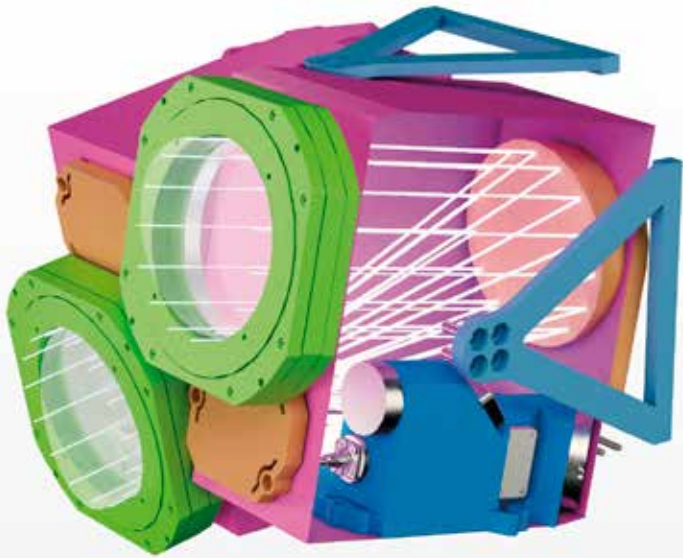
CubEniK: Secure Quantum Communication With Micro Satellites

Within quantum technologies, systems for secure communication, or more precisely for the quantum key distribution (QKD), are among the technologically most mature solutions. However, the reach of QKD solutions is limited. In this process keys are generated from the properties of individual photons which are transmitted between the communication partners. The range of such systems is limited — fiber-based systems can only bridge distances of up to around 100 km.

An alternative solution for quantum key distribution over distances greater than 100 km is based on a satellite that transmits entangled photons simultaneously to two ground stations. A team led by the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF in Jena has taken up the challenge to implement such a system on a small satellite.

Funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Protection, the project team has completed the preliminary design phase of the CubEniK project. The acronym stands for "**C**ubeSat Demonstration of **E**ntangled Photon **P**air **K**ey Distribution".

The CubEniK consortium brings together two Fraunhofer spin-offs, Quantum Optics Jena and SPACEOPTIX, which provide the mission design and telescope optics. They were complemented by the Center for Telematics in Würzburg



[2] Die optische Nutzlast: Teleskope (rosa), Grobausrichtungseinheit (grün), Feinausrichtungseinheit und Strahlenkombination (blau). / The optical payload: telescopes (pink), Coarse pointing assembly (green), Fine pointing assembly and beam combination (blue).

Authors

Daniel Heinig
Dr. Erik Beckert

Contact

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

ZfT (Demonstrator tests) und die Digos GmbH (Bodenstationen). Bodenstationen wurden in Jena und am DLR IKV in Oberpfaffenhofen geplant. Da die Missionsanforderungen im Projektverlauf angepasst werden mussten, befindet sich das Konsortium gerade auf der Suche nach neuen Partnern.

Das Fraunhofer-Team bringt seine Erfahrung in der Entwicklung optischer und elektronischer Systeme für Weltraumanwendungen sowie weltraumtauglicher, leistungsstarker verschränkter Photonenquellen mit Wiederholraten im GHz-Bereich ein.

Die »Optical Payload« ist das Herz des Satelliten. Sie enthält zwei Teleskope mit sogenannten Risley-Prismen für die Grobausrichtung und eine spezielle Box mit einem Kippspiegel für die Feinausrichtung des Photonenstrahls.

Das optische System kann so während eines Überflugs zwei Bodenstationen auf wenige Mikrorad genau anvisieren und Quantenschlüssel übertragen. Die »Optical Payload« ist mit einem Volumen von etwa 8 l das weltweit kleinste System dieser Art. Mit einem Gesamtvolumen von 16 U passt der Aufbau auf einen Mikrosatelliten. Trotzdem werden für diese Mission deutlich höhere Anforderungen an die Lageregelung sowie das Wärme- und Energiemanagement eingehalten als für eine normale Cubesat-Mission.

ZfT (demonstrator tests) and Digos GmbH (ground stations). Ground stations are envisaged in Jena and at the DLR IKV in Oberpfaffenhofen. As the mission requirements had to be adapted during the course of the project, the consortium is currently looking for new partners.

The Fraunhofer team is contributing its experience in the development of optical and electronic systems for space applications as well as space-qualified, powerful entangled photon sources with repetition rates in the GHz range.

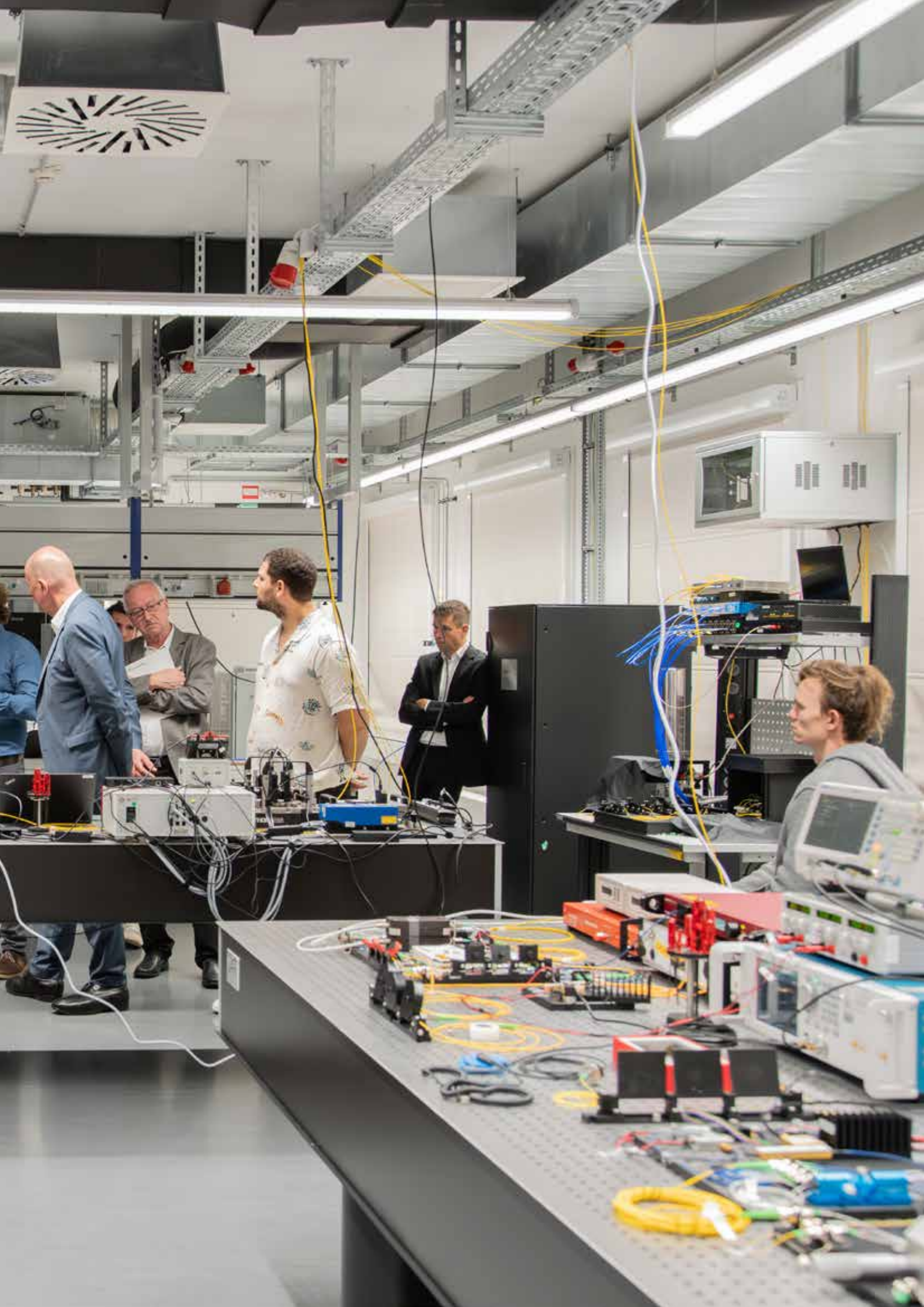
The "optical payload" is the heart of the satellite. It contains two telescopes with so-called Risley prisms for coarse pointing and a special fine pointing unit with a tilting mirror for precise control of the photon beam's direction.

The optical system can target two ground stations with an accuracy of a few microrads during an overflight and transmit quantum keys. With a volume of around 8 l, the "optical payload" is the smallest system of its kind in the world. With a total volume of 16 U, the structure fits on a microsatellite. Nevertheless, the requirements for position control and thermal and energy management for this mission are significantly higher than for a normal Cubesat mission.

References / Literatur

- 1 P. Krause, D. Heinig, M. Goy, M. Beier, M. Hornaff, »A compact pointing assembly for a CubeSat ...«, Proc. SPIE 12731, Environmental Effects on Light Propagation and Adaptive Systems VI, 127310K (2023); <https://doi.org/10.1117/12.2680268>
- 2 A. Krzic, D. Heinig, M. Goy, F. Steinlechner, »Dual-downlink quantum key distribution with entangled photons: prospects for daylight operation« Proc. SPIE 12777, ICSO 2022; 1277726 (2023) <https://doi.org/10.1117/12.2689971>

Weitere Jahreshighlights
Additional Highlights of the Year





Die Preistragenden des Awards mit Prof. Kaysser-Pyzalla (links), Prof. Andreas Tünnermann (zweite Reihe) und Dr. Katja Böhler (rechts). / The winners of the Award with Prof. Kaysser-Pyzalla (left), Prof. Andreas Tünnermann (second row) and Dr. Katja Böhler (right).

Applied Photonics Award 2023

Nachwuchspreis für innovative Abschlussarbeiten verliehen

Wie können Computer mithilfe von Licht noch leistungstärker werden bei gleichzeitig geringerem Energieverbrauch? Wie können wir in Zukunft winzige Mikrooptiken schneller und kostengünstiger herstellen? Und wie lassen sich Erkenntnisse aus der Nanooptik für die industrielle Nutzung von Quantensensoren anwenden? Diesen und weiteren

Applied Photonics Award 2023

Young Researcher Award for innovative theses awarded

How can computers become even more powerful with the help of light while consuming less energy? How can we produce tiny micro-optics faster and more cost-effectively in the future? And how can findings from nano-optics be applied to the industrial use of quantum sensors?

Zukunftsfragen widmen sich die Preistragenden des »Applied Photonics Awards« 2023. Der Nachwuchspreis wurde am 12. Oktober im Rahmen der »Photonics Days Jena« an die fünf Preistragenden 2023 verliehen.

Hochqualifizierten Nachwuchs fördern und schon frühzeitig neue Ideen im Bereich der Angewandten Photonik würdigen – das ist das Ziel des »Applied Photonics Awards«. Der Nachwuchsförderpreis prämiiert herausragende Abschlussarbeiten, die sich durch eine besondere Relevanz im Bereich Angewandter Photonik auszeichnen. Überreicht wurde der Award im Rahmen der »Photonics Days Jena« durch Prof. Dr. Anke Kaysser-Pyzalla, Vorstandsvorsitzende des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt gemeinsam mit Dr. Katja Böhler, Staatssekretärin für Forschung, Innovation und Wirtschaftsförderung in Thüringen.

