

Jahresbericht / Annual Report

2024
SCIENCE IN FOCUS

we love
photonics



Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF

Science in Focus

Jahresbericht 2024

Annual Report 2024

Inhalt

Grußwort	4
-----------------------	----------

Unser Institut	8
-----------------------------	----------

Wissenschaftliche Highlights	16
---	-----------

ESA-Mission CO2M: Optik für Treibhausgas-Monitoring	18
FORUM: Mit Diamanten gegen den Klimawandel	20
Verlustarme Wellenleiter in Dünnschicht-lithiumniobat	22
Neue optische Bodenstation für Jena	24
Neue Perspektiven für die Bildgebung mit Quanten-Off-Axis-Holographie	26
QuNET: Quantenkommunikation in Berlin erfolgreich demonstriert	28
Maskenlose mikrooptische Scheinwerfer	30
Parallele spektrale Messungen mit miniaturisierter Optik	32
Miniaturisierte Infrarot-Optik für Sicherheitsanwendungen	34
Optische Laserkühlung: Neues Verfahren kühlt Quarzglas um 67 K	36
Spektrale Kombination zu 2 kW im augensicheren Bereich um 2 µm	38
Kompakter Resonator für das Einstein-Teleskop	40
Rainbow: Hyperspektrales Spektrometer-on-Chip für Smart Farming	42
Prognose kontaminationsinduzierten Streulichts in optischen Systemen	44
3D-Sensor für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Fahrzeugen	46
Mobile 3D-Vermessung mit Schreitroboter	48

Weitere Jahreshighlights	50
---------------------------------------	-----------

Bundespräsident besucht das Fraunhofer IOF ..	53
Andreas Tünnermann mit Bundesverdienstkreuz ausgezeichnet	56
Jenaer Forschungsprojekt Speed erhält Bundesförderung in Millionenhöhe	59
Applied Photonics Award 2024	62
Photonics Days Jena 2024	65
Neuer Innovationsimpuls für Thüringen	68
Politische Besuche am Fraunhofer IOF	70
Lange Nacht der Wissenschaften Jena 2024 ..	74
Mission »BepiColombo«	77
Unser neuestes Forschungsgebäude	78

Auszeichnungen	82
-----------------------------	-----------

Jenaer Forscherteam erhält Thüringer Forschungspreis	84
EPS-QEOD-Preis 2024 an Jens Limpert und Jan Rothhardt verliehen	86
SPIE Photonics Europe	88
SPIE Photonics West	90
Dr.-Ing. Siegfried Werth Preis für Anne-Sophie Munser	92
WLT-Preis für innovative Fügetechnologien ..	94

Zahlen und Strategische Initiativen	96
--	-----------

Das Institut in Zahlen	98
------------------------------	----

Anhang	106
---------------------	------------

Content

Foreword	4
-----------------------	----------

Our Institute	9
----------------------------	----------

Scientific Highlights	16
------------------------------------	-----------

ESA CO2M mission: optics for greenhouse gas monitoring.	18
FORUM: Using diamonds to combat climate change.	20
Low-loss waveguides in thin-film lithium niobate	22
New optical ground station for Jena.	24
New perspectives for imaging with quantum off-axis holography	26
QuNET: Quantum communication successfully demonstrated in Berlin.	28
Maskless micro-optical headlights	30
Parallel spectral measurements with miniaturized optics.	32
Miniaturized infrared optics for safety applications.	34
Optical laser cooling: new method cools silica glass by 67 K	36
Spectral beam combining up to 2 kW in the eye-safe region around 2 μ m	38
Compact resonator for the Einstein Telescope.	40
Rainbow: hyperspectral spectrometer-on-chip for smart farming.	42
Prediction of contamination induced stray light in optical systems.	44
3D sensor for high-speed recordings in vehicles	46
Mobile 3D measurement with walking robot .	48

Additional Highlights of the Year	50
--	-----------

German President visits Fraunhofer IOF	53
Andreas Tünnermann honored with Order of Merit of the Federal Republic of Germany ...	56
Jena research project SpeedD receives millions in federal funding	59
Applied Photonics Award 2024	62
Photonics Days Jena 2024	65
New innovation impulse for Thuringia	68
Political visits to Fraunhofer IOF	70
Long Night of Science 2024	74
Mission 'BepiColombo'	77
Our newest research building.	78

Awards	82
---------------------	-----------

Jena research team receives 'Thüringer Forschungspreis' (Thuringian Research Prize) .	84
EPS-QEOD Prize 2024 awarded to Jens Limpert and Jan Rothhardt	86
SPIE Photonics Europe	88
SPIE Photonics West.	90
Dr.-Ing. Siegfried Werth Prize for Anne-Sophie Munser	92
WLT prize for innovative bonding technologies	94

Figures and Strategic Projects	96
---	-----------

The institute in figures	98
-------------------------------	----

Appendix	106
-----------------------	------------

Grußwort

Foreword



Als Institut der Fraunhofer-Gesellschaft ist es unsere Mission, zukunftsweisende Themen für Wissenschaft, Gesellschaft und Wirtschaft frühzeitig zu identifizieren und aktiv an deren Entwicklung sowie Umsetzung mitzuwirken. Gemeinsam mit herausragenden Partnern setzen wir diese Themen in konkrete Anwendungen um. Im vergangenen Jahr konnten wir nicht nur erneut bedeutende Fortschritte in unserer Forschung erzielen, sondern auch unsere Position als führendes Zentrum für photonische Technologien in Deutschland und Europa weiter stärken.

Eine außerordentliche Anerkennung für die Entwicklung unseres Instituts war der Besuch des Bundespräsidenten Frank-Walter Steinmeier am Fraunhofer IOF. Im Rahmen seiner Themenreise unter dem Titel »Werkstatt des Wandels« besuchte er am 22. Februar 2024 in Jena Orte, die gesellschaftliche Umbrüche sowie wirtschaftliche Transformationen sichtbar gemacht haben. Seine Reise war zugleich eine Ermutigung, Herausforderungen, die aus gesellschaftlichen und ökonomischen Veränderungen entstehen, als Chancen zu betrachten und aktiv zu nutzen, um Zukunft zu gestalten. Sein Besuch in der Lichtstadt hob dabei insbesondere die herausragende Entwicklung der Region hervor, die sich trotz historischer Umbrüche von einem Traditionsstandort zu einem der international angesehensten Zentren der internationalen Optik- und Photonik-Branche entwickelt hat. Dieses Erbe und den damit verbundenen Auftrag für die Zukunft tragen wir als Fraunhofer IOF stolz weiter.

Als Schlüsseltechnologie stellt die Photonik einzigartige Potentiale bereit, um Antworten auf zentrale Fragen aus Gesellschaft und Wirtschaft zu finden. Eine der sicherlich größten Herausforderungen unserer Zeit ist und bleibt die Bekämpfung des menschengemachten Klimawandels: Mit der Entwicklung optischer Baugruppen für die Raumfahrt, beispielsweise den Spektrometern für die CO2M-Mission der ESA, hat unser Institut 2024 erneut einen wertvollen Beitrag zur Klimaforschung geleistet. Die Arbeiten unserer Forschenden sind entscheidend

As an institute of the Fraunhofer-Gesellschaft, it is our mission to identify forward-looking topics for science, society, and industry at an early stage and to play an active role in their development and implementation. With outstanding partners, we transform these topics into concrete applications. Last year, we not only made significant advancements in our research, but also further reinforced our position as a leading center for photonic technologies in Germany and in Europe.

German President Frank-Walter Steinmeier's visit to Fraunhofer IOF was a remarkable acknowledgement of the development of our institute. As part of his themed trip entitled 'Workshop of Change', he visited locations in Jena on February 22, 2024 that have made social changes and economic transformations visible. His trip also served to encourage viewing the challenges arising from social and economic changes as opportunities to be actively used to shape the future. His visit to the City of Light particularly highlighted the outstanding development of the region, which has evolved from a traditional location into one of the most internationally renowned centers of the international optics and photonics industry despite historical upheavals. At Fraunhofer IOF, we are proud to continue this legacy and its mission for the future.

As a key technology, photonics offers unique potential to find answers to central questions from society and the economy. One of the most pressing challenges of our time is combatting man-made climate change: through the development of optical assemblies for space travel, such as the spectrometers for ESA's CO2M mission, our institute once again made a valuable contribution to climate research in 2024. Our researchers' work is crucial for investigating man-made emissions and the distribution of greenhouse gases in the Earth's atmosphere with spatial resolution. This allows for a deeper understanding of our impact on the climate and derive targeted protective measures for our environment.

dafür, menschengemachte Emission und die Verteilung von Treibhausgasen in der Erdatmosphäre orts aufgelöst zu untersuchen. Dadurch können wir unsere Einflüsse auf das Klima besser verstehen und gezielte Schutzmaßnahmen für unsere Umwelt ableiten.

Um umweltschädliche Treibhausgase künftig zu reduzieren, ist außerdem die Suche nach Möglichkeiten zur emissionsfreien Energieversorgung ein wichtiges Forschungsfeld. Auch hier bietet die Photonik grundlegende, neue Konzepte an. In mehreren komplementären Forschungsvorhaben zur laserbasierten Kernfusion entwickeln die Forschenden des Fraunhofer IOF daher künftig leistungsstarke Strahlquellen und optische Bauelemente, die höchsten Ansprüchen genügen. Diese Technologien sollen nicht nur die neue Form der Energiegewinnung ermöglichen, sondern auch Anwendung in Märkten mit besonderen Qualitäts- und Leistungsanforderungen, wie etwa der Lithographie und der Astronomie, finden.

Unser Wissen über die Natur wächst beständig weiter: Die Entwicklung der Quantenmechanik vor etwa 100 Jahren hat unser grundlegendes Verständnis der Natur revolutioniert. Heute finden die Erkenntnisse der Quantenmechanik in nahezu allen Lebensbereichen Anwendung. Die UN würdigt diese außergewöhnlichen Entwicklungen, indem sie das Jahr 2025 zum »Internationalen Jahr der Quantenwissenschaft und Quantentechnologien« erklärt hat. Auch für uns ist die Nutzung quantenmechanischer Eigenschaften ein zentrales Anliegen unserer Arbeit. Im Rahmen der strategischen BMBF-Initiative QuNET konnten wir 2024 erneut wegweisende Schlüsselexperimente realisieren und verschiedene eigens entwickelte quantenkryptographische Systeme zu einem urbanen Netzwerk, bestehend aus freistrahl- und faserbasierten Übertragungskanälen, verbinden. So konnte der quantengesicherte Datenaustausch zwischen mehreren Kommunikationspartnern über ein heterogenes Netz erfolgreich demonstriert werden.

Um eine praktisch abhörsichere Kommunikation nicht nur in urbanen, sondern perspektivisch sogar globalen Entfernungen zu ermöglichen, entwickelte zudem ein Forschungskonsortium unter Leitung des Fraunhofer IOF 2024 im Projekt CubEniK eine Nutzlast für einen ultrakompakten Kommunikationssatelliten, einen sogenannten »CubeSat«. Ziel eines solchen Mini-Satelliten ist es, einen sicheren Quantenschlüssel über eine Entfernung von 300 Kilometern zwischen zwei Bodenstationen in Jena und München zu übertragen.

Ein besonderes Zukunftsthema stellen darüber hinaus Entwicklungen und Anwendungen im Bereich der Datenanalyse und künstlichen Intelligenz dar. Durch ganzheitliche Ansätze im Optik- und Prozessdesign sowie in automatisierten Auswertungsprozessen zur Qualitätssicherung setzen unsere Forschenden diese neuen Verfahren aktiv ein, um innovative Konzepte in der Optik und Photonik zu entwickeln. In

To reduce environmentally harmful greenhouse gases in the future, the search for possibilities for emission-free energy supply is also a vital field of research. Photonics offers fundamental new concepts here too. As part of several complementary research projects on laser-based nuclear fusion, researchers at Fraunhofer IOF are developing high-performance beam sources and optical components that meet the highest standards. These technologies should not only enable the new form of energy generation, but also find an application in markets with special quality and performance requirements, such as lithography and astronomy.

Our knowledge of nature is continuously expanding: the development of quantum mechanics around a century ago revolutionized our fundamental understanding of nature. Today, the findings of quantum mechanics are used in nearly all aspects of life. The UN has recognized these extraordinary developments by declaring 2025 the 'International Year of Quantum



Die Forschenden präsentieren dem Bundespräsidenten einen neuen mobilen 3D-Sensor / The researchers present a new mobile 3D sensor to the Federal President

Science and Technologies'. The use of quantum mechanical properties is also a core focus of our work. As part of the BMBF's strategic QuNET initiative, we were once again able to conduct groundbreaking key experiments in 2024 and connect various specially developed quantum cryptographic systems to form an urban network consisting of free-beam and fiber-based transmission channels. This enabled us to successfully demonstrate quantum-secure data exchange between multiple communication partners via a heterogeneous network.

To facilitate practically tap-proof communication not only in urban areas, but even at global distances in the future, ►

Forschungsprojekten wie PhoQuant arbeiten wir zudem an neuartigen Lösungen für leistungsfähige und gleichzeitig energieeffiziente Computing-Technologien.

Einen bedeutenden Schritt für die Infrastruktur unseres Hauses stellte 2024 zudem die fortschreitende Konstruktion unseres dritten Forschungsgebäudes dar. Mit diesem erneuten Ausbau unseres Standortes auf dem Jenaer Beutenberg Campus sind wir künftig optimal ausgestattet, um herausragende Forschung in zukunftsweisenden Bereichen wie Quantentechnologien, Laserforschung und Ultrapräzisionsbearbeitung voranzutreiben.

Diese Entwicklungen werden ergänzt durch die Antragstellung für ein »National Laboratory for Photonic Science and Technology (NLP)« im Rahmen des Priorisierungsverfahrens für umfangreiche Forschungsinfrastrukturen (FIS) des BMBF. Gemeinsam mit den Kompetenzen unserer Partnerinstitute – dem Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik (Heinrich-Hertz-Institut, HHI) und dem Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts – wollen wir technologische Lösungen entwickeln und Anwendungen ermöglichen, die auf den außergewöhnlichen Eigenschaften des Lichts als universellem Träger von Information und Energie basieren. So stärken wir nachhaltig die wissenschaftliche Exzellenz und industrielle Wettbewerbsfähigkeit des nationalen und europäischen Innovationsökosystems.

Die Max Planck School of Photonics (MPSP) konzentrierte sich 2024 nach dem positiven Evaluationsergebnis auf die Verstetigung ihres Programms. Die Voraussetzungen sind

a research consortium led by Fraunhofer IOF developed a payload for an ultra-compact communication satellite, known as 'CubeSat', as part of the CubEniK project in 2024. The aim of such a mini-satellite is to transmit a secure quantum key over a distance of 300 kilometers between two ground stations in Jena and Munich.

Advances and applications in data analysis and artificial intelligence also represent a key area of future research. Through holistic approaches in optics, process design and automated evaluation processes for quality assurance, our researchers actively employ these new methods to develop innovative concepts in optics and photonics. In research projects such as PhoQuant, we are also developing novel solutions for high-performance and energy-efficient computing technologies.

The ongoing construction of our third research building in 2024 marked a significant milestone for the infrastructure of our institute. With this further expansion of our facilities on the Jena Beutenberg Campus, we will be optimally equipped in the future to advance outstanding research in pioneering areas such as quantum technologies, laser research and ultra-precision machining.

These developments are complemented by the application for a 'National Laboratory for Photonic Science and Technology (NLP)' as part of the BMBF's prioritization process for extensive research infrastructures (FIS). In collaboration with the expertise of our partner institutes — the Fraunhofer Institute for Telecommunications (Heinrich Hertz Institute, HHI) and the Max Planck Institute for the Science of Light — we aim to develop technological solutions and enable applications that harness the extraordinary properties of light as a universal carrier of information and energy. In this way, we sustainably strengthen the scientific excellence and industrial competitiveness of the national and European innovation ecosystem.

Following the positive evaluation result, the Max Planck School of Photonics (MPSP) focused on the continuation of its program in 2024. The conditions have been established to ensure that the successful program, which currently has 120 participants, can continue beyond the pilot phase. By the end of the seven-year pilot phase in 2024, a total of 16 alumni will have successfully completed the MPSP program and will be pursuing careers in research, industry, politics, and their own start-ups.

With our excellent partners from industry and business, we once again transferred numerous innovations from our research and development into relevant applications last year. We were particularly successful in emerging and high-growth markets such as laser technology, production, lithography, microelectronics, optical sensor technology, and imaging as well as mobility and security. Despite general economic challenges, these cooperation projects enabled us to create



Neuestes Forschungsgebäude mit Astrokuppel auf dem Beutenberg Campus / The newest research building with an astrodome on the Beutenberg Campus

geschaffen, damit das erfolgreiche Programm, das derzeit 120 Teilnehmende umfasst, auch nach Abschluss der Pilotphase fortgeführt werden kann. Bis zum Ende der siebenjährigen Pilotphase im Jahr 2024 haben insgesamt 16 Alumni das Programm der MPSP erfolgreich abgeschlossen und verfolgen nun Karrierewege in Forschung, Industrie, Politik sowie eigenen Unternehmensgründungen.

Gemeinsam mit unseren exzellenten Partnern aus der Industrie und Wirtschaft haben wir im vergangenen Jahr erneut zahlreiche Innovationen aus unserer Forschung und Entwicklung in relevante Anwendungen überführt. Besonders im Bereich der Zukunfts- und Wachstumsmärkte wie Lasertechnologie, Produktion, Lithographie, Mikroelektronik, optische Sensorik und Bildgebung sowie Mobilität und Sicherheit konnten wir Erfolge erzielen. Diese Kooperationsprojekte ermöglichten es uns, trotz allgemeiner wirtschaftlicher Herausforderungen Innovationen mit Mehrwert für die Gesellschaft zu schaffen und das Geschäftsjahr erfolgreich abzuschließen.

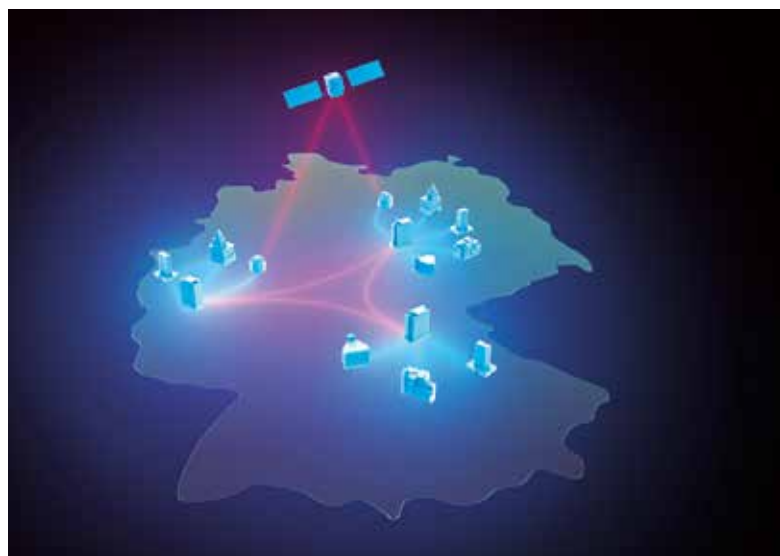
Ich möchte unseren Partnern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik sowie unseren Fördermittelgebern und kooperierenden Einrichtungen meinen besonderen Dank für die vertrauensvolle Zusammenarbeit aussprechen. Diese engen Kooperationen ermöglichen es uns, technologischen, wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen zu begegnen und durch ihre gemeinsame Lösung unsere Zukunft aktiv zu gestalten.