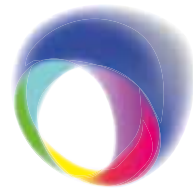
Eine Fachjury, bestehend aus Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft, hatte zuvor die prämierten Arbeiten ausgewählt. Es wurden Arbeiten in den Kategorien Bachelor, Master und Dissertation ausgezeichnet. Die Jury vergab zudem Sonderpreise für Arbeiten im Bereich der angewandten Quantentechnologien und der grundlagenorientierten Forschung.

The winners of this year's "Applied Photonics Award" are addressing these and further questions about the future. The Award was presented to the five winners of 2023 on October 12 as part of the "Photonics Days Jena". Promoting highly qualified young talents and recognizing new ideas in the field of applied photonics at an early stage — that is the aim of the "Applied Photonics Award". It honors outstanding theses that are particularly relevant in the field of applied photonics. The award was presented at the "Photonics Days Jena" by Prof. Anke Kaysser-Pyzalla, CEO of the German Aerospace Center, together with Dr. Katja Böhler, State Secretary for Research, Innovation and Economic Development in Thuringia.

A jury consisting of representatives from science and industry had previously selected the award-winning theses in the categories Bachelor, Master, and Dissertation. The jury also awarded special prizes for theses in the field of applied quantum technologies and basic research.

*Institutsleiter Andreas Tünnermann gratuliert den Preistragenden zum Gewinn.
/ Institute Director Andreas Tünnermann congratulates the prizewinners.*





Die Gewinnerinnen und Gewinner des »Applied Photonics Award« 2023 sind:

Beste Bachelorarbeit (1.000 €)

Manuel Klockow (Friedrich-Schiller-Universität Jena): »Evaluating Diffractive Neural Network Architectures«

Beste Masterarbeit (2.000 €)

Valeriia Sedova (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg): »Modeling of thick photore-sist for grayscale lithography application«

Beste Dissertation (3.000 €)

Dr. Vincent Hahn (Karlsruher Institut für Technologie): »3D Laser Micro- and Nanoprinting: Finer, Faster, and More Affordable«

Preis der Jury für Angewandte Quantentechnologien (1.500 €)

Philipp Reuschel (Universität Siegen): »Vector magnetometry based on polarimetric optically-detected magnetic resonance«

Preis der Jury für grundlagenorientierte Forschungsarbeit in einem wichtigen Zukunftsfeld der modernen Informationsgesellschaft (1.500 €)

Dr. Tobias Weitz (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg): »Lightwave electronics in graphene«

The winners of the "Applied Photonics Award" 2023 are:

Best Bachelor's Thesis (1,000 €)

Manuel Klockow (Friedrich-Schiller-Universität Jena), "Evaluating Diffractive Neural Network Architectures"

Best Master's Thesis (2,000 €)

Valeriia Sedova (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), "Modeling of thick photore-sist for grayscale lithography application"

Best Dissertation (3,000 €)

Dr. Vincent Hahn (Karlsruher Institut für Technologie), "3D Laser Micro- and Nanoprinting: Finer, Faster, and More Affordable"

Prize of the Jury for Applied Quantum Technologies (1,500 €)

Philipp Reuschel (Universität Siegen), "Vector magnetometry based on polarimetric optically-detected magnetic resonance"

Prize of the jury for basic research work in an important future field of the modern information society (1,500 €)

Dr. Tobias Weitz (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), "Lightwave electronics in graphene"



Die Photonics Days Jena 2023

Forschung und Karriere »unter einem guten Stern«

»In Jena wird viel für die Weltraumforschung geleistet«, sagte Prof. Anke Kaysser-Pyzalla, CEO des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, bei den Photonics Days Jena 2023. Das Karriere- und Netzwerkevent lud vom 12. bis 13. Oktober zum mittlerweile fünften Mal internationale Studierende aus den Bereichen Optik und Photonik zum Netzwerken, Diskutieren und auch ein bisschen zum Träumen ein, denn mit Vorträgen und Workshops

The Photonics Days Jena 2023

Research and career "under a lucky star"

"Jena is doing a lot for space research", said Prof. Anke Kaysser-Pyzalla, CEO of the German Aerospace Center, at this year's Photonics Days Jena. From October 12 to 13, the career and networking event invited international students from the fields of optics and photonics to network, discuss and dream a little as well — with lectures and workshops, the event turned its gaze towards space and placed a special

Hands-On-Wissenschaft und Platz für Ideenaustausch boten die Photonics Days Jena auch in diesem Jahr. / This year's Photonics Days Jena once again offered hands-on science and space for the exchange of ideas.



wandte das Event den Blick in Richtung Welt-
raum und legte in 2023 einen besonderen
Fokus auf photonische Technologien, die nach
den Sternen greifen.

In der Vortragsreihe »Photonics4Future«
gaben Forschende des Fraunhofer IOF den
Teilnehmenden Einblicke in ausgewählte
Forschungsprojekte. Ein besonderes Veran-
staltungshighlight war die Keynote von Prof.
Dr. Anke Kaysser-Pyzalla. Sie gab Ausblicke
auf die Zukunft der Luft- und Raumfahrt, die
auch von Forschenden aus Jena maßgeblich
mitgestaltet wird. Den Blick auf Zukunft und
Vergangenheit band am zweiten Veran-
staltungstag eine weitere Keynote zusammen:
Prof. Dr. Michael Totzeck, Fellow bei der Carl
Zeiss AG, erinnerte daran, dass die Basis all
dieser Technologien hier in Jena gelegt wurde:
Vor genau 150 Jahren veröffentlichte der
Jenaer Optikpionier Ernst Abbe erstmals die
von ihm erarbeiteten theoretischen Grundlagen
zur Auflösungsgrenze für Lichtmikroskope.

Die Photonics Days Jena nahmen ebenfalls
in gewohnter Weise ihren Auftrag wahr, zur
Vernetzung von Studierenden und Industrie
beizutragen: Beim »Industry Breakfast« hatten
die Teilnehmenden die Gelegenheit, wertvolle
Kontakte zu 11 Unternehmen und Institutio-
nen aus der Optik- und Photonikbranche zu
knüpfen. Für virtuelle Gäste boten sich bei
einem »Digital Breakfast« ebenfalls digitale
Vernetzungsmöglichkeiten.

Zusätzlich wurden im Rahmen des Events
junge Nachwuchsforschende gewürdigt:
Beim Ideen-Pitch des Leistungszentrums
Photonik wurden die Ideen von fünf jungen
Forschenden ausgezeichnet. Weiterhin wurde
der Applied Photonics Award, der Nachwuchs-
förderpreis organisiert durch das Fraunhofer
IOF, an die Preistragenden 2023 verliehen
(siehe Seite 48).

Das Event erfreute sich auch in diesem Jahr
einer erneut großen internationalen Nach-
frage. Die über 165 Teilnehmenden kamen –
ermöglicht auch durch das hybride Format –
etwa aus den USA, Großbritannien oder
Kanada, aber auch aus Indien, Saudi-Arabien,
Südkorea oder Mexico.

focus on photonic technologies that reach
for the stars.

In the "Photonics4Future" lecture series,
Fraunhofer IOF researchers gave participants
insights into selected research projects. A
special highlight was the keynote by Prof.
Anke Kaysser-Pyzalla, who gave an outlook on
the future of aerospace, which is also being
significantly shaped by researchers from Jena.
In his keynote Prof. Michael Totzeck, Fellow at
the Carl Zeiss AG, brought together the past
and the future and reminded the audience
that the foundations for all these technologies
were laid here in Jena. Exactly 150 years ago,
optics pioneer Ernst Abbe from Jena published
the theoretical principles for the resolution
limit for light microscopes.

The Photonics Days Jena fulfilled their mission
to contribute to the networking of students
and industry as well. At the "Industry Break-
fast", participants had the opportunity to
establish valuable contacts with 11 companies
and institutions from the field of optics and
photonics. Virtual guests were also offered
digital networking opportunities at the "Digi-
tal Breakfast".

Young researchers were honored during the
event as well: The ideas of five researchers
were highlighted in the idea pitch of the
Center of Excellence in Photonics. Also, the
Applied Photonics Award organized by Fraun-
hofer IOF was presented (see page 46).

This year's event once again enjoyed a high
international demand. The more than 165 par-
ticipants came — also made possible by the
hybrid format — from the USA, the UK and
Canada, but also from India, Saudi Arabia,
South Korea, and Mexico.



In Jena wird viel für die Weltraumforschung geleistet.«

“A lot is being done for
space research in Jena.”

Prof. Anke Kaysser-Pyzalla,
Vorstandsvorsitzende des
Deutschen Zentrums für Luft-
und Raumfahrt / CEO of the
German Aerospace Center

*In ihrer Keynote sprach Prof.
Anke Kaysser-Pyzalla über
die Zukunft der Luft- und
Raumfahrt. / In her keynote,
Prof. Anke Kaysser-Pyzalla
spoke about the future of
aerospace.*





Die Abgeordneten Lutz Liebscher und Matthias Ecke (v.r. n.l.) im Gespräch mit Andreas Tünnermann. / Members of Parliament Lutz Liebscher and Matthias Ecke (from right) in conversation with Andreas Tünnermann.

»IT-Sicherheit ist eine europäische Aufgabe«

Abgeordnete aus Europa, Bund und Land informieren sich am Fraunhofer IOF über Quantenforschung als Chance für ein souveränes Europa

Welche Bedeutung hat die Quantenkommunikation für die technologische Souveränität und langfristige Datensicherheit Europas? Darüber tauschte sich Prof. Dr. Andreas Tünnermann mit dem Europaabgeordneten Matthias Ecke sowie dem Landtagsabgeordneten Lutz Liebscher und Dr. Holger Becker, Mitglied des Deutschen Bundestages, (alle SPD) bei deren Besuch am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF am 20. Februar 2023 aus. Prof. Tünnermann forderte »mehr politischen Willen« und eine aktivere Industriepolitik seitens Europas.

“IT Security is a European Task”

Members of Parliament from Europe, the Federal Government, and the State inform themselves at Fraunhofer IOF about quantum research as an opportunity for a sovereign Europe

What significance does quantum communication have for Europe's technological sovereignty and long-term data security? Prof. Dr. Andreas Tünnermann exchanged views on this topic with Matthias Ecke, member of the European Parliament, as well as Lutz Liebscher, member of the State Parliament, and Dr. Holger Becker, member of the German Bundestag, (all SPD) during their visit to the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF on February 20, 2023. Prof. Tünnermann called for “more political will” and a more active industrial policy on the part of Europe.



»IT-Sicherheit ist eine europäische Aufgabe«
 "IT Security is a European Task"

During the discussion, Prof. Tünnermann drew special attention to the need for an active industrial policy on the part of the European Union: It is of little use if methods for highly secure encryption are researched in Europe, but parts and components for computers and smartphones still must be purchased outside Europe. He views IT-security as a European task and advocates for the expansion of the EU Commission's data security department.

The delegates were impressed by the research and development work being conducted in Jena in various quantum-related research projects. These include the QuNET initiative, funded by the Federal Ministry of Education and Research with 125 million euros, which is developing highly secure communication systems — based on state-of-the-art quantum technologies — or current research projects such as HyperSpace and QuDICE, which are being co-designed at Fraunhofer IOF and aim to create the basis for an intercontinental network for quantum communication.

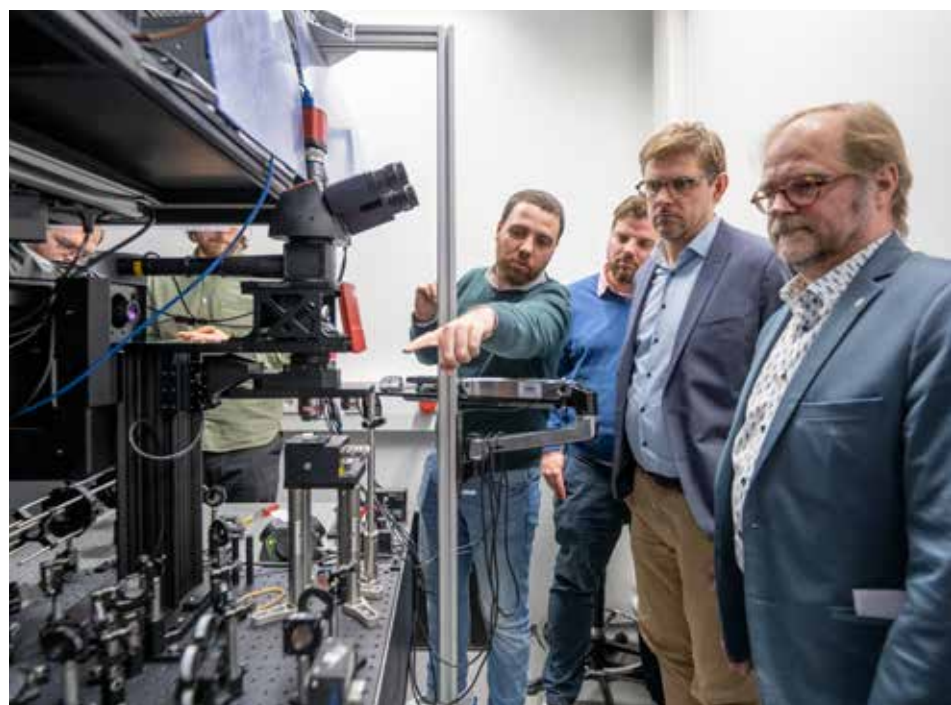
"We want to build the networks to make European communication physically secure," sums up Andreas Tünnermann about the goals of quantum research projects at Fraunhofer IOF and their importance for Europe's technological sovereignty.

Im Gespräch machte Prof. Tünnermann dabei speziell auf die Notwendigkeit einer aktiven Industriepolitik seitens der Europäischen Union aufmerksam. Es bringe wenig, wenn Methoden zur hochsicheren Verschlüsselung in Europa erforscht würden, Bauteile und Komponenten für Computer und Smartphones jedoch nach wie vor im außereuropäischen Ausland eingekauft werden müssen. Er sieht IT-Sicherheit als europäische Aufgabe und plädiert für den Ausbau der Abteilung für Datensicherheit der EU-Kommission.

Bei ihrem Besuch am Fraunhofer IOF besichtigte die Delegation auch ein Quantenlabor. / During their visit to Fraunhofer IOF, the delegation also toured a quantum laboratory.

Die Abgeordneten zeigten sich beeindruckt von der Forschung und Entwicklungsarbeit, die in Jena in verschiedenen quantenbezogenen Forschungsprojekten vorangetrieben wird. Darunter die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit 125 Millionen Euro geförderte Initiative QuNET, die hochsichere Kommunikationssysteme - basierend auf modernsten Quantentechnologien - entwickelt oder aktuelle Forschungsprojekte wie HyperSpace und QuDICE, die am Fraunhofer IOF mitgestaltet werden und die Grundlage für ein interkontinentales Netzwerk zur Quantenkommunikation schaffen wollen.

»Wir wollen die Netze bauen, um europäische Kommunikation physikalisch sicher zu machen«, resümiert Andreas Tünnermann über die Ziele der Quanten-Forschungsprojekte am Fraunhofer IOF und deren Bedeutung für die technologische Souveränität Europas.



»Let's start making Europe now!«
"Let's start making Europe now!"



*Französische Vertreter
aus Politik, Wissenschaft
und Wirtschaft zu Gast
am Fraunhofer IOF. /
French representatives
from politics, science and
industry were guests at
Fraunhofer IOF.*

»Let's start
making Europe
now!«

**Französische Botschaft
in Deutschland besucht
gemeinsam mit französi-
schen Wissenschaftlern
das Fraunhofer IOF**

»Bienvenue au Fraunhofer IOF« hieß es am 11. Mai 2023 auf dem Beutenberg-Campus. Eine Delegation unter Leitung der französischen Botschaft in Deutschland besuchte das Fraunhofer IOF. In Vorträgen und Gesprächen tauschten sich deutsche und französische Vertreter aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft über Chancen und Perspektiven für eine engere Zusammenarbeit in der Zukunft aus.

"Let's start
making Europe
now!"

**French Embassy in
Germany visits Fraunhofer
IOF together with French
scientists**

"Bienvenue au Fraunhofer IOF" was the motto on the Beutenberg campus on May 11, 2023. A delegation led by the French Embassy in Germany visited the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF. During lectures and discussions, German and French representatives from politics, science and industry exchanged views on opportunities and perspectives for closer cooperation in the future.



Der Austausch konzentrierte sich speziell auf Forschungsprojekte im Bereich der Quantentechnologien mit Schwerpunkt auf Kommunikation und Computing. Der praktische Charakter des Treffens, das ganz konkrete Schritte für die Entwicklung weiterer Forschungsk Kooperationen einleiten soll, wurde auch durch die Liste der Teilnehmer deutlich: Neben Vertretern der französischen Botschaft (Department for Science and Technology, Counselor for Space and Business France – die Agentur für die internationale Entwicklung der französischen Wirtschaft) waren auch das CEA (French Alternative Energies and Atomic Energy Commission) und ausgewählte französische Start-ups wie Quandela und Alice&Bob beteiligt.

Vor dem Hintergrund aktueller globaler Herausforderungen, unterstrich Axelle Cheney-Grünberger, Senior International Expert für Innovationen bei der französischen Botschaft in Deutschland und gleichzeitig verantwortlich für die deutsch-französischen Kooperationen in der Fraunhofer-Zentrale, die Dringlichkeit einer verstärkten Zusammenarbeit und einem europäischen Gemeinschaftsbewusstsein: »Let's start making Europe now!«

The exchange focused specifically on research projects in the fields of quantum technologies with an emphasis on communication and computing. The practical nature of the meeting, which is intended to initiate very concrete steps for the development of further research cooperation, was also made clear by the list of participants: In addition to representatives of the French Embassy (Department for Science and Technology, Counselor for Space and Business France — the agency for the international development of the French economy), the CEA (French Alternative Energies and Atomic Energy Commission) and selected French start-ups such as Quandela and Alice&Bob were also involved.

Against the backdrop of current global challenges, Axelle Cheney-Grünberger, Senior International Expert for Innovation at the French Embassy in Germany, who is also responsible for Franco-German cooperation at Fraunhofer headquarters, emphasized the urgency of increased cooperation and a European sense of community: "Let's start making Europe now!"

*Eine Vorführung
ultrapräziser
Freiformbearbeitung
bot Dr. Jan Kinast (IOF).
/ A demonstration of
ultra-precise free-form
machining was offered by
Dr. Jan Kinast (IOF).*

Auszeichnungen Awards



**Fraunhofer Prize for
Human- and Environment-Centered Technology**

Dr. Henrik von Lukowicz
Cassi Welling (constellr GmbH)
Dr. Matthias Beier (SPACEOPTIX GmbH)
Clemens Horch (Fraunhofer EMI)



**Dr.-Ing. Siegfried Werth Preis,
Friedrich-Schiller-Universität Jena**

Dr. Martin Landmann



**Hugo-Geiger-Preis,
Free State of Bavaria and Fraunhofer-Gesellschaft**

Dr. Robert Klas



**Science Award of the
Beutenberg Campus Jena e.V.,
"Excellent Interdisciplinary Cooperation"**

Prof. Thomas Pertsch
Prof. Jens Limpert,
Dr. Jan Rothhardt
Prof. Dr. Falk Hillmann (Leibniz-HKI)



**BMBF caricature competition,
"National Conference on IT Security Research"**

Dr. Falk Eilenberger
Dr. Thorsten Goebel
Johannes Kretschmar (Friedrich-Schiller-Universität Jena)



**MOC Contribution Award,
Japan Society of Applied Physics**

Prof. Dr. Uwe D. Zeitner



**Poster competition Heraeus Seminar,
Sensing with Quantum Light**

Johanna Conrad



**1st Place poster competition,
124th Annual Meeting of the The German
Branch of the European Optical Society (DGaO)**

Anja Bartelmei



**1st Place Best Student Presentation Award,
SPIE Photonics West (San Francisco, USA)**

Ziyao Wang



Messebeteiligungen Trade fair participations

SPIE Photonics West	San Francisco, USA	31.01.–02.02.2023
OPIE 2023	Yokohama, Japan	19.–21.04.2023
Hannover Messe	Hannover	17.–21.4.2023
Optecnet Jahrestagung	Fürstentfeldbruck	25.–26.4.2023
Control	Stuttgart	9.–12.5.2023
International Paris Air Show	Paris	19.–25.6.2023
Laser World of Photonics	München	26.–29.6.2023
Laser World of Quantum	München	26.–29.6.2023
automatica	München	26.–29.6.2023
IAA	München	5.–10.9.2023
SpaceTechExpo Europe	Bremen	13.–16.11.2023
COMPAMED/Medica	Düsseldorf	14.–16.11.2023
W3+ fair Jena	Jena	29.–30.11.2023





Zahlen und Service 2023
Figures and Service 2023

2023 – Das Institut in Zahlen

2023 – The institute in figures

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2023 ist gegenüber dem Vorjahr um 17 % gestiegen, worin die Aufwendungen für Personal um 14 % stiegen, die Sachausgaben um 19 %. Basis ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag lag bei 16,8 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten 20,8 Millionen Euro.

Operating budget

Compared with the previous year the operating budget increased in 2023 by 17 %, with expenditures for staff grow by 14 % and material costs expenditures decreased by 19 %. The basis is still the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached more than 16.8 million euros. The received public funding also reached 20.8 million euros.

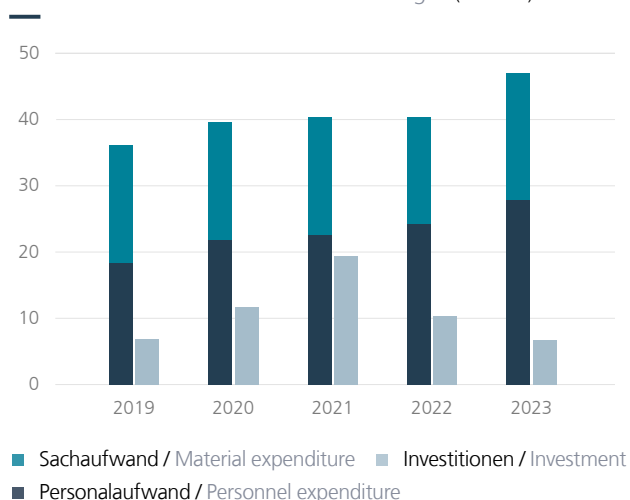
Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2023 wurden insgesamt 6,7 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

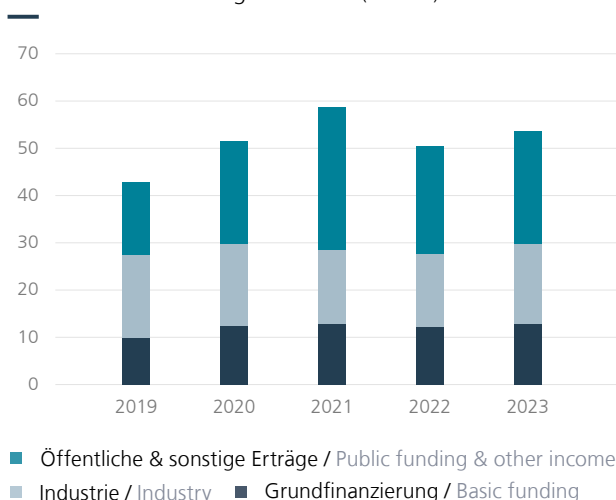
Investments

The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 6.7 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2022.