Ein ganz besonderer Moment für mich persönlich war im vergangenen Jahr überdies die Auszeichnung mit dem Bundesverdienstkreuz der Bundesrepublik Deutschland. Diese außerordentliche Ehre wäre ohne so manche Weggefährten, der mich auf meiner Reise immer wieder gefordert und gefördert haben, nicht möglich gewesen. Ihnen gilt mein tiefverbundener Dank.

Abschließend möchte ich aufrichtig allen Mitarbeitenden des Fraunhofer IOF danken, die mit ihrem engagierten Einsatz und ihrer fachlichen Expertise den Grundstein unseres Erfolges legen. Gemeinsam werden wir auch in Zukunft wichtige Themen für Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft vorantreiben. Ich freue mich auf die neuen Herausforderungen, die vor uns liegen, und bin überzeugt, dass wir gemeinsam weiterhin wegweisende Antworten finden werden.

Ihr / Your

Andreas Tünnermann
Leiter des Fraunhofer IOF / Director of Fraunhofer IOF



*QuNET-Initiative: Demonstration quantengesicherter
Mehrparteien-Kommunikationsnetzwerke / QuNET
initiative: demonstration of quantum-secure multi-user
communication networks*

innovations with added value for society and bring the financial year to a successful close.

I would like to express my special thanks to our partners from business, science and politics as well as our funding bodies and cooperating institutions for their trusting cooperation. These close collaborations enable us to meet technological, scientific, economic, and social challenges and actively shape our future by finding solutions together.

A particularly meaningful moment for me personally last year was receiving the Order of Merit of the Federal Republic of Germany. This extraordinary honor would not have been possible without many companions who have continuously challenged and encouraged me on my journey. I would like to express my deepest gratitude to them.

Finally, I would like to express my sincere thanks to all employees of Fraunhofer IOF, whose commitment and expertise have laid the foundation for our success. Together, we will continue to drive forward important topics for industry, science, and society in the future. I look forward to the new challenges that lie ahead of us and am confident that we will continue to find pioneering answers together.



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 of numerous 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

Anja Riedel



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. Henrik von Lukowicz



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

Prof. Dr. Fabian Steinlechner



STRATEGIC PROJECTS



QuNET
Quantum secure IT infrastructure



QUANTIFISENS
RUBIN-Alliance



AMI
RUBIN-Alliance



Fraunhofer-Zentrum Erfurt
Collaborative research center



Fraunhofer CAPS
Cluster of Excellence
Advanced Photon Sources



Max Planck School of Photonics
Graduate school



Leistungszentrum Photonik
Center of Excellence



Digital Innovation Hub Photonics
Hub for start-ups



de:hub
Digital Hub Initiative

Kuratorium / Advisory committee

Vorsitzender / Chair

- Dr. Michael Mertin
CeramTech Gruppe

Mitglieder / Members

- Christian Amann
- Peggy Bärenklau
- Dominique Bouwes
- Gabi Grützner
- Dr. Holger Junge
- Katrin Kobe
- Jana Podßuweit
- Prof. Dr. Walter Rosenthal
- Dr. Eveline Rudigier-Voigt
- Prof. Dr. Christine Silberhorn
- Prof. Dr. Thomas Stoehlker
- Dr. Joachim Stühler
- Thomas Thöniß
- Dr. Stefan Traeger
- Dr. Dennis Weise
- Dr. Petra Wolff
- Dr. Hagen Zimer
- BMW Group
- microfluidic ChipShop GmbH
- SaxonQ GmbH
- microresist technology
- VDI Technologiezentrum GmbH
- Robert Bosch GmbH
- Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur
- HRK Hochschulrektorenkonferenz
- Schott AG
- Universität Paderborn
- Helmholtz-Institut Jena
- Carl Zeiss SMT GmbH
- Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG
- Jenoptik AG
- Airbus Defence and Space
- Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Trumpf GmbH + Co. KG

Stand: 31.12.2024

Wissenschaftliche Fachabteilungen Scientific Departments

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

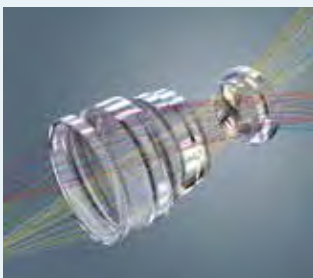
Dr. Stefan Risse

Scientific research groups

- **Metal Optics**
Dr. Nils Heidler
- **Surface Technologies**
Dr. Jan Kinast

- **Precision Systems**
Dr. Stefan Risse
- **Bonding Technologies**
Dr. Carolin Rothhardt

Optical and Mechanical System Design



Research focus

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

Head of department

Dr. Henrik von Lukowicz

Scientific research group leaders

- **Advanced Optical Design**
Dr. Christian Vetter

- **3Micro-Optical Systems**
Dr. Norbert Danz
- **Opto-Mechanical Design**
Dr. Christian Scheffler

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

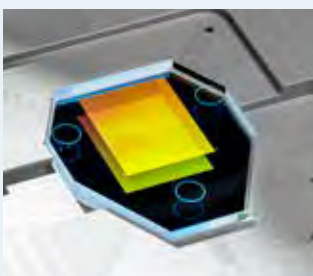
Dr. Sven Schröder

Scientific research groups

- **Coating of Plastic Optics**
Dr. Astrid Bingel
- **Precision Optics**
Dr. Stefan Schwinde

- **Conformal Coatings**
Dr. Adriana Szeghalmi
- **Surface and Coating Characterization**
Dr. Sven Schröder

Micro- and Nanostructured Optics



Research focus

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

Head of department

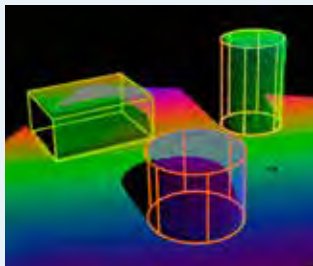
Dr. Falk Eilenberger

Scientific research group leaders

- **Center for Advanced Micro- and Nano-Optics**
Dr. Martin Rumpel

- **Advanced Microoptical Components**
Dr. Robert Leitel
- **Integrated Photonic Systems**
Dr. Sebastian Schmitt
Dr. Reinhard Geiß

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

■ 3D Sensing

Dr. Stefan Heist

Scientific research group leaders

- Image Processing and AI
Dr. Andreas Breitbarth

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 group leaders

- Laser Technology
Dr. Till Walbaum

■ Fiber Technology

Dr. Nicoletta Haarlammert

■ IAP

Prof. Dr. Jens Limpert

■ Adaptive & Active Optics

Dr. Matthias Goy

Opto-mechatronic 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 group leaders

- Microassembly and Inkjet Printing
Dr. Falk Kemper

■ CO₂ Laser Processing and System Engineering

Dr. Erik Beckert

Photonic Quantum Systems



Research focus

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

Head of department

Prof. Dr. Fabian Steinlechner

Scientific research group leaders

- Quantum Cryptosystems
Dr. Christopher Spiess
- Quantum Information Technology
Dr. Fabian Steinlechner
- Quantum Imaging
Dr. Valerio Flavio Gili

■ Multi-Mode Quantum Photonics

Dr. Fabian Steinlechner

■ Terrestrial Networks

Dr. Thorsten A. Goebel

■ Satellite Networks

Dr. Carlos Andres Melo Luna

Geschäftsfelder des Fraunhofer IOF

Business Areas of Fraunhofer IOF



Optische Systeme

Das Fraunhofer IOF verfügt über modernste Prozessketten für optische Komponenten und Systeme – vom Design über die Fertigung bis hin zur Systemintegration. Anwendungen decken den gesamten Spektralbereich von EUV bis THz ab. Neben der Herstellung konventioneller asphärischer Optiken entwickelt das Fraunhofer IOF moderne Freiformoptiken sowie adaptive Optiken bis 500 mm Durchmesser. Auf Basis hochauflösender lithographischer Technologien werden Mikro- und Nanostrukturen für zukünftige photonische Anwendungen realisiert.

Die Technologieketten sind hybrid kombinierbar. Schwerpunkte liegen in den Bereichen der Instrumentierung für Space-/Astro-Systeme, des Equipments für Lithographie-Systeme, mikro- und nanooptischer Komponenten sowie optischer Sicherheits- und Kommunikationssysteme.

Optical Systems

Fraunhofer IOF offers state-of-the-art process chains for optical components and systems, from design to manufacturing and system integration. Applications span the entire spectral range from EUV to THz. In addition to producing conventional aspherical optics, Fraunhofer IOF develops modern free-form optics and adaptive optics up to 500 mm in diameter. Micro- and nanostructures for future photonic applications are realized on the basis of high-resolution lithographic technologies.

The technology chains can be combined in hybrid form. The main focus is on instrumentation for space/astro systems, equipment for lithography systems, micro- and nano-optical components, and optical security and communication systems.



Lichtquellen und Laser

Mit umfassender Expertise im Design von Fasern 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 Multi-kilowatt-Bereich erzeugen. Sie kommen in verschiedenen industriellen Applikationen und Märkten zum Einsatz und ermöglichen visionäre Anwendungen – von Messtechnik und photonischen Quantentechnologien bis hin zur hochpräzisen Materialbearbeitung, Sicherheit und lasergestützten Kernfusion.

Light Sources and Lasers

With its extensive expertise in the design of fibers and laser systems, and its research into new materials and technologies including 'secondary sources', Fraunhofer IOF is able to develop and manufacture customized optical components such as active and passive fibers and beam guidance systems. This enables the realization of compact light sources and powerful laser concepts with tailored parameters. These light sources cover a broad wavelength range from EUV/XUV to IR and can generate continuous or pulsed radiation with powers in the multi-kilowatt range. They are used in various industrial applications and markets, enabling visionary applications, from metrology and photonic quantum technologies to high-precision materials processing, security, and laser-based nuclear fusion.



Photonische Quantentechnologie

Als einer der führenden Akteure in der angewandten Quantenphotonik in Europa steht die Erforschung und Entwicklung neuartiger photonischer Quantensysteme mit herausragenden Eigenschaften für Wissenschaft und Wirtschaft im Fokus des Fraunhofer IOF. Insbesondere werden Entwicklungen wie abhörsichere Quantenkommunikation, rauscharme Quantenabbildungssysteme und photonische Quantencomputer vorangetrieben. Durch den Einsatz geschlossener (quanten)-phonischer Prozessketten mit Alleinstellungsmerkmalen in den notwendigen Technologien ist das Fraunhofer IOF in der Lage, quantenoptische Komponenten und Systeme zu designen, zu realisieren, zu optimieren sowie zu miniaturisieren und effizient zu integrieren. Dies umfasst die gesamte Prozesskette, von der Modellierung über den Systemaufbau bis hin zur Qualifizierung und Demonstration anwendungsspezifischer Prototypen für unsere Kunden.

Photonic Quantum Technology

As one of Europe's leading players in applied quantum photonics, Fraunhofer IOF focuses on the research and development of novel photonic quantum systems with outstanding properties for science and industry. In particular, developments such as tap-proof quantum communication, low-noise quantum imaging systems, and photonic quantum computers are being advanced. By employing closed (quantum) photonic process chains with unique selling points in the necessary technologies, Fraunhofer IOF is able to design, realize, optimize, miniaturize, and efficiently integrate quantum optical components and systems. This encompasses the entire process chain from modeling and system design to the qualification and demonstration of application-specific prototypes for our customers.



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, Biotechnologie und Land- und Forstwirtschaft. Das breite Spektrum umfasst ultraschnelle und multimodale 3D-Messsysteme, die auf Muster und Streifenprojektion basieren, ebenso wie ultraflache und Multi-Apertur-Kameras für die spektrale Bildgebung bis hin zu Systemen zur Oberflächen- und Schichtcharakterisierung. Darüber hinaus werden am Institut spezialisierte Anwendungen wie biophotonische Sensoren, Fasersensorik und Unterwassersensorik entwickelt.

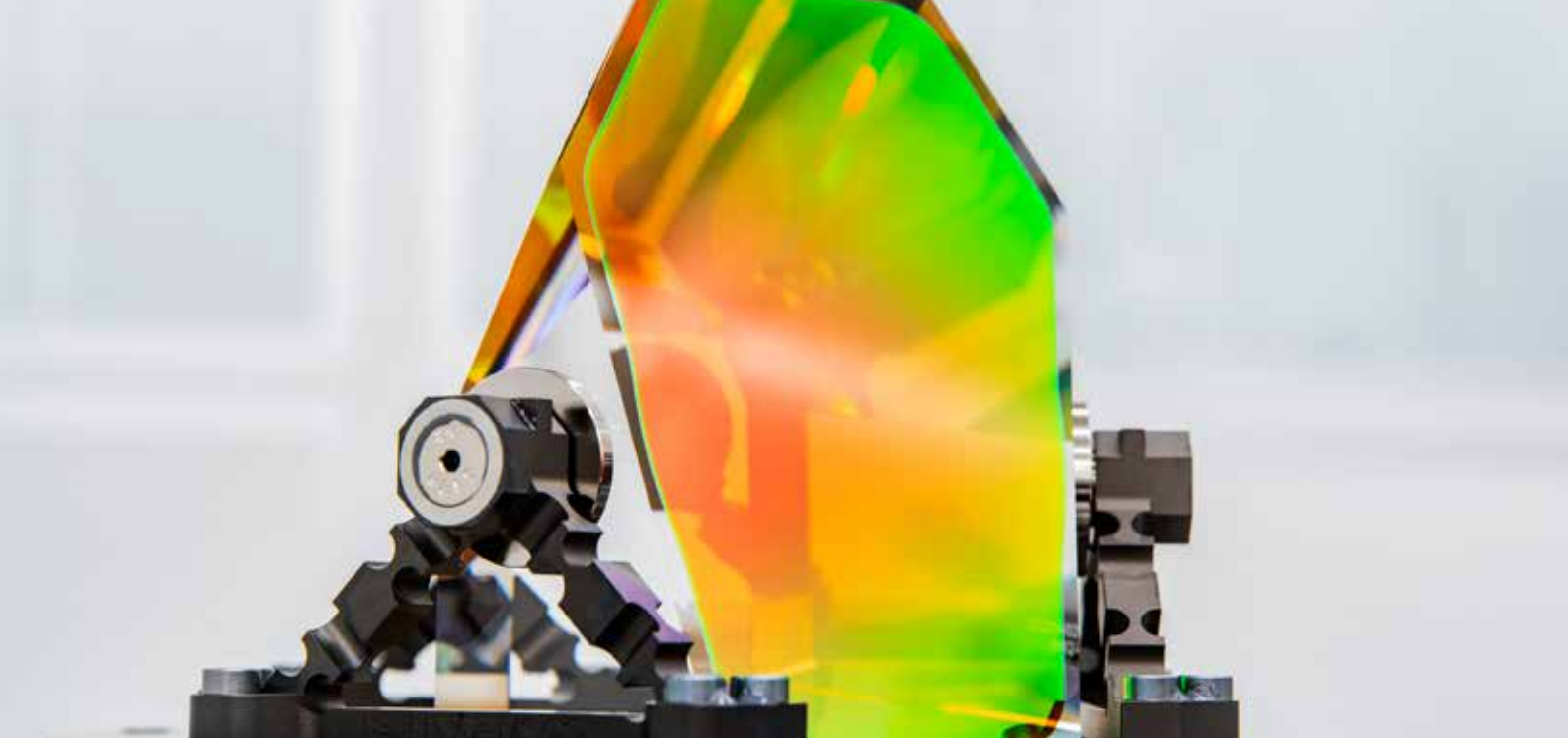
Sensors and Metrology

As a non-contact precision instrument, light offers a broad range of applications in metrology, sensor technology, and analytics. Fraunhofer IOF is committed to the development of optical and optoelectronic measurement and sensor systems for various applications. These include 3D digitization, quality assurance, production metrology, medicine, biotechnology, agriculture, and forestry. The broad spectrum includes ultra-fast and multimodal 3D measurement systems based on pattern and fringe projection, ultra-flat and multi-aperture cameras for spectral imaging, and systems for surface and layer characterization. In addition, the institute develops specialized applications such as biphotonic sensors, fiber sensor technology, and underwater sensor technology.



Wissenschaftliche Highlights Scientific Highlights





[1] Der Disperser spaltet das von der Erde reflektierte Licht auf / The disperser splits the light reflected from Earth

ESA-Mission CO2M: Optik für Treibhausgas- Monitoring

Wie viel Kohlendioxid (CO₂) auf der Erde ist speziell von Menschenhand gemacht? Dieser Frage will sich die »Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring«-Mission (CO2M) der European Space Agency (ESA) ab 2026 mit zwei Erdbeobachtungs-Satelliten widmen. Die Satelliten sollen hochauflösende spektrale Messungen von atmosphärischem CO₂ durchführen, um die Treibhausgas-Emissionen verschiedener Regionen genau zu kartieren. Dazu werden die Satelliten mit Infrarot-Spektrometern ausgestattet.

Für diese Spektrometer wurden in Jena wichtige Schlüsselkomponenten hergestellt: die Disperser. Sie bestehen aus jeweils zwei Prismen und einem Gitter und spalten das von der Erde reflektierte Licht sehr genau in seine Spektralfarben auf. Dabei arbeiten sie im Bereich des nahen Infrarotlichts (NIR) sowie in Bereichen des kurzwelligen Infrarots (SWIR 1; SWIR 2) und ermöglichen so die hochpräzisen Messungen des CO₂-Gehalts in der Erdatmosphäre.

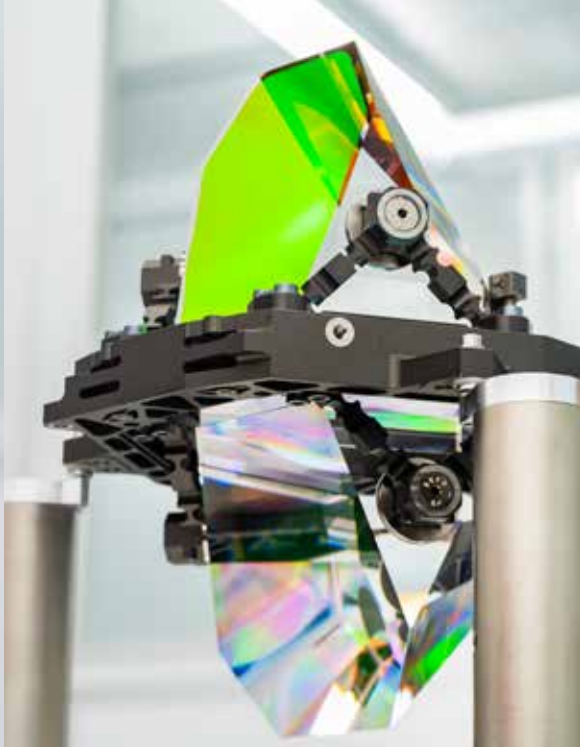
Die CO2M-Satelliten können den CO₂-Gehalt an jedem Ort der Erde mit einer Genauigkeit von weniger als einhundert CO₂-Teilchen pro einer Milliarde Moleküle Luft bestimmen. Zusammen mit einer hohen Ortsauflösung können sie auf globaler Ebene sehr genau analysieren, wo und durch welche Quellen die meisten Abgase ausgestoßen werden. Ermöglicht werden

ESA CO2M mission: optics for greenhouse gas monitoring

How much of carbon dioxide (CO₂) on Earth is caused by human activity? The European Space Agency's (ESA) 'Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring' (CO2M) mission will address this question with two Earth observation satellites, set to start in 2026. The satellites will carry out high-resolution spectral measurements of atmospheric CO₂ in order to accurately map greenhouse gas emissions from different areas. To achieve this, the satellites will be equipped with infrared spectrometers.