Fraunhofer IOF Gesamthaushalt / Budget (Mio. €)



Fraunhofer IOF Ertrag / Revenue (Mio. €)



Personal

Durch die Entwicklung und Etablierung neuer Technologien setzt sich das Personalwachstum des Fraunhofer IOF kontinuierlich fort. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität Jena, der Ernst-Abbe Hochschule Jena und der Technischen Universität Ilmenau.

Das Institute of Applied Physics (IAP) der Friedrich-Schiller-Universität Jena in Zahlen

Die Mitarbeitenden des IAP konnten für 2023 Drittmittel in Höhe von 10,8 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2023 5 Professoren, 40 wissenschaftliche und 15 technische Mitarbeitende sowie 119 Promovierende und 109 Studierende. Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

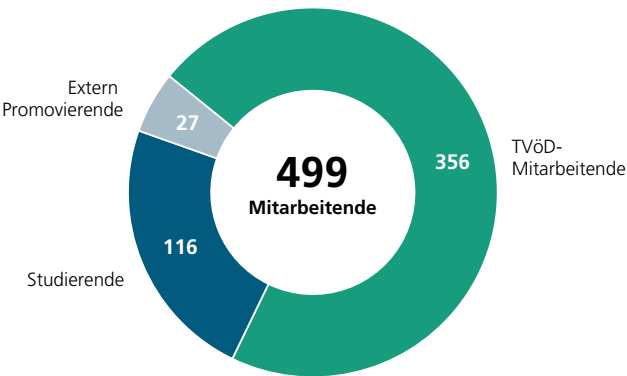
Staff

Through the development and establishment of new technologies, the number of employees at the Fraunhofer IOF grows continuously. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher education, in particular the Friedrich Schiller University Jena, the Ernst-Abbe University Jena, and the Technical University Ilmenau.

The Institute of Applied Physics (IAP) of the Friedrich Schiller University in figures

Employees at IAP acquired external funds worth 10.8 million euros in 2023 (see table). A total staff of 5 professors, 40 research assistants, 15 technical assistants, 119 doctoral candidates, and 109 students were working at IAP in 2023. The majority of completed theses are listed in the attachment.

Fraunhofer IOF Mitarbeitende / Staff



IAP Drittmiteleinahmen IAP 2023 /

Contract research revenue IAP 2023

Fördergeber / Contracts with	Zuwendung Funds T€
BMBF	5.599
DFG	1.439
EU	0.765
Thüringen / Thuringia	0.867
Stiftungen / Foundations	1.018
Industrie / Industry	1.105

* Die Zahlen 2023 sind noch nicht final, Hochrechnungen aus Dezember 2023.

Strategische Initiativen

Strategic Initiatives



Leistungszentrum Photonik

Das Leistungszentrum Photonik ist eine einrichtungsübergreifende Forschungs- und Transferplattform des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, des Instituts für Angewandte Physik, der Leibniz-Institute IPHT und HKI, des Helmholtz-Instituts Jena sowie der Ernst-Abbe-Hochschule Jena. Durch Verknüpfung ihrer komplementären Kompetenzen schaffen die Partner ein gemeinsames Innovationsökosystem zur Entwicklung innovativer Lösungen mit Licht.

Mit Bearbeitung anwendungsorientierter Forschungsthemen in Graduiertenprojekten, der Unterstützung von Ausgründungen und Startups im Digital Innovation Hub Photonics und der Durchführung von Workshops und Nachwuchsveranstaltungen zu Zukunftsthemen wie den Photonischen Quantentechnologien konnte das Leistungszentrum 2023 den Transfer exzellenter Forschungsergebnisse in Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft nachhaltig befördern.

Weiteres Highlight waren die Elevator Pitches im Rahmen der Photonics Days 2023, zu denen erneut Nachwuchsforschende eingeladen waren, innovative Forschungsideen vorzustellen. Mit kreativen Konzepten, etwa zur emotionsbasierten Anpassung von Leuchtmitteln sowie der Gamification physikalischer Experimente bis hin zu innovativen technologischen Ansätzen für Schichtdickenmessungen und META-Linsen, konnten die Teilnehmenden das internationale Publikum überzeugen und Forschungsbudgets zur ersten Umsetzung ihrer Ideen gewinnen.

Center of Excellence in Photonics

The Center of Excellence in Photonics is a cross-institutional research and transfer center of the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF, the Friedrich Schiller University Jena, the Leibniz Institutes IPHT and HKI, the Helmholtz Institute Jena and the Ernst-Abbe-Hochschule Jena. By combining their complementary competencies, the partners are creating a shared ecosystem of innovation for the development of innovative solutions with light.

By working on application-oriented research topics in graduate projects, supporting spin-offs and start-ups in the Digital Innovation Hub Photonics and holding workshops and young talent events on future topics such as photonic quantum technologies, the Center of Excellence in Photonics 2023 was able to sustainably promote the transfer of excellent research results to industry, science and society.

Another highlight were the Elevator Pitches as part of the Photonics Days 2023, where young researchers were once again invited to present innovative research ideas. With creative concepts such as the emotion-based adaptation of light sources, gamification for physical experiments, and innovative technological approaches for layer thickness measurements and META lenses, the participants were able to persuade the international audience and win research budgets for the initial implementation of their ideas.

Digital Innovation Hub Photonics (DIHP)

Der Digital Innovation Hub Photonics (DIHP) ist ein Konsortialprojekt des Landes Thüringen – getragen vom Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft – mit dem (Aus-)Gründungen im Bereich Optik und Photonik gefördert werden sollen. Sein Ziel ist es, die am DIHP beteiligten Partnereinrichtungen sowie den Standort Jena als Zentrum für innovative Gründungen regional, national und international sichtbar zu machen.

So wurde zum Beispiel im letzten Jahr das erste internationale Projekt mit spectro photonics srl. aus Mailand mit dem Fraunhofer IOF auf den Weg gebracht. Dazu zeigte der DIHP Präsenz auf den entsprechenden Messen wie w3+ Fair, Laser World of Photonics und auch auf der Photonics West oder OPIE, wo drei vom DIHP geförderte und betreute Teams präsent waren. Zudem präsentierten sich Gründerinnen und Gründer sowie Startups der vergangenen Jahre auf vielfältigen Veranstaltungen, die auch die Herkunftsinstitute sichtbar werden lassen, wie z.B. beim Startup-Forum Ostdeutschland des Ostbeauftragten der Bundesregierung, Carsten Schneider, MdB im Bundeskanzleramt oder auf dem Ostdeutschen Wirtschaftsforum (OWF) in Bad Saarow, wo die Robust AO GmbH und ihre Gründerin Dr. Claudia Reinlein mit dem Preis »Vorsprung« geehrt wurden.

Den jährlichen Höhepunkt bildet der DIHP-Pitch, wo sich Ideengeberinnen aus den Einrichtungen des Konsortiums als auch von außen auf Forschungsbudgets an den beteiligten Einrichtungen des Konsortiums bewerben können. Der DIHP-Pitch 2023 fand im Januar mit einer hochkarätig besetzten Jury statt und im Laufe des Jahres führte das sehr junge Team BeeSupervisor ihr Projekt mit der Abteilung OMS durch, um die Erkennung der Varroamilbe bei Honigbienen zu ermöglichen.

Der DIHP ist ein Konsortialprojekt der folgenden wissenschaftlichen Einrichtungen: dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien (Leibniz-IPHT), des Abbe Center of Photonics (ACP), der Friedrich-Schiller-Universität Jena, der Ernst-Abbe-Hochschule Jena (EAH), dem Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie e. V. – Hans-Knöll-Institut (Leibniz-HKI) sowie dem Helmholtz-Institut Jena (HI-J) und dem Fraunhofer IOF, wo auch die Projektleitung angesiedelt ist.

Digital Innovation Hub Photonics (DIHP)

The Digital Innovation Hub Photonics (DIHP) is a consortium project of the State of Thuringia - supported by the Thuringian Ministry of Economics, Science and Digital Society — which is aimed at promoting (spin-off) start-ups in the field of optics and photonics. Its goal is to make the partner institutions involved in the DIHP and Jena as a center for innovative start-ups more visible regionally, nationally, and internationally.

Last year, for example, the first international project was launched with spectro photonics srl. from Milan and Fraunhofer IOF. The DIHP was also present at the relevant trade fairs such as w3+ Fair, Laser World of Photonics as well as Photonics West or OPIE, where three teams sponsored and supervised by the DIHP were present. In addition, company founders and start-ups from recent years have presented themselves at a variety of events that also highlight the institutes of origin. These include the Start-Up Forum for Eastern Germany hosted by the German Federal Government Commissioner for Eastern Germany, Carsten Schneider, Member of the Bundestag at the German Federal Chancellery, or at the East German Economic Forum (OWF) in Bad Saarow, where Robust AO GmbH and its founder Dr. Claudia Reinlein were honored with the "Vorsprung" (advance) award.

The DIHP pitch is the annual highlight, where idea givers from the consortium's institutions as well as from outside can apply for research budgets at the consortium's participating institutions. The DIHP Pitch 2023 took place in January with a high-profile jury, and over the course of the year the very young BeeSupervisor team carried out their project with the OMS department to enable the detection of the Varroa mite in honeybees.

The DIHP is a consortium project of the following research institutions: the Leibniz Institute of Photonic Technology (Leibniz-IPHT), the Abbe Center of Photonics (ACP) at the Friedrich Schiller University Jena, the Ernst-Abbe-Hochschule Jena, the Leibniz Institute for Natural Product Research and Infection Biology Hans Knöll Institute (Leibniz-HKI), the Helmholtz Institute Jena (HI-J), and Fraunhofer IOF, where the project leadership is based.

Fraunhofer-Zentrum Erfurt

Als Standort kollaborativer Forschung verbindet das Fraunhofer-Zentrum Erfurt (FZE) die Kompetenzen der Fraunhofer-Institute für Photonische Mikrosysteme IPMS, für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF sowie für Zelltherapie und Immunologie IZI zur Entwicklung kunden- und anwendungsspezifischer Lösungen für Zukunftsmärkte wie Gesundheit, Analytik, Sicherheit und Kommunikation.

Nach der positiven Evaluation der Pilotphase im Jahr 2022 wurde die strategische Ausrichtung des Fraunhofer-Zentrums kontinuierlich weiterentwickelt. Neben der Entwicklung mikroelektronischer und optischer Systeme für die Biomedizin fokussiert das FZE unter der Koordination des Fraunhofer IOF auf Aufbau- und Verbindungstechnik zur Entwicklung und Integration innovativer mikrooptischer Systeme, leistungsfähiger Faserlaser-Konzepte sowie Anwendungen der photonischen Quantentechnologien. Mit dem Kick-Off zum Projekt Q-Net-Q wurde im August 2023 hierzu der Startschuss gegeben, bereits bestehende Teststrecken zur Erforschung quantengesicherter Faserverbindungen zwischen Erfurt und Jena durch neue Abschnitte in Richtung Nordhausen sowie perspektivisch Berlin und Frankfurt am Main zu erweitern und den Standort Erfurt zu einem bedeutenden Knotenpunkt der Quantenkommunikation auszubauen.

Fraunhofer Center Erfurt

The Fraunhofer Center Erfurt FZE is a center for collaborative research that combines the competencies of the Fraunhofer Institutes for Photonic Microsystems IPMS, for Applied Optics and Precision Engineering IOF and for Cell Therapy and Immunology IZI. It develops customer- and application-specific solutions for emerging markets such as health, analytics, security, and communications.

Following the positive evaluation of the pilot phase in 2022, the strategic orientation of the Fraunhofer Center has been continuously developed. Besides the development of microelectronic and optical systems for biomedicine, the FZE, coordinated by Fraunhofer IOF, focuses on assembly and joining technology for the development and integration of innovative microoptical systems, high-performance fiber laser concepts and applications in photonic quantum technologies. With the kick-off for the Q-Net-Q project in August 2023, the go-ahead was given to expand existing test routes for researching quantum-secured fiber connections between Erfurt and Jena with new sections towards Nordhausen and, prospectively, Berlin and Frankfurt am Main, to develop Erfurt into an important quantum communication hub.



Wir zeigen, dass exzellente Forschung erstklassige Orga verdient.

Ob man die großen Fragen im Fokus hat oder ein Auge auf winzige Details wirft – für herausragende Forschung behalten wir auch außerhalb der Labore stets den Überblick. Planen, organisieren, optimieren – bei uns machen Sie Spitzenforschung möglich.



Kommen Sie ins Team Fraunhofer!
www.iof.fraunhofer.de

Veränderung startet mit uns.



Artikel Articles

- Alam, S. et al.
Heterostructure Films of SiO₂ and HfO₂ for High-Power Laser Optics Prepared by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition
Coatings, 13 (2), DOI 10.3390/coatings13020278
- Aleshire, C. et al.
Frequency-doubled Q-switched 4x4 multicore fiber laser system
Optics Letters, 48 (8), pp. 2198–2201, DOI 10.1364/OL.487334
- Arumugam, S.V. et al.
Exploring the impact of longitudinal modulation on the twisting angle in Pancharatnam-Berry phase-based waveguides
Optics Express, 31 (26), pp. 44283–44294, DOI 10.1364/OE.505538
- Baghdasaryan, B.; F. Steinlechner, S. Fritzsche
Enhancing the purity of single photons in parametric down-conversion through simultaneous pump-beam and crystal-domain engineering
Physical Review A, 108 (2), DOI 10.1103/PhysRevA.108.023718
- Bennenhei, C. et al.
Polarized room-temperature polariton lasing in elliptical microcavities filled with fluorescent proteins
Optical Materials Express, 13 (9), pp. 2633–2643, DOI 10.1364/OME.496883
- Benner, M. et al.
Concept of enhanced frequency chirping for multi-pass cells to improve the pulse contrast
Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, 40 (2), pp. 301–305, DOI 10.1364/JOSAB.479037

*Präsentation zu Möglichkeiten und Chancen
in der Welt der Quanten und Photonik zum
Fraunhofer Wissenschaftscampus 2023 am
Fraunhofer IOF. / Presentation on possibilities
and opportunities in the world of quantum and
photonics at Fraunhofer Science Campus 2023
at Fraunhofer IOF.*

- Birckigt, P. et al.
Measurement of the bonding energy via non-planar direct bonding
Journal of Applied Physics, 133 (21), DOI 10.1063/5.0139204
- Brambila, E. et al.
Ultrabright polarization-entangled photon pair source for frequency-multiplexed quantum communication in free-space
Optics Express, 31 (10), pp. 16107–16117, DOI 10.1364/OE.461802
- Bräuer-Burchardt, C. et al.
Underwater 3D Scanning System for Cultural Heritage Documentation
Remote Sensing, 15 (7), DOI 10.3390/rs15071864
- Buldt, J. et al.
High-power two-color plasma-based THz generation driven by a Tm-doped fiber laser
Optics Letters, 48 (13), pp. 3403–3406, DOI 10.1364/OL.492511
- Bulla, L. et al.
Distribution of genuine high-dimensional entanglement over 10.2 km of noisy metropolitan atmosphere
Physical Review A, 107 (5), DOI 10.1103/PhysRevA.107.L050402
- Bulla, L. et al.
Nonlocal Temporal Interferometry for Highly Resilient Free-Space Quantum Communication
Physical Review X, 13 (2), DOI 10.1103/PhysRevX.13.021001
- Cabrejo-Ponce, M. et al.
High-Dimensional Entanglement for Quantum Communication in the Frequency Domain
Laser and Photonics Reviews, 17 (9), DOI 10.1002/lpor.202201010
- Camphausen, R. et al.
Fast quantum-enhanced imaging with visible-wavelength entangled photons
Optics Express, 32 (4), pp. 6039–6050, DOI 10.1364/OE.471429
- Chakraborty, A. et al.
Broadband Four-Wave Mixing Enhanced by Plasmonic Surface Lattice Resonance and Localized Surface Plasmon Resonance in an Azimuthally Chirped Grating
Laser and Photonics Reviews, 17 (7), DOI 10.1002/lpor.202200958
- Cholsuk, C.; S. Suwanna, T. Vogl
Comprehensive Scheme for Identifying Defects in Solid-State Quantum Systems
Journal of Physical Chemistry Letters, 14 (29), pp. 6564–6571, DOI 10.1021/acs.jpcllett.3c01475
- Conlon, L.O. et al.
Discriminating mixed qubit states with collective measurements
Communications Physics, 6 (1), DOI 10.1038/s42005-023-01454-z
- Conlon, L.O. et al.
Approaching optimal entangling collective measurements on quantum computing platforms
Nature Physics, 19 (3), pp. 351–357, DOI 10.1038/s41567-022-01875-7
- Cook, J. et al.
100 W; tunable in-band thulium fiber amplifier pumped by incoherently combined 1.9 μm fiber lasers
Optics Express, 31 (18), pp. 29245–29254, DOI 10.1364/OE.487601
- Drawer, J.-C. et al.
Monolayer-Based Single-Photon Source in a Liquid-Helium-Free Open Cavity Featuring 65% Brightness and Quantum Coherence
Nano Letters, 23 (18), pp. 8683–8689, DOI 10.1021/acs.nanolett.3c02584
- Engelhardt, L.; D. Stumpf, R. Brunner
Tailored chromatic diffraction efficiency of double-layer single-relief blazed gratings
Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, 40 (4), pp. 703–713, DOI 10.1364/JOSAA.484217
- Eschen, W. et al.
High-speed and wide-field nanoscale table-top ptychographic EUV imaging and beam characterization with a sCMOS detector
Optics Express, 31 (9), pp. 14112–14224, DOI 10.1364/OE.485779
- Fiederling, K. et al.
A Full Quantum Mechanical Approach Assessing the Chemical and Electromagnetic Effect in TERS
ACS Nano, 17 (14), pp. 13137–13146, DOI 10.1021/acsnano.2c11855

Artikel Articles

- Forster, E. et al.
Catadioptric sensor concept with interlaced beam paths for imaging and pinpoint spectroscopy
Applied Optics, 62 (19), pp. 5170–5178, DOI 10.1364/AO.492506
- Fuenzalida, J. et al.
Experimental quantum imaging distillation with undetected light
Science Advances, 9 (35), DOI 10.1126/sciadv.adg9573
- Gärtner, A. et al.
Combined antifogging and antireflective double nanostructured coatings for LiDAR applications
Applied Optics, 62 (7), pp. B112-B116, DOI 10.1364/AO.476974
- Gerold, K. et al.
Conformal antireflection coatings for optical dome covers by atomic layer deposition
Applied Optics, 62 (7), pp. B92-B96, DOI 10.1364/AO.477069
- Gilaberte Basset, M. et al.
Experimental analysis of image resolution of quantum imaging with undetected light through position correlations
Physical Review A, 108 (5), DOI 10.1103/PhysRevA.108.052610
- Gili, V.F. et al.
Quantum ghost imaging based on a “looking back” 2D SPAD array
Applied Optics, 62 (12), pp. 3093–3099, DOI 10.1364/AO.487084
- Gischkat, Th. et al.
Low-temperature ion beam sputtered optical coatings
Applied Optics, 62 (7), pp. B195-B201, DOI 10.1364/AO.480089
- Gopalakrishna, H.N. et al.
Tracing spatial confinement in semiconductor quantum dots by high-order harmonic generation
Physical Review Research, 5 (1), DOI 10.1103/PhysRevResearch.5.013128
- Gottschall, T. et al.
Ultrafast Spectral Tuning of a Fiber Laser for Time-Encoded Multiplex Coherent Raman Scattering Microscopy
Journal of Physical Chemistry B, 127 (11), pp. 2375–2380, DOI 10.1021/acs.jpcc.2c09115
- Hanus, V. et al.
Carrier-envelope phase on-chip scanner and control of laser beams
Nature Communications, 14 (1), DOI 10.1038/s41467-023-40802-z
- Hanus, V. et al.
Carrier envelope phase sensitivity of photoelectron circular dichroism
Physical Chemistry Chemical Physics, 25 (6), pp. 4656–4666, DOI 10.1039/d2cp03077b
- Hazra, M. et al.
Nonlinear polarization holography of nanoscale iridium films
New Journal of Physics, 25 (12), DOI 10.1088/1367-2630/ad0c83
- Jisha, C.P. et al.
Waveguiding driven by the Pancharatnam-Berry phase
Physical Review A, 107 (1), DOI 10.1103/PhysRevA.107.013523
- Junger, C.; B. Buch, G. Notni
Triangle-Mesh-Rasterization-Projection (TMRP): An Algorithm to Project a Point Cloud onto a Consistent, Dense and Accurate 2D Raster Image
Sensors, 23 (16), DOI 10.3390/s23167030
- Kahvedžić, R. et al.
Nondipole Effects in Atomic Ionization Induced by an Intense Counter-Rotating Bicircular Laser Field
Annalen der Physik, 535 (3), DOI 10.1002/andp.202200616
- Karst, M. et al.
Dispersion engineering in nonlinear multipass cells for high-quality pulse compression
Optics Letters, 48 (22), pp. 5899–5902, DOI 10.1364/OL.504014
- Karst, M. et al.
22-W average power high pulse energy multipass-cell-based post-compression in the green spectral range
Optics Letters, 48 (5), pp. 1300–1303, DOI 10.1364/OL.482600