Researchers from Jena have produced key components for these spectrometers: the dispersers. They consist of two prisms and a grating and split the light reflected from Earth very precisely into its spectral colors. They operate in the near infrared light range (NIR) and in two short-wave infrared ranges (SWIR 1; SWIR 2), thus enabling high-precision measurements of the CO₂ content in Earth's atmosphere.

The CO2M satellites can determine the carbon dioxide content of Earth's atmosphere at any location on earth with an accuracy of less than one hundred CO₂ particles per one billion molecules of air. Combined with a high spatial resolution, they can very precisely analyze on a global level where the most emissions are released and by which sources. These high-precision measurements are provided by the optical gratings built



[2] Der Disperser ist eine optische Baugruppe, bestehend aus zwei Prismen und einem Gitter, welches mit einem der Prismen verbunden ist. / The disperser is an optical assembly consisting of two prisms and a grating that is connected to one of the prisms.

Authors

Thomas Höing
Dr. Falk Eilenberger

Contact

Thomas Höing
Phone +49 3641 807-322
thomas.hoeing@iof.fraunhofer.de

diese hochpräzisen Messungen durch in den Dispersern verbaute optische Gitter. Diese haben eine besonders hohe Effizienz von $> 90\%$ und einen geringen Polarisationsgrad von $< 10\%$. Größe und Leistungsfähigkeit der Disperser sind in dieser Form bisher einzigartig. Möglich wird dies auch durch ein spezielles Gitterdesign, bei dem die Gittergräben mit einem hochbrechenden Material gefüllt und dann mit einem plasma-aktivierten Fügeverfahren auf den Prismen zwischenschichtfrei, atomar-fest verbunden werden. Diese optischen Komponenten mit extrem hoher Dispersion sind durch eine isostatische Montierung an einer Strukturmechanik aus Titan befestigt. Additiv gefertigte Leichtbau-Gehäuse, verschiedene Beschichtungen sowie eine aufgeraute lichtstreuende Fläche dienen weiterhin der Minimierung von Streulicht. So kann das Signal-Rausch-Verhältnis des Spektrometers optimiert werden.

»Wir leisten damit einen wichtigen Beitrag zur Begrenzung des Klimawandels, denn CO2M wird Entscheider mit belastbaren Zahlen versorgen«, resümiert Projektleiter Thomas Höing.

Die CO2M-Mission ist Teil des europäischen Copernicus-Programms. Die Missionsreihe wird von der ESA im Auftrag der Europäischen Union umgesetzt. Die Disperser wurden im Auftrag der Thales Alenia Space entwickelt und hergestellt. Die erste flugtaugliche Baugruppe wurde im Herbst 2024 vollständig ausgeliefert.

into the dispersers. They have a particularly high efficiency of $> 90\%$ and a low degree of polarization of $< 10\%$. The size and performance of the dispersers are currently one-of-a-kind in this form. This is possible thanks to a special grating design. Here, the grating grooves are filled with a highly refractive material and then interlayer-free, firmly joined to the prisms using a plasma-activated covalent bonding process. This optical system (disperser) is attached to a titanium interface structure using a special isostatic mount. Additively manufactured lightweight housings, various coatings, and a light-scattering surface roughened also serve to minimize stray light. In this way, the spectrometer's signal-to-noise ratio is optimized.

“We are making an important contribution to limiting climate change, because CO2M will provide decision-makers with reliable figures,” concludes the project manager Thomas Höing.

The CO2M mission is part of the European Copernicus program. The series of missions is being implemented by ESA on behalf of the European Union. The dispersers were developed and manufactured on behalf of Thales Alenia Space. The first airworthy assembly was delivered in late 2024.

Literatur / References

- 1 G. Kalkowski et al., »Low temperature GRISM direct bonding«, SPIE 9574, 2015.
- 2 T. Flügel-Paul et al., »New grating concepts in the NIR and SWIR spectral band for high resolution earth-observation spectrometers«, SPIE 9912, 2016.
- 3 T. Flügel-Paul et al., »All-dielectric prism-grating-prism component realized by direct hydrophilic bonding technology for optical applications in space«, SPIE 11180, ICSO 2018, 2018.
- 4 <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/co2m>



[1] Strukturiertes FORUM-Flugmuster / Structured FORUM flight model

FORUM: Mit Diamanten gegen den Klimawandel

Im Herbst 2024 hat das Fraunhofer IOF seinen Beitrag zur FORUM-Mission¹ der ESA durch die Auslieferung der letzten Flugmuster erfolgreich abgeschlossen. FORUM, das für »Far-infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring« steht, verfolgt das Ziel, den Wärmehaushalt der Erde im Spektralbereich von 6,5 bis 100 μm zu analysieren, um so das Verständnis unseres globalen Klimasystems und der Erderwärmung zu vertiefen. Als Bestandteil der Earth-Explorer-Reihe der ESA setzt die Satelliten-Mission auf innovative Technologien, die bestehende Beobachtungsmethoden erweitern sollen.

FORUMs Schlüsseltechnologie besteht aus mikrostrukturierten Diamantstrahlteilern, welche das Herzstück des Spektrometers an Bord des Satelliten bilden werden². Aufgrund seiner herausragenden Eigenschaften, insbesondere der hohen Transmission für Wellenlängen von unter 1 μm bis weit über 100 μm , ist Diamant das bevorzugte Material für breitbandige Transmissionsoptiken im Ferninfrarot. Die mechanische Härte und chemische Resistenz stellen jedoch eine Herausforderung für die Feinbearbeitung dar.

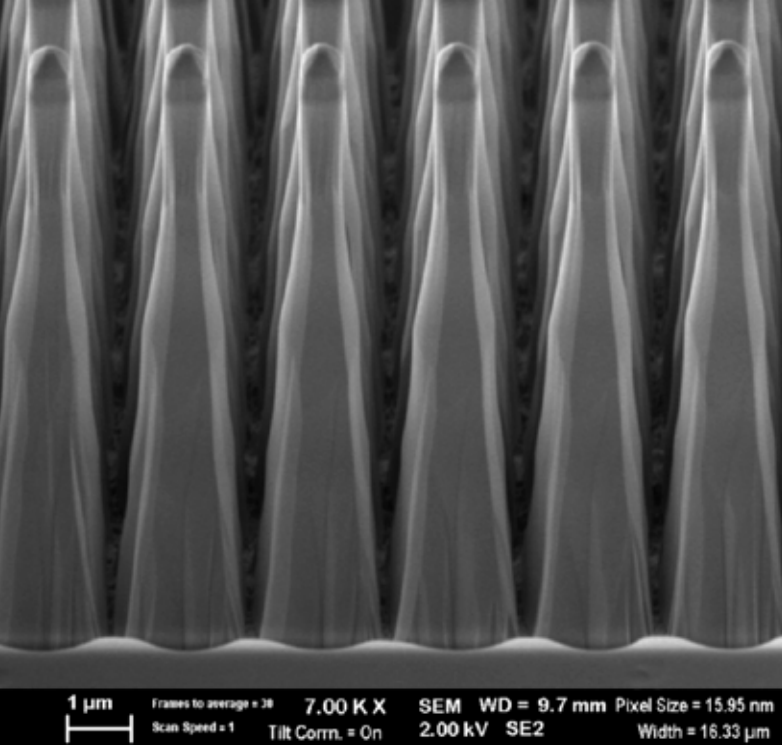
In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik (IAP) der Friedrich-Schiller-Universität Jena hat das Fraunhofer IOF eine Technologie zur Mikrostrukturierung von Diamant entwickelt, welche die notwendige breitbandige Entspiegelung einer Strahlteilerseite ermöglicht. Die Technologieentwicklung wurde seit 2019 von der ESA im Rahmen der

FORUM: Using diamonds to combat climate change

In 2024, Fraunhofer IOF successfully completed its contribution to ESA's FORUM mission¹ with the delivery of the final flight models. FORUM (Far-infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring) aims to analyze Earth's thermal balance in the spectral range of 6.5 to 100 μm , thus contributing to the understanding of our global climate system and global warming. As part of ESA's Earth Explorer series, the satellite mission employs innovative technologies intended to enhance existing observation techniques.

FORUM's key technology is micro structured diamond beam splitters, which form the core of the spectrometer onboard the satellite². Diamond is the material of choice for broadband transmission optics in the far-infrared due to its outstanding properties, particularly its high transmission for wavelengths ranging from under 1 μm to well over 100 μm . However, its mechanical hardness and chemical resistance make its processing extremely challenging.

In close collaboration with the Institute of Applied Physics (IAP) at the Friedrich Schiller University Jena, Fraunhofer IOF developed a technology for the micro structuring of diamond, enabling the required broadband antireflection on one side of the beam splitter. ESA has supported this technology development since 2019 during the test and qualification phases of the FORUM mission. By early 2023, the technology had advanced sufficiently to begin structuring the final flight



[2] Diamantstrukturen im Rasterelektronenmikroskop / Image of diamond structures from scanning electron microscopy

Authors

Jana Paeschke
Dr. Martin Rumpel
Dr. Falk Eilenberger

Contact

Dr. Falk Eilenberger
Phone +49 3641 807-274
falk.eilenberger@
iof.fraunhofer.de

Test- und Qualifikationsphasen der FORUM-Mission gefördert und war Anfang 2023 so weit fortgeschritten, dass mit der Strukturierung der finalen Flugmuster begonnen werden konnte. Diese bestehen aus Wafern aus synthetischem Diamant, die etwa die Größe einer Kreditkarte haben (s. Abb. 1).

Für den Strukturierungsprozess wird ein Resist-Masken-Schichtsystem mittels Elektronenstrahlolithografie strukturiert und anschließend durch reaktives Ionenstrahlätzen in den Diamanten übertragen. Die Zielstrukturen im Diamant sind von Mottenaugenstrukturen inspiriert, welche für ihre extrem breitbandige Antireflex-Wirkung bekannt sind. Die etwa 8 µm hohen Diamantpyramiden (s. Abb. 2) liegen mit einer Periode von 2,2 µm für Einsatzwellenlängen im Ferninfrarot¹ im Sub-Wellenlängenbereich und erreichen eine AR-Effizienz von bis zu 96 %.

Für FORUM wurden insgesamt sieben Diamant-Strahlteiler strukturiert und an die OHB SE geliefert, wo derzeit das Instrument zusammengebaut wird. Der Start der Satelliten-Mission ist aktuell für 2027 geplant.

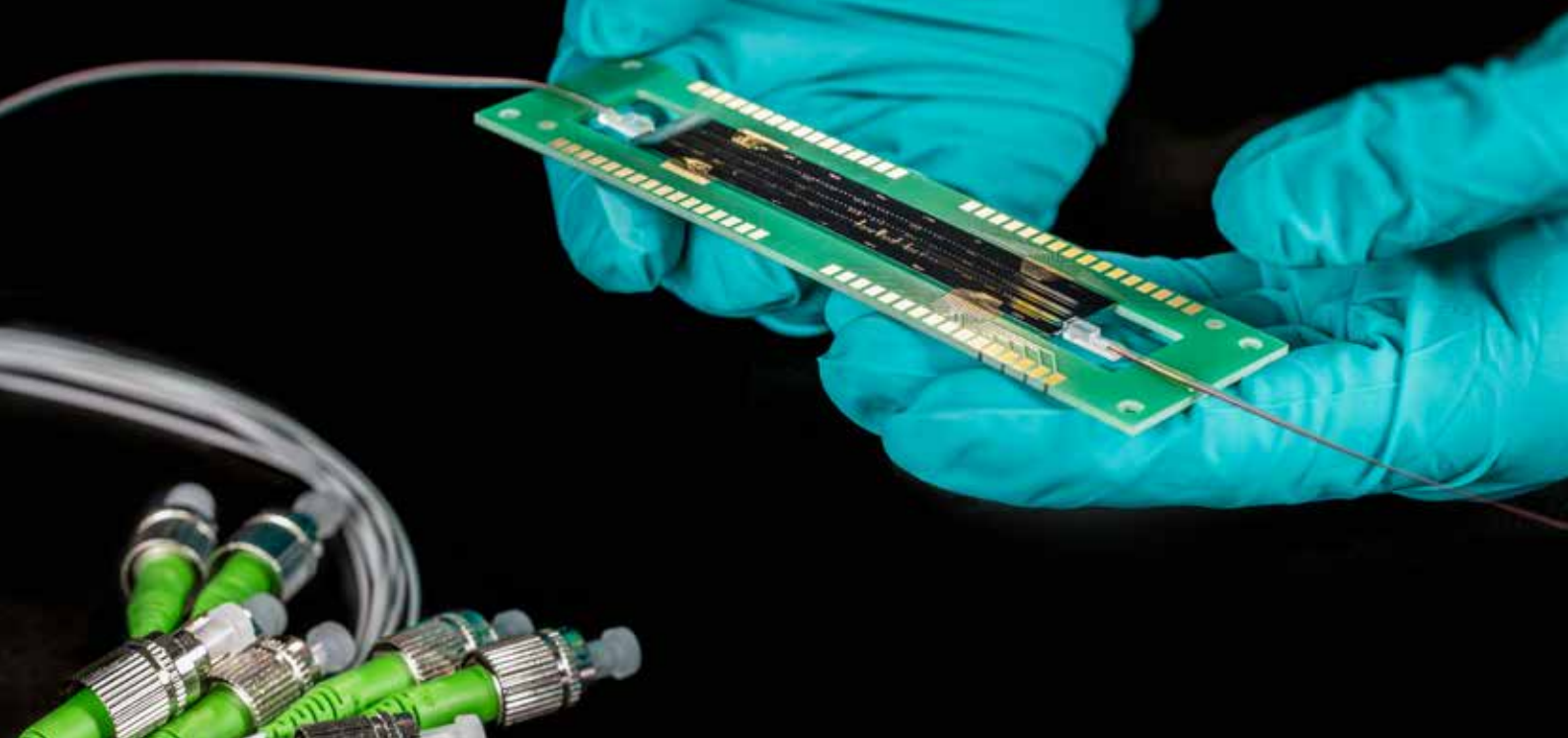
models, which consist of wafers made from synthetic diamond approximately the size of a credit card (see Fig. 1).

For the structuring process, a resist-mask multilayer system is structured using electron beam lithography and subsequently transferred into the diamond through reactive ion beam etching. The target structures in the diamond are inspired by moth-eye structures, which are known for their extremely broadband antireflective properties. The diamond pyramids, approximately 8 µm in height (see Fig. 2), are, with a period of 2.2 µm, effectively sub-wavelength structures for the operational wavelengths in the far-infrared² and achieve an AR efficiency of up to 96 %.

A total of seven diamond beam splitters were structured for FORUM and delivered to OHB SE, where the instrument is now being assembled. The launch of the satellite mission is currently planned for 2027.

Literatur / References

- 1 B. C. Domínguez et al., »The Far-Infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring (Forum) Mission. ESA's 9th Earth Explorer«, IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 6035-6038
- 2 S. Fray et al., »FORUM payload study for phase A/B1 by a consortium led by OHB System AG and TAS-UK«, Proc. SPIE 11852, International Conference on Space Optics — ICSO 2020, 1185225 (2021)



[1] Modulatorennetzwerk für quantenoptische Anwendungen aus Dünnschichtlithiumniobat (LNOI) mit faseroptischer und elektronischer Ansteuerung / Modulator network for quantum optical applications made from thin film lithium niobate on insulator (LNOI) with fiber optical and electronic connectors

Verlustarme Wellenleiter in Dünnschichtlithiumniobat

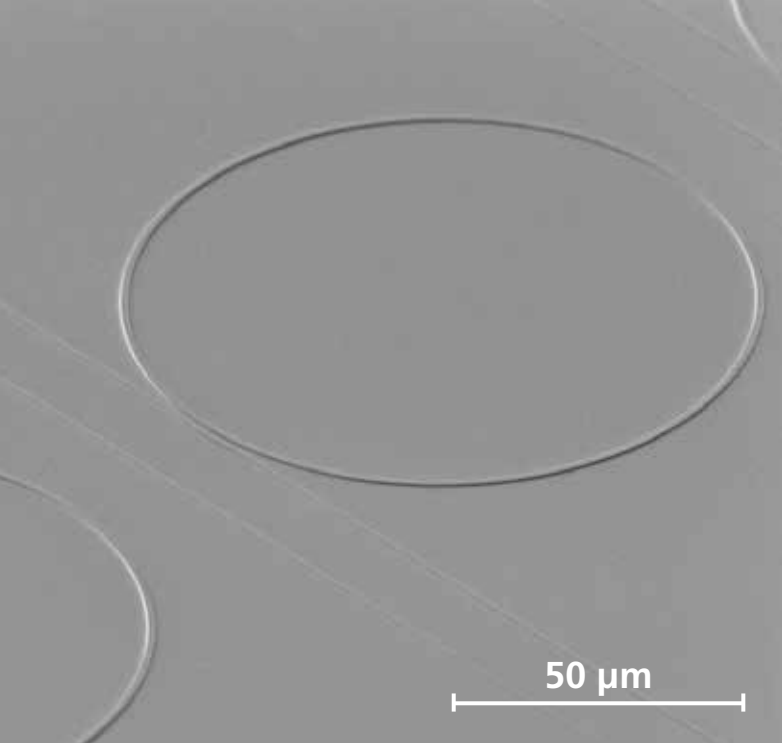
Die Realisierung von verlustarmen optischen Wellenleitern ist entscheidend für den Fortschritt integrierter photonischer Schaltkreise (PICs), die in Kommunikationssystemen, Quantentechnologien und Signalverarbeitung Anwendung finden. Besonders Dünnschichtlithiumniobat (Lithium Niobat on Insulator, LNOI) ist aufgrund der elektro-optischen und nichtlinearen Eigenschaften sowie des hohen Brechungsindexkontrasts vielversprechend. LNOI ermöglicht kompakte, hochintegrierte photonische Systeme mit vielseitigen Einsatzmöglichkeiten.

Ein Schlüsselement wellenleitender Bauelemente ist die Minimierung von Streuverlusten, die durch die Seitenwandrauigkeit der Wellenleiter entstehen. Hierfür kommen hochpräzise Strukturierungsverfahren wie Elektronenstrahlolithografie und Trockenätzen zum Einsatz. Durch die Verwendung chemisch verstärkten Resists kann eine hohe Strukturauflösung bei kurzen Belichtungszeiten erreicht werden, wodurch beliebige Layouts sehr flexibel und in hervorragender Qualität herstellen lassen. Der Trockenätzprozess wurde so optimiert, dass amorphe Rückstände, die während des Strukturierungsprozesses entstehen, vermieden werden. Nach der Strukturierung werden die Wellenleiter thermisch ausgeheilt, wodurch Materialdefekte reduziert und die Kristallstruktur des LNOI-Materials wiederhergestellt werden. Im Ergebnis wurden glatte Seitenwände und signifikant reduzierte Ausbreitungsverluste von weniger als 2 dB/m erreicht¹.