- Kholaf, S.; C. Jauregui, J. Limpert
Mitigation of transverse mode instability by heat-load modulation
Optics Express, 31 (16), pp. 26496–26508, DOI 10.1364/OE.495830
- Kholaf, S. et al.
Characterization of transverse mode instability with a 4-quadrant photodiode
Optics Express, 31 (6), pp. 10633–10644, DOI 10.1364/OE.478961
- Kirsche, A. et al.
Continuously tunable high photon flux high harmonic source
Optics Express, 31 (2), pp. 2744–2753, DOI 10.1364/OE.474668
- Knoblich, M. et al.
Annular Gray Tone Lithography for the Fabrication of Rotationally Symmetric Continuous Relief Meso- and Microscale Optical Elements
Photonics, 10 (9), DOI 10.3390/photonics10091000
- Kohler, F.C. et al.
Fibula Nail versus Locking Plate Fixation—A Biomechanical Study
Journal of Clinical Medicine, 12 (2), DOI 10.3390/jcm12020698
- Krstić, A.; F. Setzpfandt, S. Saravi
Nonperturbative theory of spontaneous parametric down-conversion in open and dispersive optical systems
Physical Review Research, 5 (4), DOI 10.1103/PhysRevResearch.5.043228
- Kržič, A. et al.
Adjustable spatial filter for optimal free-space quantum communication round the clock
Optics Express, 31 (20), pp. 32362–32372, DOI 10.1364/OE.489022
- Kržič, A. et al.
Towards metropolitan free-space quantum networks
npj Quantum Information, 9 (1), DOI 10.1038/s41534-023-00754-0
- Kumar, A. et al.
Localized creation of yellow single photon emitting carbon complexes in hexagonal boron nitride
APL Materials, 11 (7), DOI 10.1063/5.0147560
- Kuppadakkath, A. et al.
Precision Tailoring Quasi-BIC Resonance of a-Si:H Metasurfaces
Nanomaterials, 13 (11), DOI 10.3390/nano13111810
- Lai, C. et al.
Design and test of a rigid endomicroscopic system for multimodal imaging and femtosecond laser ablation
Journal of Biomedical Optics, 28 (6), DOI 10.1117/1.JBO.28.6.066004
- Lee, M.-S.L. et al.
Wide band UV/Vis/NIR blazed-binary reflective gratings for spectro-imagers: two lithographic technologies investigation
Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 19 (1), DOI 10.1051/jeos/2023004
- Li, D. et al.
Trapping-induced quantum beats in a van-der-Waals heterostructure microcavity observed by two-dimensional micro-spectroscopy
Optical Materials Express, 13 (10), pp. 2798–1807, DOI 10.1364/OME.492545
- Li, W. et al.
Resonance Effect in Brunel Harmonic Generation in Thin Film Organic Semiconductors
Advanced Optical Materials, 11 (16), DOI 10.1002/adom.202203070
- Liu, C. et al.
Visualizing the ultra-structure of microorganisms using table-top extreme ultraviolet imaging
Photonix, 4 (1), DOI 10.1186/s43074-023-00084-6
- Loetgering, L. et al.
PtyLab.m/py/jl: a cross-platform, open-source inverse modeling toolbox for conventional and Fourier ptychography
Optics Express, 31 (9), pp. 13763–13797, DOI 10.1364/OE.485370
- Minneker, B. et al.
Critical Laser Intensity of Phase-Matched High-Order Harmonic Generation in Noble Gases
Photonics, 10 (1), DOI 10.3390/photonics10010024
- Möller, F. et al.
Polarization-resolved mode evolution in TMI-limited Yb-doped fiber amplifiers using a novel high-speed Stokes polarimeter
Optics Express, 31 (26), pp. 44486–44500, DOI 10.1364/OE.505716

Artikel Articles

- Munser, A.-S. et al.
Analysis of very low bacterial counts in small sample volumes using angle-resolved light scattering
Applied Optics, 62 (2), pp. 411–418, DOI 10.1364/AO.472968
- Occhicone, A. et al.
Enhanced fluorescence detection of miRNA by means of Bloch surface wave-based biochips
Analyst, 148 (18), pp. 4429–4437, DOI 10.1039/d3an00804e
- Occhicone, A. et al.
Detection of anti-SARS CoV-2 antibodies in human serum by means of Bloch surface waves on 1D photonic crystal biochips
Biosensors and Bioelectronics: X, 15, DOI 10.1016/j.biosx.2023.100413
- Oppermann, F. et al.
Mass-ratio dependent strong-field dissociation of artificial helium hydride isotopologues
Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 56 (11), DOI 10.1088/1361-6455/acb75
- Palma-Vega, G. et al.
TMI and polarization static energy transfer in Yb-doped low-NA PM fibers
Optics Express, 31 (15), pp. 24730–24738, DOI 10.1364/OE.486341
- Palma-Vega, G. et al.
Mitigation of transverse mode instability by modal birefringence in polarization-maintaining fibers
Optics Express, 31 (25), pp. 41301–41312, DOI 10.1364/OE.509198
- Paul, P. et al.
Atomically Thin Metal-Dielectric Heterostructures by Atomic Layer Deposition
ACS Applied Materials and Interfaces, 15 (18), pp. 22626–22636, DOI 10.1021/acsami.2c22590
- Penagos Molina, D.S. et al.
Broadband ptychography using curved wavefront illumination
Optics Express, 31 (16), pp. 26958–26968, DOI 10.1364/OE.495197
- Perevezentsev, E.A. et al.
First steps in the development of next-generation chirped volume Bragg gratings by means of fs laser inscription in fused silica
Optics Express, 31 (9), pp. 14286–14298, DOI 10.1364/OE.483214
- Rahimzadegan, A. et al.
Optically induced antiferromagnetic order in dielectric metasurfaces with complex supercells
Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, 40 (5), pp. 994–998, DOI 10.1364/JOSAB.478307
- Remesh, V. et al.
Compact chirped fiber Bragg gratings for single-photon generation from quantum dots
APL Photonics, 8 (10), DOI 10.1063/5.0164222
- Repp, D. et al.
Lasing modes in ZnO nanowires coupled to planar metals
Optics Express, 31 (2), pp. 3364–3378, DOI 10.1364/OE.480742
- Sachse, A. et al.
BMP-2 (and partially GDF-5) coating significantly accelerates and augments bone formation close to hydroxyapatite/tricalcium-phosphate/brushite implant cylinders for tibial bone defects in senile, osteopenic sheep
Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 34 (7), DOI 10.1007/s10856-023-06734-2
- Sancho-Parramon, J. et al.
Optical Characterization of Al Island Films: A Round Robin Test
Coatings, 13 (6), DOI 10.3390/coatings13061073
- Schmelz, D. et al.
Optical properties of black silicon structures ALD-coated with Al₂O₃
Nanotechnology, 34 (1), DOI 10.1088/1361-6528/ac9419
- Schmelz, D. et al.
Antireflection Structures for VIS and NIR on Arbitrarily Shaped Fused Silica Substrates with Colloidal Polystyrene Nanosphere Lithography
Micromachines, 14 (6), DOI 10.3390/mi14061204

- Schmelz, D. et al.
Investigations on black silicon nanostructures fabricated by reactive ion etching on highly curved surfaces
Materials Science in Semiconductor Processing, 165, DOI 10.1016/j.mssp.2023.107646
- Schmidt, L. et al.
Tailoring Wavelength-Selective Diffraction Efficiency Using Triple-Layer Double-Relief Blazed Gratings Incorporating Materials with Intersecting Dispersion Curves
Photonics, 10 (10), DOI 10.3390/photonics10101116
- Schmitt, P. et al.
Linear and Nonlinear Optical Properties of Iridium Nanoparticles Grown via Atomic Layer Deposition
Coatings, 13 (4), DOI 10.3390/coatings13040787
- Schulz, U. et al.
Broadband antireflection coatings with low polarization splitting
Applied Optics, 62 (7), pp. B87-B91, DOI 10.1364/AO.479539
- Sephton, B. et al.
Quantum transport of high-dimensional spatial information with a nonlinear detector
Nature Communications, 14 (1), DOI 10.1038/s41467-023-43949-x
- Sinibaldi, A. et al.
Direct Competitive Assay for ERBB2 Detection in Breast Cancer Cell Lysates Using 1-D Photonic Crystals-Based Biochips
IEEE Sensors Letters, 7 (8), DOI 10.1109/LENS.2023.3297372
- Spiess, C. et al.
Clock Synchronization with Correlated Photons
Physical Review Applied, 19 (5), DOI 10.1103/PhysRevApplied.19.054082
- Stark, H. et al.
Pulses of 32 mJ and 158 fs at 20-kHz repetition rate from a spatiotemporally combined fiber laser system
Optics Letters, 48 (11), pp. 3007–3010, DOI 10.1364/OL.488617
- Stark, S.L. et al.
Field curvature reduction in miniaturized high numerical aperture and large field-of-view objective lenses with sub 1 μm lateral resolution
Biomedical Optics Express, 14 (12), pp. 6190–6205, DOI 10.1364/BOE.499785
- Steinkopff, A. et al.
Analysis of optical core-to-core coupling: challenges and opportunities in multicore fiber amplifiers
Optics Express, 31 (17), pp. 28564–28574, DOI 10.1364/OE.498460
- Stenzel, O. et al.
A Model Surface for Calculating the Reflectance of Smooth and Rough Aluminum Layers in the Vacuum Ultraviolet Spectral Range
Coatings, 13 (1), DOI 10.3390/coatings13010122
- Stephan, B. et al.
OHO: A Multi-Modal, Multi-Purpose Dataset for Human-Robot Object Hand-Over
Sensors, 23 (18), DOI 10.3390/s23187807
- Topper, B. et al.
Impact of site-selective spectroscopy on laser cooling parameter characterization
Optics Express, 31 (12), pp. 20530–20544, DOI 10.1364/OE.493825
- Topper, B. et al.
Potential of ytterbium doped silica glass for solid-state optical refrigeration to below 200 K
Optics Express, 31 (2), pp. 3122–3133, DOI 10.1364/OE.481191
- Trost, M. et al.
Optical interference coatings: measurement problem 2022 [Invited]
Applied Optics, 62 (7), pp. B231-B238, DOI 10.1364/AO.480479
- Tugchin, B.N. et al.
Photoluminescence Enhancement of Monolayer WS₂ by n-Doping with an Optically Excited Gold Disk
Nano Letters, 23 (23), pp. 10848–10855, DOI 10.1021/acs.nanolett.3c03053
- Tünnermann, A.; C. Momma, S. Nolte
Perspective on ultrashort pulse laser micromachining
Applied Physics A: Materials Science and Processing, 129 (2), DOI 10.1007/s00339-023-06403-9
- Vitale, F. et al.
Tailoring nanowire lasing modes via coupling to metal gratings
Applied Physics Letters, 122 (10), DOI 10.1063/5.0134423