Low-loss waveguides in thin-film lithium niobate

The realization of low-loss optical waveguides is crucial for the progress of photonic integrated circuits (PICs), which are used in communication systems, quantum technologies, and signal processing. Thin film lithium niobate on insulator (LNOI) is particularly promising due to its electro-optical and non-linear properties as well as its high refractive index contrast. LNOI enables compact, highly integrated photonic systems with a wide range of applications.

A key element in optimizing the manufacturing technology for the realization of low-loss waveguiding components is the minimization of scattering losses caused by the sidewall roughness of the waveguides. High-precision structuring processes such as electron beam lithography and dry etching are used for this purpose. Via the use of chemically amplified resists, a high structure resolution can be achieved with short exposure times, allowing any layout to be produced flexibly and with outstanding quality. The dry etching process has been optimized to avoid amorphous residue and redeposition layers that occur during the structuring process. After structuring, the waveguides are thermally annealed, reducing material defects and restoring the crystal structure of the LNOI material. As a result, smooth sidewalls and significantly reduced propagation losses of less than 2 dB/m were achieved in the waveguides¹.



[2] Mikroringresonatoren mit Koppelwellenleiter aus Dünnschichtlithiumniobat (LNOI) / Micro ring resonator with coupling waveguide made from thin film lithium niobate on insulator (LNOI)

Authors

Dr. Reinhard Geiß
Dr. Thomas Siefke
Dr. Falk Eilenberger
Dr. Frank Setzpfandt
Prof. Dr. Uwe Zeitner
Prof. Dr. Thomas Pertsch

Contact

Dr. Reinhard Geiß
Phone +49 3641 807-547
reinhard.geiss@iof.fraunhofer.de

Zur Messung der Verluste wurden Ring-Resonatoren verwendet, in die über einen Wellenleiter Licht evaneszent ein- und ausgekoppelt wurde (s. Abb. 1). Im Wellenlängenspektrum des durch diesen Wellenleiter transmittierten Lichts finden sich Resonanzkurven, aus denen die Resonatorgüten bestimmt wurden. Aus den gemessenen Resonatorgüten für Ring-Resonatoren unterschiedlicher Geometrie konnten die Ausbreitungsverluste der Wellenleiter ermittelt werden. Diese verlustarmen Wellenleiter und Bauelemente bilden die Grundlage für komplexe PICs, die beispielsweise in Modulatornetzwerken für quantenoptische photonische Rechner eingesetzt werden können. Ein erster Demonstrator eines solchen Netzwerks wurde für die weitere optische Charakterisierung aufgebaut (s. Abb. 2).

Die Ergebnisse unserer Arbeiten weisen den Weg für kosteneffiziente, skalierbare Strukturierungstechnologien von LNOI auf Waferebene und ebnen den Weg für leistungsfähige PICs mit minimalen Verlusten. Zukünftig werden auch aktive optische Elemente, die in Lithiumniobat durch die lokale Dotierung mit Erbiumionen² realisiert werden, eine zentrale Rolle für die erweiterte Leistungsfähigkeit der Materialplattform LNOI spielen. Diese Technologien bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung photonischer Plattformen, im Hinblick auf die steigenden Anforderungen an Bandbreite, Rechengeschwindigkeit und Leistungsaufnahme.

To measure the losses, ring resonators were used into which light was evanescently coupled in and out via a waveguide (see Fig. 1). Resonance curves are found in the wavelength spectrum of the light transmitted through this waveguide, from which the resonator Q-factors were determined. From the measured Q-factors for ring resonators of different geometries, the propagation losses of the waveguides could be determined. These low-loss waveguides and components form the basis for complex PICs that can be used, for example, in modulator networks for quantum optical photonic computers. A first demonstrator of such a network was built for further optical characterization (see Fig. 2).

Our results pave the way for cost-efficient, scalable structuring technologies of LNOI at wafer level and for high-performance PICs with minimized losses. In the future, active optical elements, which are realized in lithium niobate through local doping with erbium ions,² will also play a central role in the enhanced performance of the LNOI material platform. These technologies form the basis for the further development of photonic platforms in view of the increasing demands on bandwidth, computing speed, and power consumption.

Literatur / References

- 1 M. Younesi et al., »Fabrication of low-loss lithium niobate on insulator waveguides on the wafer scale«, arXiv:2407.09208 [physics.optics].
- 2 M. Younesi et al., »Erbium doping of lithium niobate on insulator using low-temperature ion exchange«, Opt. Mater. Express 14, 157-167 (2024)



[1] Kuppel der optischen Bodenstation auf dem neuesten Forschungsgebäude des Fraunhofer IOF /
Dome of the optical ground station atop the newest research building of Fraunhofer IOF

Neue optische Bodenstation für Jena

Die optische Bodenstation am Beutenberg (OGS-Jena) soll als eine von wenigen Bodenstationen weltweit in der Lage sein, an zukünftigen satellitenbasierten QKD-Missionen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene zu partizipieren.

In 2024 wurde mit dem Aufbau der OGS-Jena am Beutenberg begonnen. Nach der Fertigstellung des Fundaments auf dem Dach des dritten Bauabschnitts des Fraunhofer IOF wurde im September die Schlitzkuppel mit einem Durchmesser von fünf-einhalb Metern geliefert, zusammengesetzt und auf dem Dach montiert. Die Kuppel kann sich motorisiert um 360° drehen; der Schlitz wird ebenfalls motorisiert geöffnet und geschlossen. Die Bewegung der Kuppel ist nahtlos in die Azimut-Elevationssteuerung des Teleskops integriert und folgt diesem entsprechend. Das Coudé-Labor unter der Kuppel ist bereits fertiggestellt und verfügt über einen direkten Treppenzugang zur Kuppel.

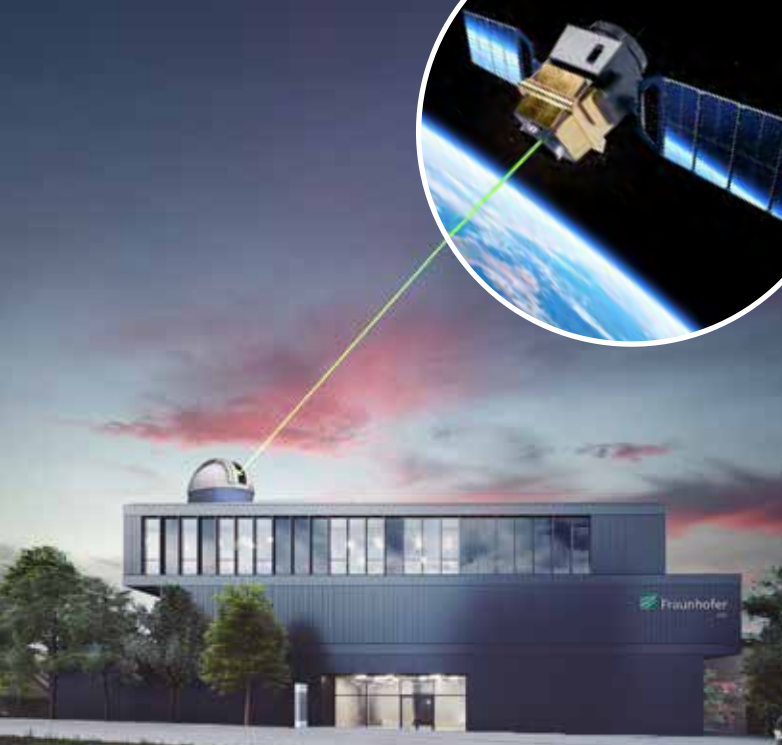
Im Jahr 2024 wurden alle infrastrukturellen Vorkehrungen getroffen, um die Inbetriebnahme der OGS-Jena im Jahr 2025 abzuschließen. Der erste große Meilenstein ist die Erfüllung aller Anforderungen gemäß den Spezifikationen zu EAGLE-1 und SAGA – die zwei großen europäischen Programme für die satellitengestützte Quantenschlüsselverteilung (QKD). Dies umfasst die Installation des 80-cm-Teleskops inklusive Teleskopmontierung und -steuerung, gefolgt von der Installation der optischen Bänke zum Senden (Tx Optical Bench) und Empfangen (Rx Optical Bench) von optischen Signalen sowie Schnittstellen für deren Kopplung in das Fasernetz am Beutenberg.

New optical ground station for Jena

The optical ground station at Beutenberg (OGS-Jena) will be one of few ground stations worldwide able to participate in future satellite-based QKD missions at national, European, and international level.

The construction of the OGS-Jena at Beutenberg began in 2024. After completion of the foundation on the rooftop of the third building of Fraunhofer IOF, the slit dome, with a diameter of five and a half meters, was delivered, assembled, and mounted on the rooftop. The dome can be rotated 360° using a motor; the opening and closing of the slit is also motorized. The movement of the dome is seamlessly integrated in the azimuthal-elevation-controlling of the telescope and follows it accordingly. The Coudé laboratory beneath the dome is already operational and features a direct stairway access to the dome.

In 2024, all infrastructural precautions were taken to realize the commissioning of the OGS-Jena in 2025. The first major milestone will be the fulfilment of all requirements according to the specifications of EAGLE-1 and SAGA — the two important European programs for satellite-based Quantum Key Distribution (QKD). This includes the installation of the 80-cm telescope including mounting and controlling, followed by the installation of optical benches for signal transmission (Tx optical bench) and reception (Rx optical bench) as well as interfaces for fiber coupling into the fiber network at Beutenberg Campus.



Neue optische Bodenstation für Jena New optical ground station for Jena

[2] Visualisierung der optischen Bodenstation mit einem 80-cm-Nasmyth-Coudé-Teleskop / Visualization of the optical ground station with an 80-cm Nasmyth-Coudé telescope

Authors

Dr. Matthias Goy
Dr. Karin Burger
Dr. Torsten Siebert

Contact

Dr. Matthias Goy
Phone +49 3641 807-120
matthias.goy@iof.fraunhofer.de

Unmittelbare Erstverwendung und Projekteinbindung ist in der Forschungsgruppe FREEFIB sowie in den Projekten QuNET, Hyperspace und CubEniK geplant. Dieser Auftakt berücksichtigt auch Entwicklungen europäischer Programme zur nächsten Generation sicherer Satellitennetzwerke.

Eine nachhaltige Entwicklung und ein langfristiger Betrieb der OGS-Jena ist bereits in der grundlegenden Architektur vorgedacht. Aufgrund des modularen Aufbaus der OGS können unterschiedliche Quantenprotokolle durch minimale Um- oder Nachrüstung realisiert sowie neue Anforderungen aus unterschiedlichen nationalen, europäischen und internationalen Satellitenmissionen agil adressiert werden. Ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal der OGS-Jena ist dabei, dass auf in-house Ressourcen und Kompetenzen im Design und in der Produktion maßgeschneiderter Optiken und photonischer Komponenten zurückgegriffen werden kann. Somit ist das Fraunhofer IOF mit der OGS-Jena bestens aufgestellt, um mit exzellenten Projektpartnern an der weltweiten Spitze die Entwicklungen klassischer und quantenbasierter optischer Satellitenkommunikation zu arbeiten.

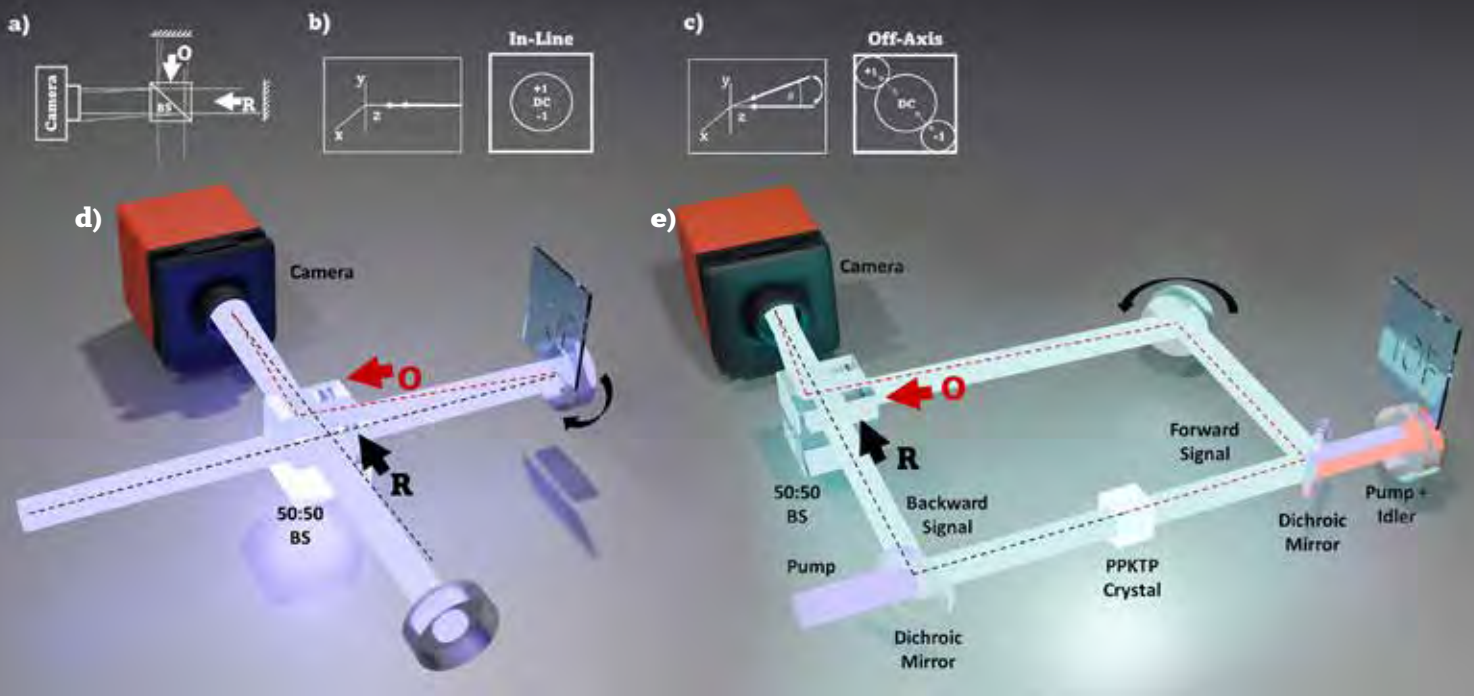
The first direct use and integration into ongoing projects are planned within the research group FREEFIB as well as in the projects QuNET, HyperSpace, and CubEniK. These initial steps also take into account the developments of European programs for the next generation of secure satellite networks.

A sustainable development and a long-term operation of the OGS-Jena is already supported by the fundamental architecture. Due to the modular construction of the OGS, various Quantum protocols can be realized with minimal modifications and upgrades, and new requirements from various national, European, and international satellite missions can be addressed in an agile manner. A key unique selling point of the OGS-Jena is that we can rely on in-house resources and competencies in design and production of tailored optics and photonic components. Thus, Fraunhofer IOF featuring the OGS Jena is ideally positioned to advance the development of classical and quantum-based optical satellite communication at the global forefront in collaboration with leading project partners.



Literatur / References

- 1 <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/technical-agreement-signed-european-plan-quantum-communication-infrastructure>
- 2 <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>
- 3 <https://hyperspace.international/>



[1] (a) Michelson-Morley-Interferometer für Off-Axis-Holographie zur Aufspaltung der Beugungsordnungen im Fourierraum, (b) und (c). (d) Klassische Implementierung von OAH. (e) Quanten-OAH

Neue Perspektiven für die Bildgebung mit Quanten-Off-Axis-Holographie

Nichtlineare Interferometrie für die Quantenbildgebungs- und Quantensensortechnologie hat in den letzten Jahren beträchtliche Aufmerksamkeit erregt, da hierbei Proben mit Licht untersucht werden, welches niemals mit der Probe interagiert hat, sogenannte Quantenbildgebung mit nichtdetektiertem Licht (QIUL)¹. Durch die Quantenkorrelation der Photonenpaare in QIUL kann eine andere Wellenlänge für die Beleuchtung der Probe als für die Detektion verwendet werden. Somit können modernste, hocheffiziente Detektortechnologien im sichtbaren Spektrum eingesetzt werden, während die Untersuchung der Objekte bei weniger konventionellen, probenrelevanten Wellenlängen erfolgt.

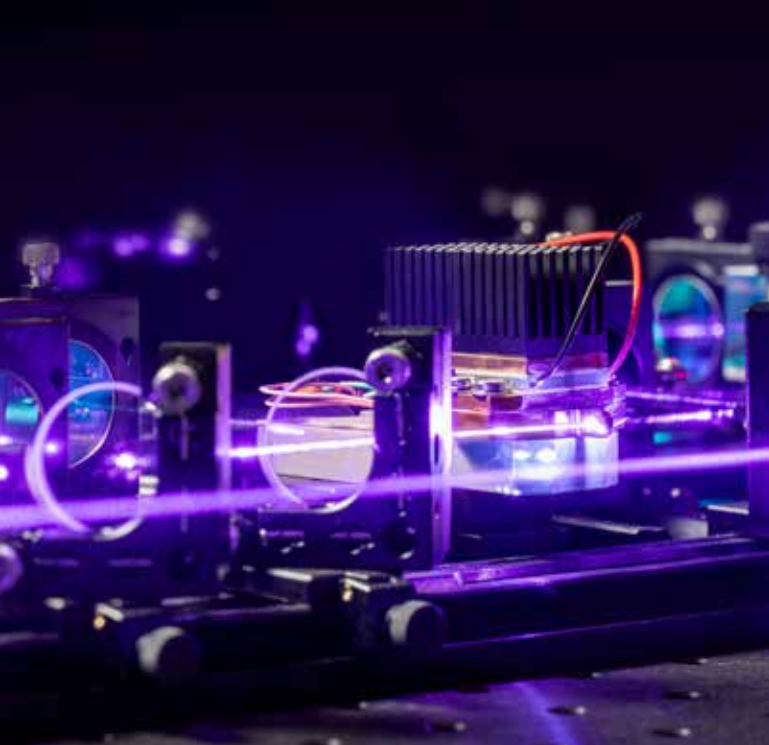
In unserer jüngsten experimentellen Umsetzung haben wir die Möglichkeiten der herkömmlichen QIUL-Technik erweitert, indem wir die Fourier-Off-Axis-Holographie in ein hybrides nichtlineare Michelson-Mach-Zehnder Interferometer integriert und sogenannte Quanten-Off-Axis-Holographie mit nichtdetektiertem Licht (QOAHUL) entwickelt haben². Dieser bahnbrechende Ansatz ermöglicht die Rekonstruktion von Amplituden- und Phaseninformationen in einer einzigen Aufnahme unter Verwendung einer Weitwinkelkonfiguration. In QOAHUL entstehen Interferenzmuster durch die räumliche und zeitliche Überlappung von Idlerstrahlen, wodurch die Weginformation eliminiert und Einzelphotoneninterferenz ermöglicht wird (s. Abb. 1).

New perspectives for imaging with quantum off-axis holography

Nonlinear interferometry for quantum imaging and sensing technology has attracted considerable attention in recent years as samples can be studied by detecting light that never interacted with the object, so-called Quantum Imaging with Undetected Light (QIUL)¹. Using the quantum correlation of the photon pairs, QIUL allows illumination and detection in distinct wavelength ranges. Hence, state-of-the-art, highly efficient visible-spectrum detection technology can be employed while probing objects at less conventional but object-relevant wavelengths.

In our recent experimental implementation, we expanded the capabilities of the standard QIUL technique by integrating Fourier off-axis holography into a hybrid Michelson-Mach-Zehnder nonlinear interferometer and thus, developing Quantum Off-axis Holography with Undetected Light (QOAHUL)². This pioneering approach enables the reconstruction of amplitude and phase information in a single shot using a wide-field configuration. In QOAHUL, interference patterns emerge through the spatial and temporal overlap of the idler beams, thus eliminating the which-path information and enabling single-photon interference (see Fig. 1).

Our approach ensures that observers are unable to determine the origin of the detected photon, allowing the reconstruction of object information. For image reconstruction, the method



Perspektiven für die Bildgebung mit Quanten-Off-Axis-Holographie New perspectives for imaging with quantum off-axis holography

[2] Laboraufbau des Quantenbildgebungs-
systems am Fraunhofer IOF / Laboratory
setup of the quantum imaging system at
Fraunhofer IOF

Authors

Josué Ricardo León Torres
Valerio Flavio Gili

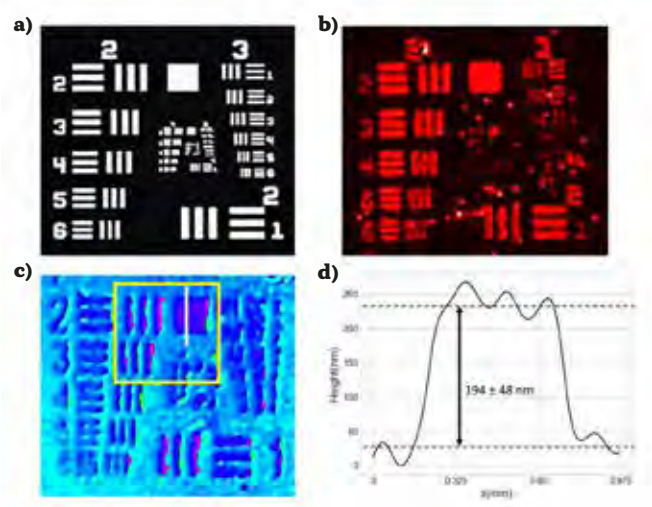
Contact

Dr. Valerio Flavio Gili
Phone +49 3641 807-345
valerio.flavio.gili@
iof.fraunhofer.de

Unser Ansatz stellt sicher, dass Beobachter den Ursprungsort des detektierten Photons nicht bestimmen können, wodurch die Rekonstruktion von Objektinformationen möglich wird. Zur Bildrekonstruktion werden Impuls-Korrelationen aus dem Prozess der Photon-Paar-Erzeugung genutzt. Die Leistungsfähigkeit des Systems zur Amplituden- und Phasenbildgebung ist in Abb. 3 dargestellt. Da eine andere Wellenlänge zur Detektion als zur Beleuchtung gewählt werden kann, ist der Einsatz hochauflösender, effizienter Silizium-basierter Detektortechnologie im sichtbaren Spektrum möglich. Da bei QOAHL keine Mehrfach-Aufnahmetechniken wie die phasenschiebende Holographie³ notwendig sind, können wir schnelle Dynamiken durch Phasenbildgebung in Echtzeit oder mit Videorate untersuchen. Zusammenfassend bietet unsere Arbeit die Grundlage für effizientere und vielseitigere Quantenbildgebungs-lösungen und eröffnet weitere Bildgebungs- und Sensoranwendungen in wissenschaftlichen und industriellen Bereichen.

uses momentum correlations from the photon-pair generation process. The performance of the system for amplitude and phase imaging is summarized in Fig. 3. As a different detection wavelength can be chosen compared to the illumination wavelength, the use of well-established silicon-based detector technologies in the visible spectrum is possible. By eliminating the need for multi-frame acquisition methods such as phase-shifting holography³, we are able to study fast dynamics through phase imaging in real time or video rate. In summary, our work sets the stage for more efficient and versatile quantum imaging solutions and opens further imaging and sensing applications in scientific and industrial domains.

[3] (a) Referenzbild des USAF-Auflösungs-
Targets mit zugehörigen (b) Amplituden- und
(c) Phasenquantenbilder (d) und Höhenprofil
entsprechend der weißen Linien in (c) /
(a) Reference image of USAF resolution target,
and according (b) amplitude and (c) phase
quantum images (d) and height profile to
white line in (c)



Literatur / References

- 1 M. Gilaberte Basset et al., »Video-Rate Imaging with Undetected Photons«, Laser & Photonics Reviews 15, 2000327 (2021).
- 2 J. R. León-Torres et al., »Off-axis holographic imaging with undetected light«, Opt. Express 32, 35449-35461 (2024).
- 3 S. Töpfer et al., »Quantum holography with undetected light«, Sci. Adv. 8(2), 4301 (2022).



[1] Karte der Standorte in Berlin / Map of locations in Berlin

QuNET: Quanten-kommunikation in Berlin erfolgreich demonstriert

Im September 2024 demonstrierte die QuNET-Initiative die quantengesicherte Datenübertragung zwischen verschiedenen Standorten auf dem Berliner Quantennetz-Testbed. Sechs Endpunkte wurden über mehr als 125 km Glasfaser und zwei Freistrahverbindungen mit Längen von jeweils 3,3 km und 0,3 km verbunden. Das Quanten-Kryptographiesystem verschlüsselt Informationen, die über Standardkanäle (z. B. Internet) übertragen werden und gewährleistet Sicherheit gegenüber algorithmischen Entschlüsselungsversuchen, selbst solche von Quantencomputern. Während der Live-Demonstration wurden fiktive, personenbezogene Daten verschlüsselt und zwischen verschiedenen Standorten in Berlin übertragen. Am Standort der Bundesdruckerei wurde ein Test-Personalausweis basierend auf den empfangenen quantengesicherten Daten gedruckt, um einen praktischen Anwendungsfall der Quantenkryptographie zu demonstrieren. Dies ist die erste Demonstration in Deutschland, die ein Netzwerk für den Quantenschlüsselaustausch (Quantum Key Distribution, QKD) für den Transfer persönlicher Daten realisieren konnte.

Während der Demonstration verband das Fraunhofer IOF zwei Standorte mit einem auf Verschränkung basierenden QKD-System. Die verschränkte Photonenquelle des IOFs, die sich in den Laboren der Deutschen Telekom im Zentrum Berlins befand, verteilte Photonenpaare durch Glasfasern zu zwei unabhängigen Standorten, ein Photon zum Fraunhofer HHI-Hauptsitz im

QuNET: Quantum communication successfully demonstrated in Berlin

In September 2024, the QuNET initiative demonstrated quantum-secure data transmission between different locations on the Berlin quantum network testbed. Six endpoints were connected via more than 125 km of optical fiber and two free-space links spanning 3.3 km and 0.3 km, respectively. The quantum cryptographic system encrypts information transmitted over standard channels (e.g., internet), ensuring protection against algorithmic decryption attempts, even from quantum computers. The live demonstration securely transmitted fictitious personal information between different locations in Berlin. At the Bundesdruckerei site, a test ID based on the received quantum-secured data was printed, showcasing a practical application for quantum cryptography. This marks the first demonstration in Germany of a quantum key distribution (QKD) network for the exchange of personal data.

During the demonstration, Fraunhofer IOF connected two locations using an entanglement based QKD system. The IOF's entangled quantum source positioned at Deutsche Telekom laboratories in the center of Berlin distributed photon pairs through optical fibers to two independent sites, one photon to Fraunhofer HHI headquarters in western Berlin, and a partner photon to an office building of Deutsche Telekom in eastern Berlin. At each location, the photons were measured using our in-house polarization analysis and compensation modules. The achieved quantum secret key rate was approximately 6 kbit/s.



QuNET: Quantenkommunikation in Berlin erfolgreich demonstriert QuNET: Quantum communication successfully demonstrated in Berlin

[2] W: QuNET-Team demonstriert quantensichere Datenübertragung im Berliner Testnetz / QuNET team demonstrates quantum-safe data transmission in Berlin test network

Authors

Dr. Thorsten A. Goebel
Rodrigo Gómez
Prof. Dr. Fabian Steinlechner

Contact

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

Westen Berlins und das Partner-Photon zu einem Bürogebäude der Deutschen Telekom im Osten Berlins. An jedem Standort wurden die Photonen mit unseren am IOF gefertigten Polarisationsanalyse- und Kompensationsmodulen gemessen. Die erreichte Quantenschlüsselrate betrug ungefähr 6 kbit/s. Je nach Sicherheitsstufe ermöglicht diese Rate, etwa 24 Schlüssel pro Sekunde mit AES-256-Verschlüsselung zu erzeugen und somit viele Gigabyte an Daten zu verschlüsseln.

Die abschließende Demonstration fand während des »Forum der Quantenkommunikation« statt und wurde mit einem Besuch von Staatssekretär Philippi vom BMBF beendet. Mit der heterogenen Quantenverschlüsselungsinfrastruktur, einschließlich der klassischen Datenverarbeitung, wurden verschiedene QKD-Implementierungen erfolgreich demonstriert.

Die QuNET-Initiative wird vom BMBF gefördert und umfasst die Fraunhofer-Gesellschaft, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, die Max-Planck-Gesellschaft und die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Die Partner entwickeln hochsichere Kommunikationssysteme mit den neuesten Quantentechnologien, um IT-Netze gegen zukünftige Cyberangriffe zu schützen.

Die Glasfaserinfrastruktur wurde von der Deutschen Telekom bereitgestellt.

Depending on the security level, this rate allows the generation of approximately 24 keys per second with AES-256 encryption and thus, the enciphering of multiple gigabytes of data.

The final demonstration took place during the 'Forum Quantum Communication' and was concluded by a visit from State Secretary Philippi from the BMBF. With the heterogeneous quantum encryption infrastructure including classical data processing, various QKD implementations were successfully demonstrated.

The QuNET initiative is funded by the BMBF and includes the Fraunhofer-Gesellschaft, the German Aerospace Center, the Max Planck Society, and the Friedrich Alexander University Erlangen Nuremberg. The partners are developing highly secure communication systems using the latest quantum technologies to enhance IT networks against future cyber-attacks.

The fiber infrastructure was provided by Deutsche Telekom.

Literatur / References

- 1 N. Walenta et al., »A metropolitan QKD network for quantum-secure communication of personal data between government-related institutions«, Publication in preparation.



[1] Test der ADB-Funktion zur Vermeidung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer unter realen Bedingungen / Testing the ADB function to prevent blinding other road users under real-life conditions

Maskenlose mikrooptische Scheinwerfer

Aktuelle Trends im Automobildesign bevorzugen sehr dünne, »schlitzförmige« Frontbeleuchtungsmodule, die optisch mit künstlerisch gestalteten Tagfahrleuchten verschmelzen. Dies stellt das Optikdesign vor große Herausforderungen, um eine angemessene Systemtransmission und Strahlhelligkeit bei einer vertikalen Höhe von weniger als 10–20 mm zu gewährleisten.

Die vom Fraunhofer IOF entwickelte maskenlose Freiform-Array-Mikrooptik löst diese Herausforderungen effektiv, indem sie sehr kleine Bauhöhen und Einbautiefen der Module ermöglicht und gleichzeitig die höchstmögliche Strahlhelligkeit beibehält¹. Die hohe Designflexibilität in Bezug auf Grundfläche und Ausrichtung von Leuchten, die auf maskenlose Freiform-Array-Mikrooptik basieren, lässt eine Vielzahl von gestalterischen Möglichkeiten bei der Entwicklung zukünftiger Autoscheinwerfer zu.

Eine Funktion, die mit dieser Technologie erreicht werden kann, ist das Abblendlicht. Seine asymmetrische, scharfe Hell-Dunkel-Grenze wird durch die präzise Anordnung der Mikrolinsen erreicht, während das Intensitätsprofil nach dem Prinzip des Freiform-Arrays erzeugt wird². Diese Erzeugung eines Abblendlichts aus einer einzigen LED mit ausgeprägter Hell-Dunkel-Grenze erfüllt die von der UN ECE festgelegten aktuellen Anforderungen für Kraftfahrzeuge.

Das Abblendlicht besteht aus vier kompakten Modulen, die jeweils $35 \times 20 \times 30 \text{ mm}^3$ groß sind ($B \times H \times L$). Innerhalb eines

Maskless micro-optical headlights

Current automotive design trends favor ultra-thin 'slit-like' front lighting modules that visually blend with artistic day-time-running lights. This presents significant challenges for optics design to ensure adequate system transmission and beam brightness within a vertical module height of less than 10–20 mm.

The freeform maskless array micro-optics developed by Fraunhofer IOF effectively addresses these challenges. It enables very small height and depth of the system while maintaining optimal attainable beam brightness¹. Remarkable design flexibility in the footprint and orientation of luminaires based on freeform maskless arrays allows for diverse artistic designs in future car headlights.

The low-beam function is addressable with this technology. Its asymmetrical sharp cut-off line is achieved through the precise layout design of each microlens, while the intensity profile is generated using the freeform array principle². This formation of a bright low beam from a single LED with a distinct cut-off line meets up-to-date automotive regulations set by UN ECE.

The low beam consists of four compact modules, each $35 \times 20 \times 30 \text{ mm}^3$ ($W \times H \times L$). Within a field of view of $70^\circ \times 12^\circ$ (horizontal $\times$ vertical), they can achieve a hotspot with a brightness of 42,000 cd. The system transmission is approximately 75 %, making these headlamps highly efficient.



[2] Foto des ADB-Moduls / Photo of the ADB module

Authors

Dmitrii Stefanidi
Leo M. Wilhelm
Dr. Peter Schreiber
Rohan Kundu
Dr. Robert Leitel
Dr. Norbert Danz

Contact

Dmitrii Stefanidi
Phone +49 3641 807-369
dmitrii.stefanidi@
iof.fraunhofer.de

Sichtfeldes von $70^\circ \times 12^\circ$ (horizontal $\times$ vertikal) können sie einen Hotspot mit einer Helligkeit von 42.000 cd erzeugen. Die Systemtransmission beträgt ca. 75 %, was diese Scheinwerfer besonders effizient macht.

Hingegen besteht die Herausforderung bei einem adaptiven Fernlicht (ADB) in der klaren und flexiblen Segmentierung des von einem LED-Array erzeugten Strahls. Das Array-Profil ist so optimiert, dass eine maximale Streulichtunterdrückung ohne absorbierende Elemente im System erreicht wird.

Ein einzelnes ADB-Modul hat eine Größe von $120 \times 20 \times 100 \text{ mm}^3$ (B $\times$ H $\times$ L). Mit zwei Modulen kann einen Hotspot von 100.000 cd innerhalb eines Sichtfeldes von $30^\circ \times 10^\circ$ (horizontal $\times$ vertikal) erreicht werden. Die Strahl-segmente mit einer Breite von 1.5° oder mehr können einzeln geschaltet werden, was den Komfort unter verschiedenen Fahrbedingungen erhöht (s. Abb. 1).

The challenge associated with the adaptive driving beam function (ADB) is to achieve a clear and flexible segmentation of the beam generated by an LED array. The array profile is optimized for stray light suppression without the need of any absorbing elements in the system.

A single ADB-module has size of $120 \times 20 \times 100 \text{ mm}^3$ (W $\times$ H $\times$ L). With two modules a hotspot of 100,000 cd can be achieved within the field of view of $30^\circ \times 10^\circ$ (horizontal $\times$ vertical). The individual switching of beam segments of 1.5° width will enhance the comfort in various driving conditions (see Fig. 1).

Literatur / References

- 1 D. Stefanidi et. al., »Maskless irregular double-sided microlens arrays for automotive headlights,« Int. Symp. Automotive Lighting, Darmstadt (ISAL, 2023).
- 2 L. M. Wilhelm et. al., »Design of maskless micro-optical automotive low beam,« Proc. SPIE 13019, ODE IX, 1301900 (2024).
- 3 D. Stefanidi et. al., »Maskless Irregular Microlens Arrays for Arbitrary Beam Shaping,« 27th Micro-optics Conference (MOC 2022).

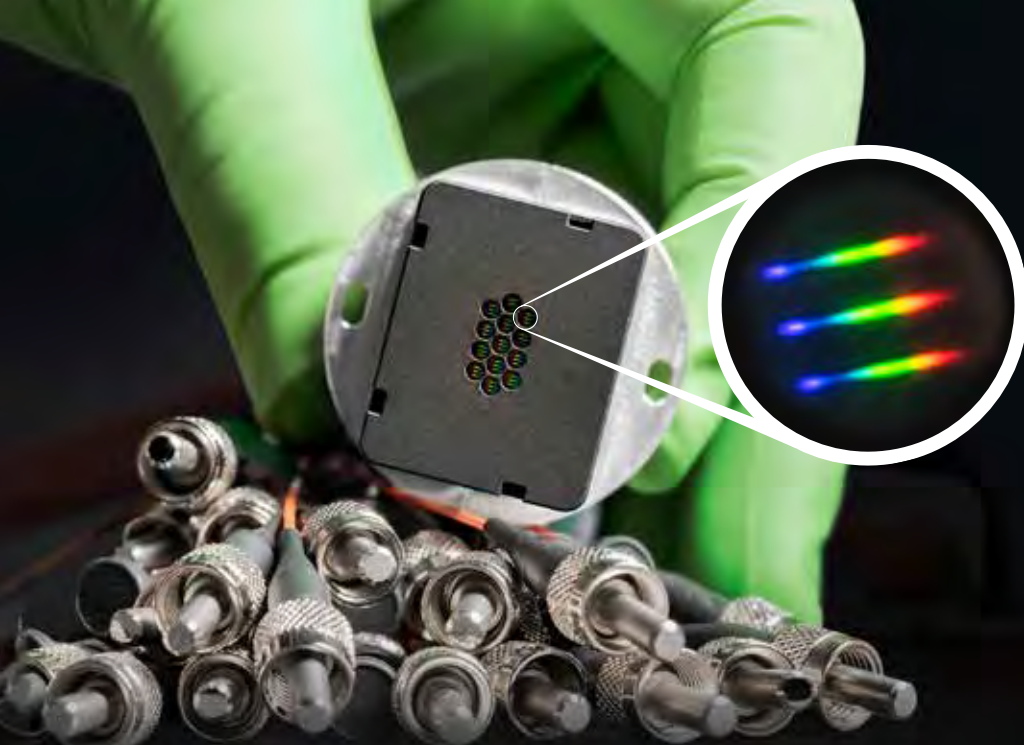


Foto des Spektrometerarrays ohne Bildsensor / Photograph of the spectrometer array without image sensor

Parallele spektrale Messungen mit miniaturisierter Optik

Wer das Licht von vielen, entfernten Messpunkten spektral analysieren will, kann entweder mehrere separate Mikrospektrometer oder aufwändige Laborgeräte nutzen. Beides ist keine Option, wenn es um flexible oder sogar mobile Anwendungen geht. Ein Team vom Fraunhofer IOF hat eine Lösung¹ weiterentwickelt, bei der Licht mit 39 optischen Fasern flexibel zu einer einzelnen, sehr kompakten Optik geleitet wird. Diese bildet die spektrale Information auf den Bildsensor einer Kamera ab.