Artikel Articles

- Wang, L.; F. Setzpfandt, I. Shadrivov
Tunable anisotropic electro-optic metasurfaces
Optical Materials Express, 13 (11), pp. 3376–3383, DOI 10.1364/OME.499704
- Wang, Z. et al.
Nonlinear pulse compression to sub-two-cycle, 1.3 mJ pulses at 1.9 μm wavelength with 132 W average power
Optics Letters, 48 (10), pp. 2647–2650, DOI 10.1364/OL.487587
- Weichert, D. et al.
Explainable production planning under partial observability in high-precision manufacturing
Journal of Manufacturing Systems, 70, pp. 514–524, DOI 10.1016/j.jmsy.2023.08.009
- Werner, L. et al.
Extreme Refractive-, Diffractive- and Hybrid-Hyperchromats: Minimizing the Equivalent Abbe Number of a Two-Lens System
Photonics, 10 (5), DOI 10.3390/photonics10050556
- Willey, R.R.; O. Stenzel
Designing Optical Coatings with Incorporated Thin Metal Films
Coatings, 13 (2), DOI 10.3390/coatings13020369
- Wunsch, L. et al.
Data augmentation for solving industrial recognition tasks with underrepresented defect classes
Acta IMEKO, 12 (4), pp. 1–5, DOI 10.21014/ACTAIMEKO.V12I4.1320
- Zeitner, U.D.; M. Banasch, M. Trost
Potential of E-beam lithography for micro- and nano-optics fabrication on large areas
Journal of Micro/Nanopatterning, Materials and Metrology, 22 (4), DOI 10.1117/1.JMM.22.4.041405
- Zeitner, U.D. et al.
High efficiency transmission grating for the ESO CUBES UV spectrograph
Experimental Astronomy, 55 (1), pp. 281–300, DOI 10.1007/s10686-022-09840-1
- Zettlitzer, L. et al.
High efficiency transmission grating for the ESO CUBES UV spectrograph
Applied Optics, 55 (1), pp. 8390–8401, DOI 10.1364/AO.502846
- Zhang, Y.; R. Fütterer, G. Notni
Interactive robot teaching based on finger trajectory using multimodal RGB-D-T-data
Frontiers in Robotics and AI, 10, DOI 10.3389/frobt.2023.1120357
- Zhao, X. et al.
Spectral properties of IR-filamentation in air induced by 1 ps pulses for coherent anti-Stokes Raman scattering
OSA Continuum, 2 (4), pp. 720–726, DOI 10.1364/OPTCON.477461
- Ziems, K.M. et al.
Attosecond ionization dynamics of modulated, few-cycle XUV pulses
Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 56 (10), DOI 10.1088/1361-6455/acc4fa
- Zou, C. et al.
Multiresponsive Dielectric Metasurfaces Based on Dual Light- and Temperature-Responsive Copolymers
Advanced Optical Materials, 11 (5), DOI 10.1002/adom.202202187

Abschlussarbeiten

Theses

Bachelorarbeiten / Bachelor's theses

- Assma Choudna
Lichtinduzierte Dynamik in organischen Heterozyklen
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Andreas Dittrich
Entwicklung, Aufbau und Evaluierung der Steuerungselektronik und -software für ein hyperspektrales Beleuchtungssystem
Technische Universität Ilmenau
- Samuel Döpfner
Lifetime Characterization of Ultrashort Laser Pulse Written Fiber Bragg Gratings
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Hannah Ehrlich
Untersuchung zur laserlithografischen Herstellung effizienter, kombinierter Blazegitter als Grundlage für multifokale diffraktive Linsen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Clemens Grah
Gesputterte Chromschichten für die Elektronenstrahl-lithografie
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Heinrich Jäger
Time evolution of a three-level-two-mode cavity QED model
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tom Kretzschmar
Erzeugung und Charakterisierung von Einzelphotonemission an Defektstellen in Lösungsmittel-exfoliertem hexagonalem Bornitrid
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Moritz Lottmann
Surface metrology using multi-wavelength ptychography
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Lennart Notni
Optisches Übersprechen in Aperture Multiplexing Polarimetern
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Erik Prenzel
Automatization and Characterization of an Entangled Photon Pair Source for Two-Photon Fluorescence Applications
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Johannes Reents
Konzepte zur strukturierten Beleuchtung in der XUV-Bildgebung
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tim Rollwage
Grundlegende Untersuchungen zum Aufbau eines Versuchsprüfstandes zur Charakterisierung einer Spaltbaugruppe für die Anwendung in weitraumgebundenen Spektrometern
HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Göttingen
- Ahmed Mohammed Kamel Mahmoud Salem
Untersuchung zur Erkennung von recycelbaren Druckerpatronen und Konzeption für ein automatisiertes System zur Sortierung und Logistik
Technische Universität Ilmenau
- Niklas Scheck
Investigating Shor's algorithm for prime factoring using wave-optical methods
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Anna Tonndorf
Experimental study of the silicate bonding process of fused silica substrates for optical application
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tim Wiedemann
Setup Development and Analysis-Thermal Characterization of LPBF manufactured Copper Components
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Erik Prenzel
Automatization and characterization of an entangled photon pair source
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Abschlussarbeiten Theses

Masterarbeiten / Master's theses

- Manohar Adapa
Design, construction, and testing of a fluorescence add-on for a brightfield upright microscope
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Humam Alissa
Einfluss von Vibrationen auf streulichtbasierte Rauheitsmessungen
Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
- Muhammad Arsalan
AI-supported improvement of pose estimation of ChArUco markers for camera calibration
Technische Universität Ilmenau
- Sajib Barua
High-temperature sensors based on ultrafast laser written fiber Bragg gratings
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Domenica Romina Bermeo Alvaro
Four wave mixing in optical microstructured fibers for quantum applications
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Jennifer Buchheim
Development of a deep-ultraviolet structured illumination microscope
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Johanna Conrad
Engineering spectral purity of telecom wavelength photons for multi-partite quantum communication
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Aymen Demden
Optimierung des Klebprozesses für Touch-Folien zur Reduktion von internen Fehlerkosten und Effizienzverlusten unter Berücksichtigung der Bosch-Qualitätsprinzipien
Technische Universität Ilmenau
- Jan Thomas Dittmann
Anwendungsorientierte Charakterisierung des 3D-Scannings mit dem Apple iPhone 14 und Vergleich mit einem handgeführten 3D-Industriescanner
Technische Universität Ilmenau
- Ilia Elmanov
Frequency conversion in lithium niobate ring resonators
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Yuchao Feng
Holographic Pattern Projection Beyond Fraunhofer Approximation and Evaluation of Application
Technische Universität Ilmenau
- Nirvan Gajadharsingh
Evaluation of the modes of lithium niobate thin film waveguides for use in quantum spectroscopy
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tomi Getselev
Characterization of Photonic Filter Cavity Systems with Fourier-Transform Spectroscopy
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Sina Maria Gundermann
Auswertung multimodaler Messdaten eines sensorbasierten Wegerfassungssystems mit den Werkzeugen der Qualitätssicherung
Technische Universität Ilmenau
- Devansh Gupta
Photogrammetry to create a human model based on a real test person in VR environment
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Yugant Mukeshbhai Hadiyal
Concept and implementation of a post-processing scheme for quantum communication
Technische Universität Ilmenau
- Xiangrong He
Modeling and Characterization of Diamond-based Photonic Crystals
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tim Hebenstreit
Enhancing Quantum Key distribution with single-photon sources based on semiconductor quantum dots
Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Minjae Hong
Study of source for polarization entangled photon pairs with beam displacers
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tom Jungnickel
Optoelectronic properties of transition metal dichalcogenide heterostructures
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Yahia Khalil
Numerical and Experimental Investigations of a High-Power Multi-Core Fiber Oscillator
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Virajsinh Kher
Public Housing — A Narrative Literature Review
Bauhaus-Universität Weimar
- Anne Konrad
Quantenchemische Untersuchungen neuartiger radikalischer Monomere für polymerbasierte Batterien
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Leon Krause
Entwicklung eines Konzeptes für einen Mikrotiterplatten-Reader
Technische Universität Ilmenau
- Caroline Kuckwa
Herstellung und Charakterisierung photokatalytischer Titandioxidschichten und -nanostrukturen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Florian Kux
Einfluss von Material- und Struktureigenschaften auf die optischen Parameter von Aluminium Drahtgitterpolarisatoren
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Johannes Lahnor
Entwicklung von Strukturierungsprozessen hochfrequenter Gitter mittels NanoFrazor
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Markus Leipe
Pulsed SHG Sources for Quantum Technology Applications
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Leona Licht
Korrelative Fluoreszenzptychographie
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Zhiqiang Lin
Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings via Localized Femtosecond Photo-Treatment
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tom Lippoldt
Investigation of photocatalytic processes for greenhouse gas conversion using CARS spectroscopy
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Karen Lozano Mendez
Post-selection Free Franson Interference of Hyperentangled Quantum States
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Jiayi Lu
Process Simulation and Grayscale Photolithographic Patterning of Ultra-deep Optical Microstructures
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Muhammed Hassan Mahmood
Investigations of 3D reconstruction of uncooperative surface in the visible spectral range using deep stereo framework
Technische Universität Ilmenau
- Tjorben Matthes
Irradiation-Induced Creation of Single Photon Emitters in hBN
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Sixu Meng
Testing extended quantum theory with multi-photon states
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Pauline Pfaller
Multipass-Zellen basierte Pulskompression im grünen Spektralbereich
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Christian Pflegar
Modal characterization of optical fibers using singular value decomposition
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Raihan Rafi
Second Harmonic Generation in ALD Coated Guided Mode Resonant Gratings
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Abschlussarbeiten

Theses

- Hannes Richter
Realization of dispersive characterization of ultrashort pulse written Bragg gratings
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Corona Schmalian
Interferometrische Absolutmessung von Asphären mit Hilfe eines »gemultiplexten« CGHs
 Ernst-Abbe-Hochschule Jena

- Christoph Gabriel Schmidt
Untersuchungen zur Konzeption eines steuerbaren multispektralen Beleuchtungssystems
 Technische Universität Ilmenau

- Alwin Schönberg
Wavelength dependence of the ablation of kidney stones using ultrashort laser pulses
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Georg Schwartz
Polarization dependent characterization of femtosecond pulse written fiber Bragg gratings
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Anica Seufert
Untersuchung webbasierter Methoden zur Projekt-nachverfolgung mit Hinblick auf die Verbesserung bestehender Systeme und Normkonformität nach DIN ISO 9001:2015 in kleinen und mittelständischen Unternehmen
 Technische Universität Ilmenau

- Rahil Shajahan
Wavefront Sensorless Adaptive Optics using Eigen Modal gradient-based correction
 Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

- Harshitha Sirasanagandala
Inline imaging of layer thickness for transparent organic coatings by using fluorescencet dye
 Ernst-Abbe-Hochschule Jena

- Isabel Stäblein
Eine vergleichende Analyse der historischen Entwicklung von Genossenschaften im Allgemeinen, Wohnungsbaugenossenschaften im Speziellen, und dem Fallbeispiel der Wohnungsbaugenossenschaft Freie Scholle zu Berlin eG
 Bauhaus-Universität Weimar

- Xinyu Sun
Proof of Concept: Deep Learning based Ratio-of-Ratio Analysis for Irration-Free Contactless Pulse Oximetry
 Technische Universität Ilmenau

- Duygu Tatlidil
Laser induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) of Laser Powder Bed Fusion Specimen
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Anooj Thayyil Raveendran
Design and characterization of the optical detection beam path for a wide-field photothermal infrared microscope
 Ernst-Abbe-Hochschule Jena

- Priyanshu Tiwari
On-demand source of single photons based on atom-mediated nonlinear systems
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Josefine Weidner
Coworking Spaces in Bahnhofsquartieren – Eine Induktiv empirisch-qualitative Fallstudie
 Bauhaus-Universität Weimar

- Shuyun Xu
Investigation of the transformation of global warming gases in valuable raw materials with the help of photocatalysts
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Yuzhen Zhang
Theoretical and experimental determination of the tip temperature for thermal Scanning Probe Lithography
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Qingfei Zhu
Body features and face-mesh based video data cleaning for sleep condition monitoring
 Technische Universität Ilmenau