Für die Verarbeitung der mit Glasfasern übertragenen Signale haben die Forschenden ein spezielles mikrooptisches System entwickelt. Es besteht aus vielen, nebeneinander angeordneten Spektrometern und bildet auf diese Weise ein sogenanntes Spektrometer-Array.

Jeder Kanal enthält eine Prisma-Gitter-Prisma Anordnung zwischen achromatischen Mikrolinsen. Die Mikrolinsen sind dabei durch Abstandshalter getrennt, um ein Übersprechen zwischen den Kanälen zu verhindern. Die Arrayanordnung erlaubt es dabei, alle Spektrometerkanäle gemeinsam zu montieren und führt zu einer Länge des optischen Systems, die nur knapp zwei Zentimeter beträgt.

Trotz der begrenzten Maße bildet das System den Spektralbereich von etwa 400–800 nm ab. Mit dem entsprechenden CMOS-Sensor wird eine Dispersion von 0,6 nm/px erreicht.

Parallel spectral measurements with miniaturized optics

To spectrally analyze the light from many distant measuring points, either several separate micro spectrometers or complex laboratory equipment can be used. Neither is possible in the case of flexible or even mobile applications. Starting from a recent approach,¹ a team from Fraunhofer IOF has now developed a solution in which light is flexibly guided to a single, very compact optical system using 39 optical fibers. This maps the spectral information onto the image sensor of a camera.

The researchers have developed a special micro-optical system to process the light transmitted via optical fibers. It consists of many spectrometers arranged next to each other, forming a so-called spectrometer array.

Each channel contains a prism-grating-prism arrangement between achromatic micro lenses. The micro lenses are separated by spacers to prevent crosstalk between the channels. This array arrangement allows the mounting of all spectrometer channels at once and results in an optical system length of less than two centimeters.

Despite its limited dimensions, the system maps the spectral range from 400–800 nm. A dispersion of 0.6 nm/px is achieved with the corresponding CMOS image sensor.



Parallele spektrale Messungen mit miniaturisierter Optik Parallel spectral measurements with miniaturized optics

Ein Einsatzgebiet des Systems wäre die parallele spektrale Sensorik, z.B. in der Landwirtschaft / One potential application of the system is parallel spectral sensing, e.g. for digital farming

Authors

Dr. Norbert Danz
Dr. Dirk Michaelis
Johanna Karl
Ralf Rosenberger
Dr. Thomas Flügel-Paul

Contact

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

Die Technologie wurde für Anwendungen entwickelt, bei denen an vielen Positionen oder auf großen Flächen spektrale Messungen benötigt werden. Das kann zum Beispiel bei der Kontrolle von Beschichtungen und beim Drucken vorkommen, bei parallelen Messungen in der Bioanalytik sowie im Labor oder auch bei der digitalen Landwirtschaft auf dem Feld, etwa zur Überprüfung des Gesundheitszustandes von Pflanzen. Dank der integrierten Bauweise ist der Aufbau robust und lässt sich gut in vorhandene Systeme integrieren.

Das Team am Fraunhofer IOF hat die Technologie über drei Jahre mit Unterstützung der Thüringer Aufbaubank bis zur Anwendungsreife entwickelt. Jetzt geht es darum, sie mit entsprechenden Partnern für konkrete Anwendungen zu optimieren. Dafür könnte z.B. die spektrale Auflösung angepasst oder auch der spektrale Messbereich bis auf 1.600 nm erweitert werden – es sind sogar unterschiedliche Parameter der Kanäle denkbar.

The technology has been developed for applications where spectral measurements are required at many positions or over large areas. This applies, for example, to the optical analysis of coatings or printings, to parallel measurements in bioanalytics as well as to digital agriculture, e.g., for assessing the health status of plants. Thanks to the integrated design, the setup is robust and can be integrated into existing systems easily.

The team from Fraunhofer IOF has developed the technology to application maturity over three years with the support of the Thüringer Aufbaubank. The task is to now optimize it for specific applications with the appropriate partners. For example, the spectral resolution could be adjusted, or the spectral measuring range can be extended to 1,600 nm — even different parameters of the channels are conceivable.

Literatur / References

- 1 N. Danz et al., »Miniature integrated micro-spectrometer array for snap shot multispectral sensing«, Optics Express 27 (2019)



[1] Die Kamera im Einsatz: Trotz des Scheinwerferlichts ist der Fußgänger am Straßenrand kaum zu erkennen. Erst die Wärmebildkamera macht ihn deutlich sichtbar. / The camera in use: Despite the headlights, the pedestrian at the side of the road is barely visible. But the thermal imaging camera highlights him clearly.

Miniaturisierte Infrarot-Optik für Sicherheitsanwendungen

Bei schlechten Sichtverhältnissen durch Regen, Nebel oder Dunkelheit können Wärmebildkameras, die Menschen auch bei schlechten oder eingeschränkten Sichtverhältnissen zuverlässig erkennen, für mehr Sicherheit sorgen. Das gilt besonders für autonome Fahrzeuge, bei denen eventuell gar kein Mensch mehr konstant den Fahrtweg beobachtet.

Ein Team vom Fraunhofer IOF hat es sich daher zur Aufgabe gemacht, eine Wärmebildkamera für den Einsatz im Straßenverkehr zu entwickeln. Daraus ist eine neuartige Infrarotkamera entstanden, die im Wellenlängenbereich von 8–14 µm arbeitet – also genau dem Bereich, in dem auch die Wärmestrahlung liegt, die Menschen bei Tag und Nacht abgeben. »Diese Technologie kann die Sicherheit im Straßenverkehr signifikant erhöhen und Unfälle vermeiden«, erklärt Projektleiter Martin Hubold »Das schafft sie, indem sie gängige Kamerasysteme und Sensoren, z.B. LIDAR oder RADAR, bei schwierigen Sichtbedingungen ergänzt, ohne eine aktive Beleuchtung zu benötigen.«

Bei der Umsetzung der Infrarotkamera ließen sich die Forschenden von ihren Erfahrungen mit Multiaperturkameras leiten. Die Kamera wird aus mehreren kleinen und kostengünstigen Bolometerarrays aufgebaut. Die einzelnen Bildbereiche werden durch eine Software zu einem großen Gesamtbild mit einer Auflösung von aktuell ca. 530 px × 210 px über ein Gesichtsfeld von 34° × 13° zusammengesetzt.

Miniaturized infrared optics for safety applications

In poor visibility conditions caused by rain, fog, or darkness, thermal imaging cameras able to reliably detect people even in limited or poor visibility conditions can ensure greater safety. This is particularly true for autonomous vehicles that lack constant human monitoring.

A team from Fraunhofer IOF has developed a thermal imaging camera for road traffic applications. It operates in the wavelength range of 8–14 µm — precisely the same range in which thermal radiation emitted by humans is found. "This technology can significantly improve road safety and prevent accidents," explains project manager Martin Hubold. "This is achieved by supplementing conventional camera systems and sensors, e.g., LIDAR or RADAR, under challenging visibility conditions without requiring active illumination."

When creating the infrared camera, the researchers were guided by their experience with multi-aperture cameras. The camera is built from several small and cost-effective uncooled bolometer arrays. The individual image segments are combined by software into a large overall image with a current resolution of approximately 530 px × 210 px over a field of view of 34° × 13°.

The sensors are composed of mirrors and prisms. This allows for an exceptionally flat design (10 mm). In cooperation with the Fraunhofer Institute for Silicon Technology ISIT, scalable



Miniaturisierte Infrarot-Optik für Sicherheitsanwendungen Miniaturized infrared optics for safety applications

[2] Die neue Infrarotkamera nutzt ein Array von 2 × 4 Sensoren. Die katadioptrische Spiegeloptik (hier in gold) ermöglicht die besonders flache Bauform. / The new infrared camera uses an array of 2 × 4 sensors. The catadioptric mirror optics (shown here in gold) enable the particularly flat design.

Authors

Martin Hubold
Dr. Robert Leitel
Johanna Karl
Alexander Oberdörster

Contact

Martin Hubold
Phone +49 3641 807-197
martin.hubold@iof.fraunhofer.de

Auf den Sensoren sitzt eine aus Spiegeln und Prismen zusammengesetzte Optik. Sie ermöglicht eine besonders flache Bauweise (10 mm). Zu ihrer Herstellung wurden in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie ISIT skalierbare und kostengünstige lithografische Methoden sowie im Automotive-Bereich etablierte Materialien genutzt. So kann die Kamera mit hoher Lichtstärke ($f/1,1$) und Winkelauflösung ($16 \text{ px}/^\circ$) punkten, während gleichzeitig die Bauform platzsparend gehalten wird.

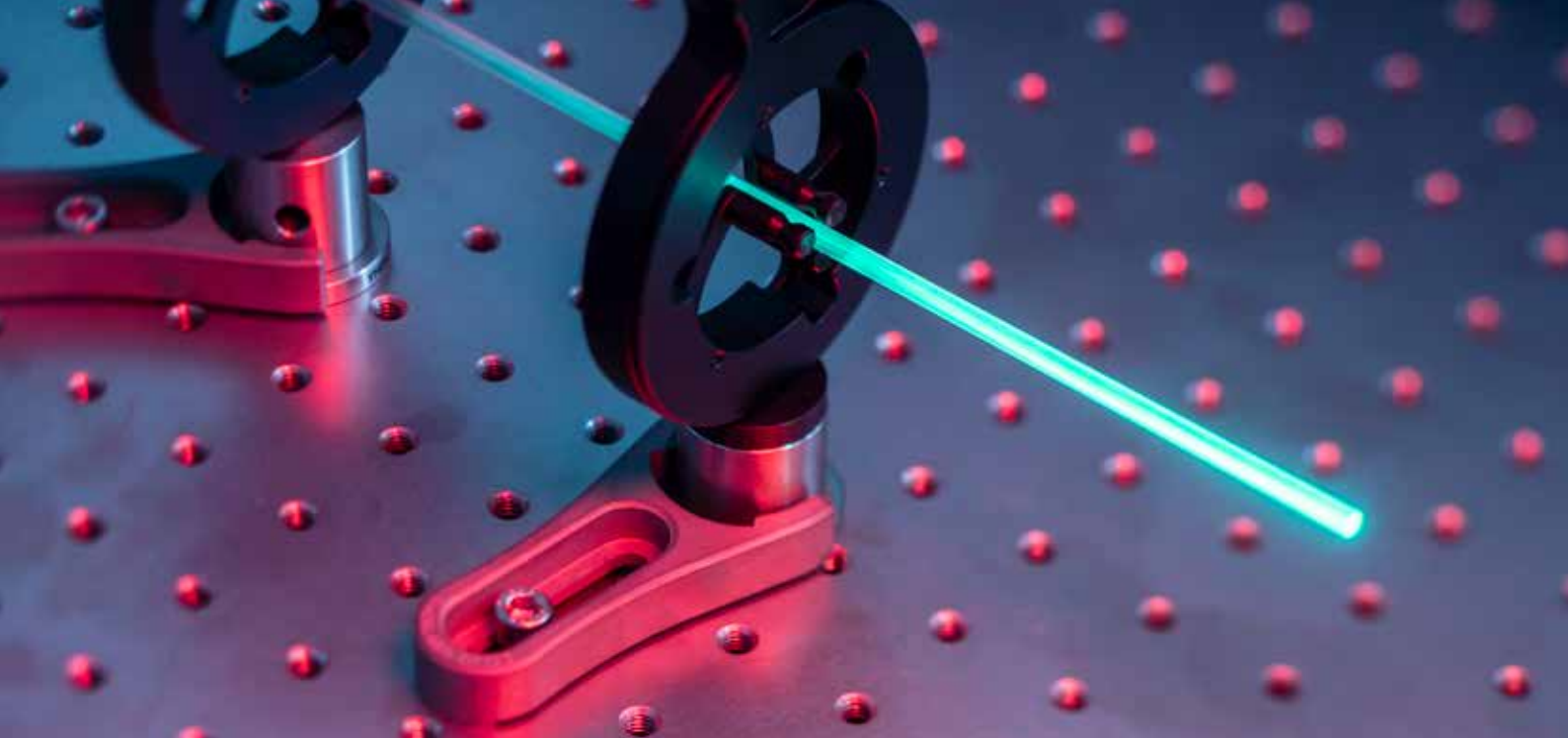
Dank ihres weitreichenden Gesichtsfeldes ist die Kamera besonders gut für die Erkennung von Menschen, etwa am Straßenrand oder auf Fahrradwegen, geeignet. Die Technologie adressiert damit Fahrerassistenzsysteme und autonome Fahrzeuge (Level 3 und höher) gleichermaßen.

Durch eine Optik, die im Wafermaßstab hergestellt werden kann, kann die Produktion vereinfacht und die Herstellkosten deutlich gesenkt werden. Die Infrarotkamera bietet deshalb auch für andere Anwendungen vielfältige Möglichkeiten. Dazu gehören die Detektion von Wärmeverlusten, Sicherheitsanwendungen bei der Kontrolle von z. B. Deponien oder Feuerwehreinsätzen sowie in der Überwachung industrieller Prozesse.

and cost-effective lithographic methods were used for its production, along with materials established in the automotive sector. As a result, the camera boasts fast optics ($f/1.1$) and high angular resolution ($16 \text{ px}/^\circ$), while maintaining a space-saving form factor.

The infrared camera is designed with a particularly wide field of view to detect pedestrians or cyclists even under poor lighting conditions, such as darkness or glare from oncoming traffic, making it well-suited for driver assistance systems and autonomous vehicles (Level 3 and above).

By using optics that can be manufactured on the wafer scale, production can be simplified and manufacturing costs significantly reduced. The infrared camera also offers a wide range of possibilities for other applications. These include detecting heat losses, safety applications for monitoring landfills or fire department operations, or in industrial process monitoring.



[1] Der Kühlungseffekt wird im Glas mit Laserlicht dadurch erreicht, dass einzelne Ionen innerhalb des zu kühlenden Materials zur Fluoreszenz angeregt werden. / The cooling effect in the glass using laser light is achieved by exciting individual ions within the material to be cooled to fluoresce.

Optische Laserkühlung: Neues Verfahren kühlt Quarzglas um 67 K

Schneiden, bohren, schweißen – mit Laserlicht verbinden wir normalerweise das Aufheizen von Materialien, um zum Beispiel Objekte aus Metall oder Gestein präzise zu bearbeiten. Unter bestimmten Umständen ist es jedoch auch möglich Materialien durch die Bestrahlung mit Laserlicht abzukühlen – ein Effekt, der als Dopplerkühlung von Gasen bekannt ist. Aber auch in Festkörpern kann es zu einer Kühlung durch Laserbestrahlung kommen.

Möglich wird dieser paradoxe Effekt durch die sogenannte Anti-Stokes Fluoreszenzkühlung. Bei diesem Verfahren wird ein spezielles, hochreines Material durch die Bestrahlung mit Laserlicht angeregt. Durch den Energieunterschied zwischen dem Anregungslaser und der vom Material ausgesendeten Strahlung, der Fluoreszenz, wird dem Material Energie in Form von Wärme entzogen – es wird gekühlt.

Ein Forscherteam des Fraunhofer IOF und der University of New Mexico haben sich diesen Effekt zu Nutze gemacht und damit eine neue Rekordkühlung von Quarzglas erreicht: Bei der Bestrahlung einer Ytterbium-dotierten Stange aus Quarzglas durch einen Anregungslaser mit einer Leistung von 97 W und einer Wellenlänge von 1.032 nm konnten die Forschenden eine Temperatursenkung innerhalb von zwei Minuten um 67 K unter Raumtemperatur nachweisen.

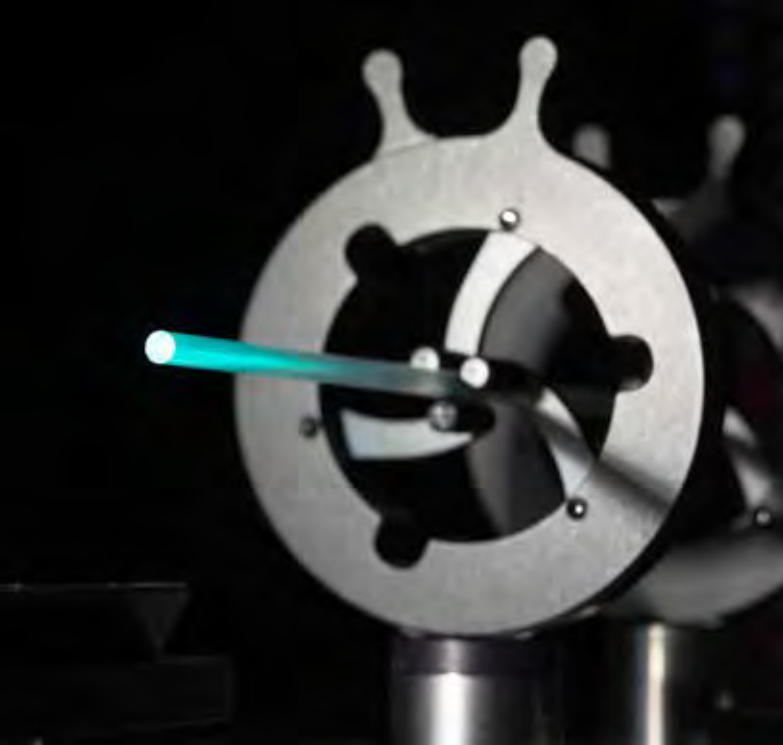
Optical laser cooling: new method cools silica glass by 67 K

Cutting, drilling, welding — we usually associate laser light with the heating of materials for example, to work with precision on objects made of metal or stone. But under specific circumstances, it is also possible to cool materials through radiation with laser light — an effect known for the Doppler cooling of gases. However, laser radiation can also cause cooling in solids.

This paradoxical effect is possible through so called anti-Stokes fluorescence cooling. In this process, a special, high-purity material is excited via laser light radiation. Due to the difference in energy between the excitation laser and the radiation emitted by the material, i.e., the fluorescence, energy is extracted from the material in the form of heat — it is cooled.

Researchers from Fraunhofer IOF and the University of New Mexico have made use of this effect to achieve a new record cooling quartz glass. Through the radiation of an ytterbium-doped silica rod by an excitation laser with a power of 97 W and a wavelength of 1.032 nm, the researchers were able to prove a temperature reduction from room temperature by 67 K within two minutes.