Promotionen / Dissertations

- Fabian Dröge
On the asymmetric excitation of molecular model aggregates under the influence of a spatially dependent plasmonic nanoparticle field
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Thorsten Göbel
Multi-channel spectral filtering by femtosecond written fiber Bragg gratings
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Matthias Heinzig
Diamantbasierte Raman-Oszillatoren
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Saurabh Mhatre
Asymmetries in strong-field dynamics of diatomic molecules
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Paul Pallabi
Development and properties of all-dielectric and metal-dielectric heterostructures at atomic scale
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Phillip Seeber
Developments in Multiscale ONIOM and Fragment Methods for Complex Chemical Systems
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Philipp Traber
Competing excited-state relaxation pathways in photocatalysis
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Andres Ricardo Vega Perez
Quantum imaging and polarimetry with two-color photon pairs
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Karl Michael Ziems
High-frequency light-matter interaction in atoms and molecules
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Schutzrechte

Intellectual Property

Patentoffenlegungen / Patent First Publications

- 17F 59163
Duparré, J.; Wippermann, F.
Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
EP 4 163 702 A1
- 20F 63332
Duparré, J.; Wippermann, F.; Tünnermann, A.
Abbildungsvorrichtung für projiziertes Punktmuster
CN 116235023 A / US 2023/0094595 A1
- 20F 63779
Blothe, M.; Chambonneau, M.; Nolte, S.; Kumkar, M.
Verfahren zum Zerteilen eines transparenten Werkstücks
EP 4 277 764 A0 / KR 10-2023-0130097 A
- 22F 65111
Steinlechner, F.; Ponce, M.; Gomez, R.; Sondenheimer, R.
Secure quantum communication
EP 4 287 551 A1
- 22F 65228
Bingel, A.; Schulz, U.; Gärtner, A.; Rickelt, F.; Munzert, P.; Schröder, S.
Transparente und leitfähige Schicht mit niedrigem Brechungsindex und Verfahren zu ihrer Herstellung
US 18/446,232
- 20F 63779
Blothe, M.; Chambonneau, M.; Nolte, S.; Kumkar, M.
Laserschneiden von Halbleitermaterial
CN 117222493 A / US 2023/0377970 A1

Patenterteilungen / Patent Assignment

- 22F 65228
Bingel, A.; Schulz, U.; Gärtner, A.; Rickelt, F.; Munzert, P.; Schröder, S.
Transparente und leitfähige Schicht mit niedrigem Brechungsindex und Verfahren zu ihrer Herstellung
DE 10 2022 120 892 B3
- 12F 53036
Schreiber, P.; Sieler, M.; Kraus, M.
Projektionsdisplay und Verfahren zum Projizieren eines Gesamtbildes
EP 2 831 660
- 12F 53241
Bräuer-Burchardt, C.; Notni, G.; Kühmstedt, P.
Verfahren und Vorrichtung zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur
DE 10 2012 013 079 B4
- 13F 54102
Eckstein, C.; Zeitner, U.
Elektromagnetische Strahlung streuendes Element
EP 2 959 331 B1
- 15F 57027
de Vries, O.; Plötner, M.; Limpert, J.
Reduktion der Pulsrepetitionsfrequenz eines gepulsten Lasersystems
EP 3 266 077 B1
- 15F 57634
Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs
EP 3 403 392 B1
- 15F 57776
von Finck, A.; Schröder, S.; Wilbrandt, S.; Stenzel, O.; Duparré, A.; Notni, G.
Optische Beschichtung und Verfahren zur Herstellung einer optischen Beschichtung mit verminderter Lichtstreuung
EP 3 420 386 B1
- 16F 58026
Gottschall, T.; Limpert, L.; Tünnermann, A.
Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von Laserpulsen
EP 3 411 754 B1/ US 11,579,512 B2

- 16F 58843
Schulz, U.; Munzert P.; Wolleb, S.; Rickelt, F.; Knopf, H.
Verfahren zur Herstellung eines reflexionsmindernden Schichtsystems
EP 3 559 710 B1
- 17F 59076
Duparré, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Oberdörster, A.
Multiaperaturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperaturabbildungsvorrichtung
EP 3 632 094 B1
- 17F 59163
Duparré, J.; Wippermann, F.
Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
JP 7 361 088
- 17F 59468
Limpert, J.; Tünnermann A.; Stihler, C. (FSU); Jauregui Misas, C. (FSU)
Vermeidung von Modeninstabilität in einer optischen Verstärkerfaser
EP 3 656 024
- 18F 61015
Nolte, S.; Richter, D. (IAP); Krämer, R. (IAP); Goebel, T.A. (IAP); Siems, M.P. (IAP)
Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung mittels interferierender Laserstrahlung
US 11,590,607 B2
- 18F 61183
Kinast, J.; Risse, S.
Spiegelträger für einen optischen Spiegel aus einem Verbundwerkstoff und Verfahren zu dessen Herstellung
CN ZL201980030779.2
- 18F 61276
Risse, S.; Gebhardt, A.; Beier, M.
Optisches Bauteil aus sprödhartem Material mit ultra-präzisen Referenz- und Montagestrukturen, Verfahren zur Herstellung sowie optisches System unter Verwendung des Bauteils oder Verfahrens
EP 3 820 685
- 18F 61549
Wippermann, F.; Duparré, J.
Vorrichtung mit einer Multiapertaturabbildungsvorrichtung zur Erzeugung einer Tiefenkarte
EP 3 900 317
- 18F 61550
Wippermann, F.; Duparré, J.; Brückner, A.
Vorrichtung mit einer Multiabbildungsvorrichtung zum Akkumulieren von Bildinformationen
TW I 794 571
- 18F 61707
Wippermann, F.; Duparré, J.
Multikanalabbildungsvorrichtung und Vorrichtung mit einer Multiaperaturabbildungsvorrichtung
CN ZL 2019 800 817 12.1 / JP 7 285 931 / US 11,611,736 B2
- 19F 62190
Limpert, J.; Rothhardt, Jan (GSI); Eschen, W. (FSU)
Verfahren und Vorrichtung zur linsenlosen Bildgebung mittels Fourier-Transformations-Holographie
DE 10 2020 101 994 B1
- 19F 62727
Gräfe, M.; Steinlechner, F.; Gilaberte Basset, M.
Device and Method for phase shifting digital holography with undetected photons
CA 3109688 C
- 20F 63347
Schulz, U.; Gärtner, A.; Gratzke, N.; Fücksel, K.; Rickelt, F.
Schichtsysteme und Verfahren zu ihrer Herstellung zur Absenkung Reflexion für breite Spektralbereiche und Lichteinfallswinkel bis 80°
DE 10 2020 118 959 B4
- 20F 63779
Blothe, M.; Chambonneau, M.; Nolte, S.; Kumkar, M.
Laserschneiden von Halbleitermaterial
DE 10 2021 100 675 B4 / US 18,221,501

Ausgewählte Vorlesungen

Selected lectures

- Prof. Dr. Anna-Katharina Grimm
Basic Marketing
Ostbayerisch Technische Hochschule Amberg-Weiden (OTH)
- apl. Prof. Uwe Zeitner
Introduction to Optical Modeling
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Adriana Szeghalmi
Vakuum- und Dünnschichtphysik
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Christian Mühlig
Moderne Laseranwendungen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Dr. Erik Beckert
Optikmontage
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Dr. Fabian Steinlechner
Quantum Communication
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Falk Eilenberger
Quantum Optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Frank Setzpfandt
Quantum Imaging and Sensing
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Markus Gräfe
Integrated Quantum Photonics
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Olaf Stenzel
Structure of Matter
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Robert Brüning
Mikrooptik
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Micro / Nanotechnology
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Gunther Notni
Bildverarbeitung für die Qualitätssicherung
Technische Universität Ilmenau
- Prof. Dr. Reinhold Pabst
Coaching und Führung
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Prof. Dr. Robert Brunner
Geometrische Optik
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Prof. Dr. Herbert Gross
Lens design
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Jens Limpert
Grundlagen der Laserphysik
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Stefan Nolte
Experimental Optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Thomas Hühn
Embedded Systems
Hochschule Nordhausen
- Prof. Dr. Thomas Pertsch
Computational Photonics
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Uwe Zeitner
Optics Design
Hochschule München



Bei uns denken Sie weniger in Problemen als in Lösungen.

Denn bei uns forschen Sie als Ingenieur*in sehr anwendungsbezogen für die Praxis. Deshalb machen wir aus einem Problem schnell eine Lösung und tragen so in sehr vielen Bereichen zu einer besseren Wirtschaft und Gesellschaft bei.



Kommen Sie ins Team Fraunhofer!
www.iof.fraunhofer.de

Veränderung startet mit uns.

The Fraunhofer-Gesellschaft

The Fraunhofer-Gesellschaft, based in Germany, is the world's leading applied research organization. Prioritizing key future-relevant technologies and commercializing its findings in business and industry, it plays a major role in the innovation process. A trailblazer and trendsetter in innovative developments and research excellence, the Fraunhofer-Gesellschaft supports science and industry with inspiring ideas and sustainable scientific and technological solutions and is helping shape our society and our future.

At the Fraunhofer-Gesellschaft, interdisciplinary research teams work with partners from industry and government to turn pioneering ideas into innovative technologies, coordinate and implement system-relevant research projects and strengthen the German and European economies with a commitment to value creation that is based on ethical values. International collaboration with outstanding research partners and companies from around the world brings the Fraunhofer-Gesellschaft into direct contact with the most prominent scientific communities and most influential economic regions.

Founded in 1949, the Fraunhofer-Gesellschaft currently operates 76 institutes and research units throughout Germany. Currently around 30,800 employees, predominantly scientists and engineers, work with an annual research budget of about 3.0 billion euros, 2.6 billion euros of which is designated as contract research. Around two thirds of Fraunhofer contract research revenue is generated from industry contracts and publicly funded research projects. The German federal and state governments contribute around another third as base funding, enabling the Fraunhofer

institutes to develop solutions now to problems that will drastically impact industry and society in the near future.

The impact of applied research goes far beyond the direct benefits to the client. Fraunhofer institutes strengthen companies' performance and efficiency and promote the acceptance of new technologies within society while also training the future generation of scientists and engineers that the economy so urgently requires.

As a scientific organization, the key to our success is highly motivated employees engaged in cutting-edge research. Fraunhofer therefore offers its researchers the opportunity to undertake independent, creative and, at the same time, targeted work. We help our employees develop professional and personal skills that will enable them to take up positions of responsibility within Fraunhofer itself or at universities, within industry and in society at large. Students involved in projects at Fraunhofer institutes have excellent career prospects on account of the practical vocational training they enjoy and the opportunity to interact with contract partners at an early stage in their career.

The Fraunhofer-Gesellschaft is a recognized non-profit organization named after Joseph von Fraunhofer (1787—1826), an illustrious researcher, inventor and entrepreneur hailing from Munich.

Figures as of: March 2023

www.fraunhofer.de

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 807-202
andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de

Redaktion | Editorial staff

Dr. Robert Kammel
Dr. Stefan Riehemann
Desiree Haak
Sina Seidenstücker
Annemarie Lippold

Fotos und 3D-Visualisierungen | Photos and 3D visualizations

Walter Oppel
Christian Süß

Gestaltung | Graphic Design

Anne Walterfang

Redaktionsschluss | Editorial deadline

31.3.2023

Druck | Print

Druckhaus Gera GmbH
Jacob-A.-Morand-Straße 16
07552 Gera
www.druckhaus-gera.de