This builds on a 2019 breakthrough when cooling reached only 0.7 K. To overcome the previous cooling threshold, both



Optische Laserkühlung: Neues Verfahren kühlt Quarzglas um 67 K Optical Laser Cooling: New method cools Silica Glass by 67 K

[1] Ytterbium-dotierter Glasstab durch Laser angeregt /
Ytterbium-doped glass rod excited by laser

Authors

Dr. Nicoletta Haarlammert
Dr. Thomas Schreiber
Dr. Stefan Kuhn
Denny Hässner
Sigrun Hein
Dr. Johannes Nold

Contact

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

Dies baut auf einem Durchbruch aus dem Jahr 2019 auf, als die Kühlung nur 0,7 K erreichte. Um diese bisherige Kühlgrenze zu überwinden, wurde das spezielle Verfahren zur Herstellung des dotierten Materials und dessen Zusammensetzung optimiert. Für die Messungen, die an der University of New Mexico durchgeführt wurden, wurden außerdem in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOF die verwendeten Anregungslaser verbessert.

Durch die jetzige Weiterentwicklung können künftig neuartige, extrem stabile Laser und rauscharme Verstärker für die Präzisionsmesstechnik oder Quantenexperimente entwickelt werden. Das optimierte Verfahren kann zudem die vibrationsfreie Kühlung weiterentwickeln und damit neue Anwendungspotenziale in der Materialanalyse und medizinischen Diagnostik durch Cryo-Mikroskopie und Gamma-Spektroskopie ermöglichen.

Besonders interessant ist der nun mögliche Einsatz des Materials in Fasern. So könnten künftig Hochleistungs-Faserlaser entwickelt werden, die ohne begrenzende Effekte thermischer Instabilität auskommen.

Das neue Verfahren stellt einen bedeutenden Fortschritt in der Laserkühlung dar und markiert laut den theoretischen Überlegungen der Experten und Expertinnen noch nicht die größtmögliche Temperaturabsenkung mittels Laserlicht.

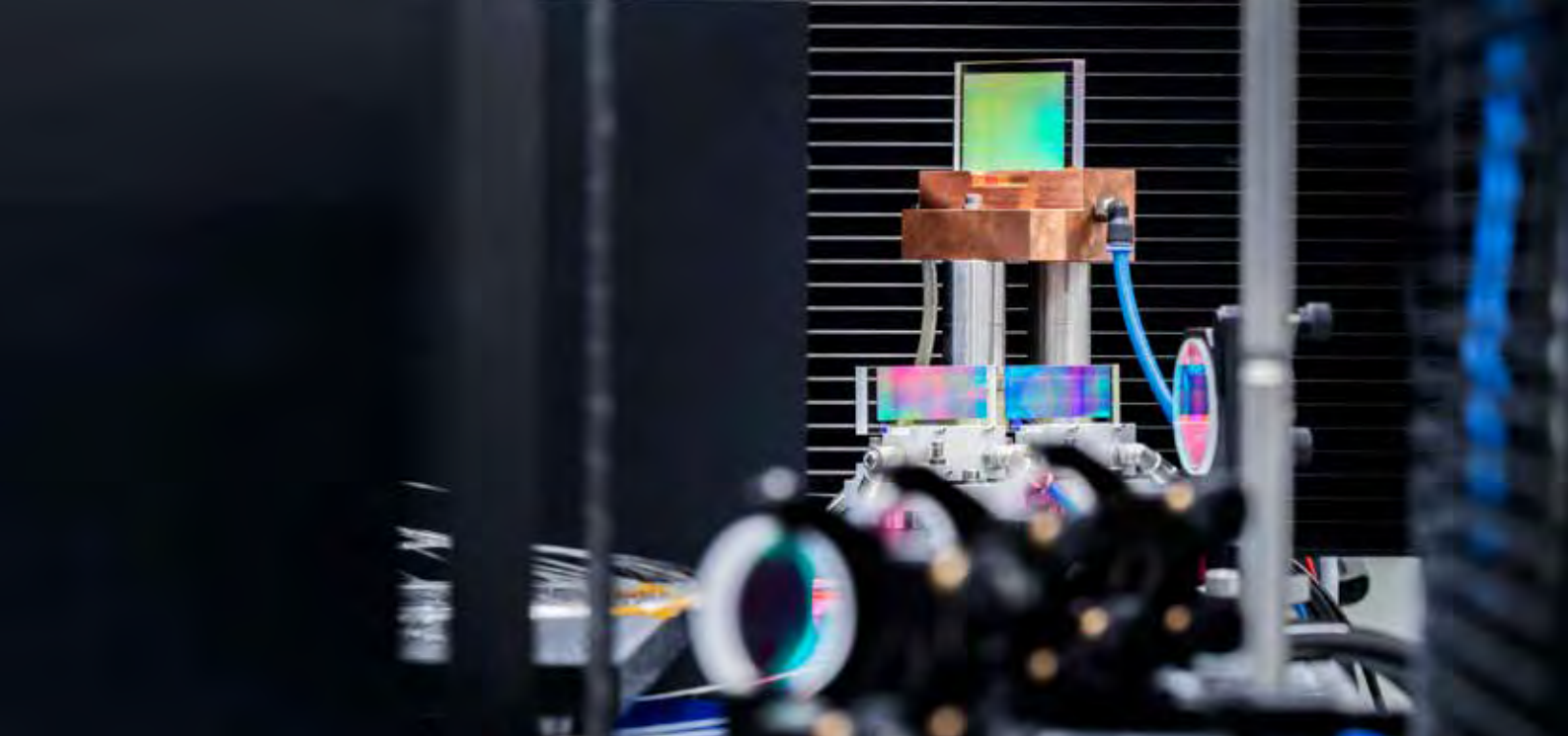
the specific process for manufacturing the doped material as well as its exact composition were optimized. Moreover, the excitation lasers used for the measurements conducted by the University of New Mexico were improved in close collaboration with Fraunhofer IOF.

Thanks to this new development, novel, extremely stable lasers and low-noise amplifiers for precision metrology or quantum experiments can be developed in future. The optimized process can advance vibration-free cooling and thus open new potentials for application in materials analysis and medical diagnostics through cryo-microscopy and gamma spectroscopy. The material's potential in fibers is also promising, potentially enabling high-performance fiber lasers without thermal instability.

The new process represents a significant advance in laser cooling and, according to the experts' theoretical considerations, does not yet mark the greatest possible temperature reduction using laser light.

Literatur / References

- 1 B. Topper et al., »Laser cooling ytterbium doped silica by 67 K from ambient temperature«, Optics Express 32, 3660-3672 (2024), DOI: 10.1364/OE.507657.



[1] Blick auf die Kombinationsgitter zur Strahlensammenführung der Einzelkanäle des Weltrekord-Lasers mit einer Gesamtleistung von 1,9 kW / View of the combiner gratings used to combine the beams of the individual channels of the world-record laser with a total output power of 1.9 kW

Spektrale Kombination zu 2 kW im augensicheren Bereich um 2 μm

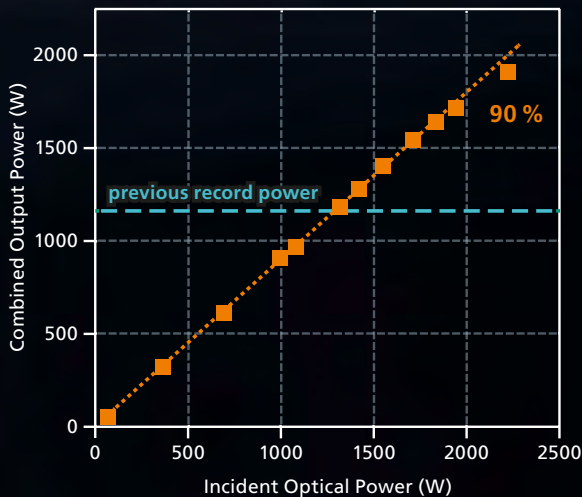
Hochleistungsfaserlaser sind ein vielseitig einsetzbares Werkzeug, da sie aufgrund exzellenter Strahlqualität Anwendungen adressieren können, welche sensitiv auf die Strahlform sind oder Strahlpropagation auf große Distanzen erfordern. Besonders interessant für Freistrahlanwendungen sind dabei Laser im Wellenlängenbereich um 2 μm , da hier die Gefährlichkeit der auftretenden Streustrahlung für das menschliche Auge reduziert ist. Für eine Propagation über große Distanzen eignet dabei sich aufgrund der Transmission der Atmosphäre der Spektralbereich oberhalb von 2.030 nm. Faserlaser mit Thulium als aktivem Verstärkungsmedium können in diesem Wellenlängenbereich arbeiten und erreichen heute die höchsten Leistungen dort. Die Leistung ist jedoch, wie auch schon bei Ytterbiumfaserlasern um 1 μm Wellenlänge, beschränkt durch auftretende nichtlineare Effekte oder thermisch induzierte Modeninstabilitäten. Während einige Nichtlinearitäten bei höheren Wellenlängen abgeschwächt werden, treten thermisch induzierte Probleme aufgrund eines hohen Quanten-defektes verstärkt auf. Die Ausgangsleistungen von Thulium-Faserlasern liegen daher üblicherweise einen Faktor 5 bis 10 unter denen von Ytterbium-Faserlasern. Um höhere Leistungen zu erreichen kann dann spektrale Strahlkombination eingesetzt werden: Strahlen leicht unterschiedlicher Wellenlänge werden unter verschiedenen, an die Wellenlänge angepassten Winkel auf ein Gitter eingestrahlt und durch die Beugung in einem einzelnen Ausgangsstrahl vereint.

Spectral beam combining up to 2 kW in the eye-safe region around 2 μm

High-power fiber lasers are a versatile tool. They can address applications that are sensitive to beam shape or require beam propagation over long distances thanks to their excellent beam quality. Lasers in the wavelength range around 2 μm are particularly interesting for free-space applications, as the danger to the human eye is reduced. For long distance applications, the spectral range above 2.030 nm is suitable due to atmospheric transmission. This spectral region is addressed by thulium fiber lasers. However, as with ytterbium fiber lasers around 1 μm wavelength, their power is constrained by nonlinear effects or thermally induced mode instabilities. Although some nonlinearities are mitigated at higher wavelengths, all thermally induced effects are exacerbated due to a high quantum defect. Therefore, the output powers of thulium fiber lasers are usually a factor of 5 to 10 lower than those of ytterbium fiber lasers. For higher powers, spectral beam combining can be employed: beams of slightly different wavelengths are directed onto a grating at different angles, each adapted to the wavelength, and combined into a single output beam through diffraction. This method preserves the beam quality of the input beams if the linewidth of the individual lasers is small enough.

At Fraunhofer IOF, three thulium-doped fiber amplifiers with different central wavelengths were developed to achieve a maximum output power at 2 μm . A fully monolithic approach ensured no alignment sensitivity and thus increased reliability.

Spektrale Kombination zu 2 kW im Bereich um 2 μm Spectral beam combining up to 2 kW in the region around 2 μm



[2] Ausgangsleistung des spektral kombinierten Systems bei 2 μm Wellenlänge / Output power of the 2 μm spectral beam combining system

Authors

Dr. Till Walbaum
Friedrich Möller
Dr. Tilman Lühder
Sascha Ehrhardt
Dr. Thomas Schreiber

Contact

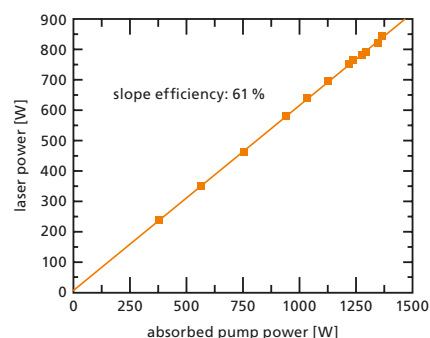
Dr. Till Walbaum
Phone +49 3641 807-705
till.walbaum@iof.fraunhofer.de

Am Fraunhofer IOF wurden zum Erreichen maximaler Leistung bei 2 μm daher zunächst drei Thulium-Hochleistungsfaserverstärker bei unterschiedlichen Zentralwellenlängen entwickelt. Hierbei wurde ein vollständig monolithischer Ansatz gewählt, welcher keine Justageempfindlichkeit und damit erhöhte Zuverlässigkeit aufweist. Es konnte bei einer optischen Effizienz von 61 % eine Ausgangsleistung pro Einzelverstärker von über 840 W erzielt werden, mehr als doppelt so viel wie kommerziell verfügbar. Durch die Verstärkerarchitektur konnte neben der hervorragenden Strahlqualität auch eine geringe Bandbreite bei voller Leistung sichergestellt werden, welche zur spektralen Kombination notwendig ist. Letztlich wurden diese Einzelkanäle in ihrer Leistung durch Modeninstabilitäten limitiert.

Zur weiteren Erhöhung der Ausgangsleistung wurden die drei Lasersysteme in einem Gesamtsystem spektral kombiniert. Hierbei wurden am IOF entwickelte Hochleistungsgitter verwendet, welche eine besonders hohe Beugungseffizienz unabhängig von der Polarisation des Lichtes erlauben. Bei Erhalt der Strahlqualität konnte auf diesem Weg eine Ausgangsleistung von 1,9 kW im Dauerstrichbetrieb demonstriert werden, wobei eine Kombinationseffizienz von 90 % erreicht wurde. Hiermit wurde der vorherige Leistungsweltrekord in diesem Spektralbereich nahezu verdoppelt.

At an optical efficiency of 61 %, 840 W of output power was achieved from an individual amplifier. This is more than twice that of commercially available systems. The amplifier architecture ensured excellent beam quality while maintaining a narrow bandwidth at full power, which is necessary for spectral combination. Ultimately, these individual channels were power-limited due to mode instabilities.

For further power scaling, the three laser systems were spectrally combined using high-performance gratings developed at the IOF. These allowed for exceptionally high diffraction efficiency regardless of the polarization. While maintaining beam quality, an output power of 1.9 kW in continuous wave operation was demonstrated, achieving a combination efficiency of 90 %. This nearly doubled the previous world record for power in this spectral range.



[3] Leistungskennlinie des IOF-Hochleistungsfaserverstärkers bei 2 μm Wellenlänge / Power slope of the IOF 2 μm high power fiber amplifier

Literatur / References

- 1 F. Möller et al., »Spectral beam combining of kW-class thulium-doped fiber lasers«, Proc. SPIE 12865, Fiber Lasers XXI: Technology and Systems, 128650S (12 March 2024).



[1] Symbolische Visualisierung der Entstehung von Gravitationswellen durch die Kollision zweier schwarzer Löcher / Symbolic visualization of the formation of gravitational waves through the collision of two black holes

Kompakter Resonator für das Einstein-Teleskop

Von der bahnbrechenden Messung der Gravitationswellen bis zur monumentalen Entdeckung des Higgs-Bosons: Die empfindlichsten physikalischen Experimente der Welt verschieben die Grenzen der Wissenschaft und eröffnen neue, grundlegende Erkenntnisse. Ein wesentliches Element dieser Experimente ist der Bedarf an leistungsfähigen Inertialsensoren, welche niederfrequente Schwingungen überwachen, die durch seismische Störungen oder ungedämpfte Resonanzen verursacht werden. Für die Sensorik kommen hier insbesondere Resonatoren im Frequenzbereich 0,01 – 100 Hz zum Einsatz, die allerdings aktuell unhandlich und nur eingeschränkt funktional sind.

Das Fraunhofer IOF hat ein innovatives Fertigungsverfahren zur Herstellung von kompakten, niederfrequenten Quarzglasresonatoren mit einem sehr hohen Gütefaktor, Q , entwickelt. Unser Ansatz nutzt fortschrittliche Techniken wie das direkte Fügen von Glasoberflächen und das chemisch-mechanische Polieren (CMP). Beide Methoden sind in der Halbleiterindustrie gut etabliert. Wir haben diese Methoden speziell auf die Herstellung von Resonatoren angepasst, welche sich ideal für Inertialsensoren in Gravitationswellenobservatorien der nächsten Generation eignen. Anwendung finden sollen diese Resonatoren im Einstein-Teleskop und damit hochsensitive Messungen erstmalig ermöglichen. Darüber hinaus wird erwartet, dass sie zu einem Fortschritt in anderen Anwendungsbereichen führen werden, zum Beispiel in Bezug auf Atominterferometer und EUV-Lithographiesysteme (EUV = extrem ultraviolettes Licht).

Compact resonator for the Einstein Telescope

From the groundbreaking detection of gravitational waves to the monumental discovery of the Higgs boson: The world's most sensitive physics experiments are pushing the boundaries of science and revealing new, fundamental insights. A crucial element in these experiments is the need for high-performance inertial sensors that monitor low-frequency vibrations caused by seismic disturbances or undamped resonances. For this purpose, particularly resonators operating in the frequency range 0.01 – 100 Hz are used; however, they are currently bulky and have limited functionality.

Fraunhofer IOF has developed an innovative manufacturing method for compact and low-resonance frequency fused silica resonators with a very high-quality factor, Q . Our approach leverages advanced techniques such as direct bonding of glass surfaces and chemical-mechanical polishing (CMP), both of which are well-established in the semiconductor industry. We have designed this method specifically to create resonators ideal for inertial sensors in next-generation gravitational wave observatories. These resonators are to be used in the Einstein Telescope and will enable highly sensitive measurements for the first time. In addition, it is expected that it will lead to an advancement in other research fields by improving, for example, atom interferometers and extreme ultraviolet (EUV) lithography systems.

Direct bonding allows for the permanent connection of fused silica components without the need for lossy, polymeric



[2] Mit Ausnahme der Goldbeschichtung, die als Spiegel für den interferometrischen Aufbau dient, ist der Resonator ein quasi-monolithisches Quarzglasbauteil. / Except for the gold coating, which works as a mirror for the interferometric setup, the resonator is a quasi-monolithic fused silica piece.

Authors

Dr. Pascal Birckigt
Gilbert Leibelung
Dr. Stefan Risse

Contact

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

Das direkte Fügen ermöglicht die dauerhafte Verbindung von Quarzglasbauteilen ohne verlustbehaftete, polymere Zwischenschichten (wie zum Beispiel Klebstoff) und gewährleistet damit eine hervorragende Grenzflächenqualität. Die gefügten Werkstücke am Fraunhofer IOF weisen eine beeindruckende Festigkeit, minimale Grenzflächenreflexion und keine Ausgasung auf, was sie für eine Vielzahl an Anwendungen sehr zuverlässig macht. Das CMP-Verfahren verbessert die Oberflächenqualität, indem es die Rauheit auf wenige Ångström minimiert und gleichzeitig die Ebenheit erhält. Diese Vorbehandlung ist wesentlich für das Erreichen der Voraussetzungen für das direkte Fügen sowie der mechanischen Eigenschaften der Resonatoren.

Das Fraunhofer IOF hat erfolgreich mehrere solcher sehr kompakten (nur 15 g Gewicht) Quarzglasresonatoren entwickelt, die Gütefaktoren von $Q > 100.000$ bei einer Resonanzfrequenz von unter 20 Hz bieten und damit ideal für Anwendungen mit empfindlichsten und zugleich bauraumbegrenzten Anforderungen sind.

Durch die fortschrittliche Herstellungsmethode der Resonatoren können ambitionierte Projekte an der Spitze der wissenschaftlichen Forschung adressiert werden und den Weg für wissenschaftliche und technologische Fortschritte ebnen.

intermediate layers (such as glue), ensuring exceptional interface qualities. The bonded workpieces at Fraunhofer IOF exhibit impressive bonding strength, minimal interface reflectance, and no out-gassing, making them highly reliable for a multitude of applications. The CMP process enhances the surface quality by minimizing roughness to a few Ångström while maintaining planarity. This refinement is essential for achieving the direct bonding pre-requisites as well as mechanical properties in the resonators.

Fraunhofer IOF has successfully developed several very compact (only 15 g weight) fused silica resonators that offer quality factors of $Q > 100,000$ at a resonance frequency below 20 Hz, making them ideal for applications with sensitive and also space-limited requirements.

The advanced manufacturing method of the resonators can address ambitious projects at the forefront of scientific research and pave the way for scientific and technological advances.

Literatur / References

- 1 Birckigt et al., Opt. Lett. 49(21), 2024, doi:10.1364/OL.542065
- 2 Birckigt et al., Appl. Phys. A. 127, 2021, doi:10.1007/s00339-021-05076-6



[1] Metalloptik M2 für das Teleskop / Metal optic M2 for the telescope

Rainbow: Hyperspektrales Spektrometer-on-Chip für Smart Farming

Im Rahmen des Projekts Rainbow wurde ein hyperspektrales Spektrometer entwickelt, um mittels Smart Farming das übergeordnete Ziel einer verbesserten Bereitstellung von Nahrung und einer planvollen Wasserwirtschaft für die Menschheit zu erreichen. Die Technologie ermöglicht die Erstellung digitaler Feldkarten, die Landwirt:innen als präzise Applikationskarten für standortangepasste Maßnahmen wie Bewässerung, Düngung oder für Pflanzenschutzmaßnahmen nutzen können. Dies trägt nicht nur zur Effizienzsteigerung bei, sondern reduziert auch den Verbrauch von Ressourcen und fördert eine nachhaltigere Landwirtschaft.¹

Der zentrale technologische Ansatz ist ein Spektrometer-on-Chip-Konzept. Dabei werden die erforderlichen spektralen Bänder der Anwendung 1 : 1 auf einen Gradientenfilter abgebildet, der direkt vor dem Detektor integriert ist. Im Vergleich zu anderen Konzepten ermöglicht das Design, durch die selektiv aufgetragenen Filter, eine effiziente Anpassung der für den Anwendungsfall benötigten Spektralkanäle. Im Unterschied zu herkömmlichen dispersiven Spektrometern erlaubt das Prinzip gleichzeitig eine deutlichere Miniaturisierung des gesamten optischen Instruments. Möglich wird diese kompakte Bauweise dank einer Metalloptik aus dem Fraunhofer IOF. Die Miniaturisierung ist ein entscheidender Schritt zur Integration der Technologie in Kleinsatelliten und bildet somit die Grundlage für eine flexible Anwendung.

Rainbow: hyperspectral spectrometer-on-chip for smart farming

Within the Rainbow project, a hyperspectral spectrometer has been developed in order to increase the possibilities of smart farming for widespread applications. The overall goal is to improve food supply and facilitate strategic water management. Through the application of this technology, agricultural producers will be able to use digital field maps, which will enable them to plan precise application measures such as irrigation, fertilization, or crop protection. This enhances efficiency and also reduces resource consumption and contributes to a more sustainable agriculture system.¹

The central technological approach is a spectrometer-on-chip concept. In this design, the required spectral bands for the application are mapped 1 : 1 onto a gradient filter integrated directly in front of the detector. Compared to other concepts, the design, with its selectively applied filters, enables efficient adaptation of the spectral channels needed for the specific application case. Unlike conventional dispersive spectrometers, this principle also enables a much more compact miniaturization of the entire optical instrument. This compact design is made possible by metal optics from Fraunhofer IOF. The miniaturization is a crucial step towards integrating the technology into small satellites, providing the foundation for a variety of applications.



Rainbow: Hyperspektrales Spektrometer-on-Chip für Smart Farming

Rainbow: hyperspectral spectrometer-on-chip for smart farming

[2] Inspektion des Rainbow-Teleskops / Inspection of the Rainbow Telescope

Authors

Lucas Zettlitz
Andreas Gebhardt
Dr. Nils Heidler
Dr. Stefan Risse
Dr. R. Münzenmayer³

Contact

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

³ Airbus Defence and Space GmbH

Das Gesamtsystem wird von Airbus Defence and Space entwickelt, während das Fraunhofer IOF seit 2023 als Unterauftragnehmer die Entwicklung, Fertigung und Integration des Teleskops sowie des Filters verantwortet. Das Kernstück des Systems bildet ein Ritchey-Chrétien-Teleskop, das in Kombination mit einem linearen Gradientenfilter verwendet wird. Der Filter wurde vom Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) in Braunschweig speziell für diese Anwendung entwickelt und gefertigt.²

Das Teleskop erreicht in Kombination mit dem gewählten Detektor eine räumliche Auflösung von weniger als 20 m im Spektralbereich von 400 nm – 1.700 nm. Es kombiniert additiv gefertigte Komponenten und präzise Metalloptiken in Leichtbauweise, wodurch die Anwendung vom sichtbaren bis in den nahen Infrarotbereich realisiert werden kann. Besonderer Wert wurde auf eine kompakte Bauweise und einen sehr geringen Justieraufwand des Teleskops gelegt, um eine kosteneffiziente Umsetzung zu gewährleisten. Die Entwicklung der technologischen Grundlagen sowie der Prototyp eines weltraumtauglichen Spektrometer-on-Chip stellen einen entscheidenden Fortschritt dar, um Smart Farming Services kommerziell für eine breite Zielgruppe an Anwendern zugänglich und nutzbar zu machen.

Danksagung

Das Rainbow-Projekt wird von der ESA im Rahmen des InCubed+ Programmes gefördert.

Literatur / References

- ¹ ESA Phi-Lab InCubed Portfolio
- ² C. Britze, P. Farr et al. »Development of a compact gradient bandpass filter for hyperspectral imaging from the VIS to SWIR range«, International Conference on Space Optics ICSO, Antibes, 2024

The development of the overall system is being led by Airbus Defence and Space, with Fraunhofer IOF serving as a subcontractor for the development, production, and integration of the telescope and filter since 2023. A Ritchey-Chrétien telescope is used as the core of the system in conjunction with a linear gradient filter. For this application, the Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films (IST) in Braunschweig developed and manufactured the filter.²

Using the telescope in conjunction with the chosen detector, it is feasible to attain a spatial resolution of less than 20 m within the spectral range of 400 nm – 1,700 nm. The system combines additively manufactured components with precise lightweight metal optics, enabling applications in the visible to near-infrared wavelength range. Special focus was given to a compact design and a minimal alignment effort for the telescope to ensure cost-effective implementation. The development of the technology foundation and the prototype of a space-useable spectrometer-on-chip represents a significant milestone forward in making smart farming services commercially available and usable by a broad group of users.

Acknowledgement

The Rainbow project is supported by ESA as part of the InCubed+ program.



[1] Justage eines Freiformspiegels zur Gewinnung von Streulichtdaten für das Vorhersagemodell der Streulichtperformance des optischen Systems eines Erdbeobachtungssatelliten / Alignment of a free-form mirror to obtain light scattering data for the stray light performance prediction model of the optical system of an Earth observation satellite

Prognose kontaminations-induzierten Streulichts in optischen Systemen

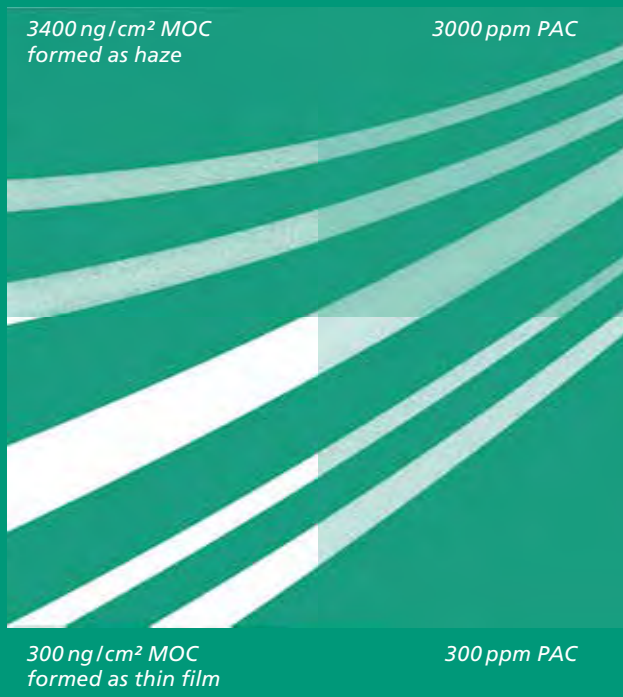
Durch die Qualitätsentwicklungen bei der Herstellung von hochmodernen optischen Komponenten und Systemen werden durch Kontaminationen induzierte Effekte – sei es durch Partikelkontamination (PAC) oder molekulare organische Kontamination (MOC) – zunehmend zu den kritischen leistungsbegrenzenden Parametern. Diese Kontaminationen, die während Herstellung, Montage, Charakterisierung und Lagerung auftreten, führen zu optischen Leistungsverlusten oder Streulicht und verschlechtern so Kontrast und Bildqualität.

Insbesondere bei der Entwicklung optischer Instrumente für Weltraumanwendungen ist die Unterdrückung von Streulicht eine der treibenden Anforderungen. Während Streulicht, welches durch Oberflächenrauheit entsteht, in der Herstellung mittlerweile gut kontrolliert werden kann, bleibt kontaminationsinduziertes Streulicht als wesentlicher Beitrag zur Streulichtperformance erhalten. Daher wurde im Rahmen eines von der ESA³ initiierten Projekts gemeinsam mit OHB⁴ eine umfassende Studie durchgeführt, die darauf abzielte, dass durch Kontamination (PAC und MOC) induzierte Streulicht auf optischen Oberflächen und in optischen Systemen zu verstehen. Dies umfasste einen systematischen Ansatz zur Erzeugung typischer kontaminierter Proben in Reinräumen, die Durchführung von Messungen der bidirektionalen Streulichtverteilungsfunktion (BSDF) bei verschiedenen Wellenlängen von Ultraviolett bis Infrarot,¹ die Ableitung flächendeckender Streulichtdaten

Prediction of contamination induced stray light in optical systems

Through the quality driving developments in fabrication of cutting-edge optical components and systems, effects induced by contamination — whether particle contamination (PAC) or molecular organic contamination (MOC) — are becoming critical performance-limiting factors. This contamination, which is accumulated during fabrication, assembly, testing, and storage, results in optical power loss or stray light that degrades contrast and imaging quality.

In particular in optical space instrumentation, the suppression of straylight is one of the driving requirements. As straylight emerging from surface roughness is well controlled in fabrication, straylight induced by contamination remains as a primary contributor to the straylight performance. In a joint project with OHB⁴ initiated by ESA³, a comprehensive study that aimed to understand light scattering induced by contamination (PAC & MOC) was conducted. This involved the generation of typical contaminated samples in clean rooms, measurements of Bidirectional Scattering Distribution Functions (BSDF) at various wavelengths from ultraviolet to infrared,¹ derivation of full surface scattering data using novel assessment methods,² and a correlation analysis from an experimental and modelling perspective. The results provided significant insights into the relationship between contamination levels and light scattering characteristics.² Besides the nearly linear relation between scattering and the corresponding PAC level (see Fig. 3), the



[2] Einfluss verschiedener Kontaminationsniveaus/-typen auf eine Abbildung für ein spiegelbasiertes Objektiv (TMA) zur Erdbeobachtung (logarithmische Skala) / Influence of different contamination levels/types on an image for a mirror-based objective (TMA) for earth observation (log scale)

mithilfe neuartiger Analysemethoden² und die experimentelle und modelltheoretische Korrelation der Kontaminationen mit Streulichtverteilungen. Das Hauptziel der Arbeiten war die Entwicklung repräsentativer Modelle und Methoden zur Vorhersage und Budgetierung des kontaminationsinduzierten Streulichts. Die gewonnenen Ergebnisse lieferten zahlreiche neue Einblicke in die Beziehung zwischen Kontaminationsniveaus und Streulichteigenschaften.² Neben der nahezu linearen Beziehung zwischen Streuung und dem entsprechenden PAC-Niveau (s. Abb. 3) kann beispielsweise der Einfluss von MOC enorm sein, je nachdem ob sich MOC als dünner Film, der nahezu nicht von der sauberen Oberfläche zu unterscheiden ist, oder als kleine Tropfen mit enormen Streueffekten niedergeschlagen hat.

Zentrales Projektergebnis ist die Implementierung eines umfassenden Rahmens aus Analysetechniken und Modellierungsansätzen beispielsweise auf Basis der Mie-Theorie für Partikelstreuung oder der Dünnschichttheorie für durch MOC induziertes Streulicht, der es ermöglicht, die Auswirkungen verschiedener Kontaminationstypen oder Expositionszeiten auf Komponenten- und Systemebene genau vorherzusagen (s. Abb. 2). Umgekehrt wird die zuverlässige Ableitung von Kontaminationsbudgets ermöglicht und hochkritische Komponenten für die Streulichtperformance können identifiziert werden.

Literatur / References

- 1 S. Schröder et al., »Angle-resolved scattering: an effective method for characterizing thin-film coatings,« Appl. Opt. 50(9) (2010)
- 2 T. Herfurth et al., »Light Scattering of optical Components and their Imperfections: Measurement, Modelling, and System Analysis,« EPJ Web of Conferences 309, 03015 (2024)

Prognose kontaminationsinduzierten Streulichts in optischen Systemen Prediction of contamination induced stray light in optical systems

- 3 ESA (European Space Agency)
- 4 OHB System AG (Raumfahrtsysteme)

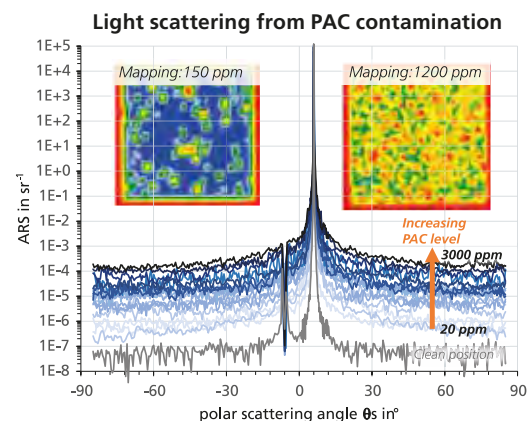
Authors

Dr. Tobias Herfurth
Dr. Anne-Sophie Munser
Volker Kirschner³
Dr. Sebastian Fray⁴
Dr. Sven Schröder

Contact

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

[3] Winkelaufgelöste Streuverteilungen für steigende PAC-Kontaminationswerte inkl. Streumappings zweier 30 × 30 mm² großen Siliziumwafer / Angle resolved scattering distributions for increasing PAC contamination level with scattering mappings of two 30 × 30 mm² silicon wafers



influence of MOC can be significant, depending on whether the MOC forms as a thin film that is almost indistinguishable to the uncontaminated surface or as small droplets with substantial scattering effects.

Finally, a thorough framework of analysis techniques and modelling approaches based on Mie theory for particle scattering and thin film theory for MOC induced scattering was implemented that enables the effects of different contamination types or exposure times to be predicted accurately on component and system level (see Fig. 2). Conversely, the reliable derivation of contamination budgets is enabled and critical components for the stray light performance can be identified.



[1] goCRASH3D (rechts) schaut mit seinen Kameras auf den Dummy. Die Auflösung der beiden 2D-Kameras ist jeweils 512 × 512 px. / goCRASH3D (right) looks at the dummy with its cameras. The resolution of the two 2D cameras is 512 × 512 px each.

3D-Sensor für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Fahrzeugen

Seit mehr als zehn Jahren wird am Fraunhofer IOF an der Erfassung von 3D-Daten mit Hochgeschwindigkeitskameras gearbeitet. Im Wesentlichen besteht ein solches System aus zwei Kameras, einer Beleuchtungseinheit und einem Computer. »Der Knackpunkt dabei ist eigentlich nicht die Kamera, sondern die Beleuchtung«, erklärt Projektleiter Kevin Srokos. Dafür haben die Forschenden die GOBO-Technologie aus der Bühnentechnik für ihre Zwecke weiterentwickelt.

Beim neuen Projektionsverfahren rotiert eine Scheibe mit einem unregelmäßigen Streifenmuster vor einer starken Lichtquelle. Das gibt ein nichtperiodisches Sinusmuster auf dem zu messenden Objekt. Damit lassen sich Punkte in den Bildern der Kameras, die unter verschiedenen Winkeln auf das Objekt schauen, eindeutig zuordnen. Aus den Kamerapositionen und dem Versatz der Bildpunkte werden die 3D-Koordinaten für die Punkte der Aufnahmen berechnet.

Das System wurde früh in der Automobilindustrie getestet, etwa zur zeitaufgelösten Beobachtung der Airbag-Entfaltung. Bereits 2017 entstand die Idee, das System ins Fahrzeuginnere zu verlagern. In Zusammenarbeit mit VW entstand ein Demonstrator, der seit 2023 beim Automobilhersteller getestet wird.

3D sensor for high-speed recordings in vehicles

For more than a decade, Fraunhofer IOF has been working on capturing 3D data with high-speed cameras. Essentially, such a system consists of two cameras, a projector, and a computer. "The crux of the matter is not actually the camera, but the lighting," explains project manager Kevin Srokos. The researchers further developed the GOBO technique from stage technology for their purposes years ago.

The new projection technique uses a disk with an irregular fringe pattern, which rotates in front of a high-power light source. This produces a non-periodic sinusoidal pattern on the object to be measured. This allows points in the images from the cameras looking at the object from different angles to be matched. The 3D coordinates for the points in the images are calculated from the camera positions and the offset of the image points.

The system was tested in the automotive industry at an early stage, for example for time-resolved monitoring of airbag deployment. The idea of moving the system into the vehicle interior emerged in 2017. A demonstrator was developed in collaboration with VW and has been tested by the project partner since 2023.



Authors

Kevin Srokos
Ingo Gebhart
Dr. Stefan Heist
Dr. Peter Kühmstedt

Contact

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

[2] Das goCRASH3D-System erfasst mit zwei Kameras (l. u. r.) und einer starken Beleuchtung (M.) bis zu 12.000 2D-Bilder pro Sekunde, aus denen etwa 1.200 3D-Bilder errechnet werden. / The goCRASH3D system uses two cameras (left and right) and powerful lighting (center) to capture up to 12,000 2D images per second, from which around 1,200 3D images are calculated.

Mit goCRASH3D lassen sich Vorgänge beobachten, die vorher nicht oder nur sehr eingeschränkt zugänglich waren. Dafür wird bei dem System eine Einzel-LED mit 15.000 lx Beleuchtungsstärke benutzt. Die beiden Kameras liefern jeweils 12.000 Bilder pro Sekunde mit 512 × 512 px. Daraus berechnet der Computer etwa 1.200 3D-Bilder pro Sekunde. Das Bildfeld in den Versuchen war 70 × 70 cm² in einem Meter Abstand. Diese Parameter können an die Versuche angepasst werden.

Das System mit zwei Kameras und der Beleuchtungseinheit ist in einem Rahmen montiert, in dem die Komponenten über Elastomerpuffer gegen die Beschleunigung geschützt sind. Dadurch kann das System Beschleunigungen bis zu 200g und Schocks bis 60g regelmäßig standhalten. Der Rahmen wird dafür im Fahrzeug festmontiert.

Aktuell wird goCRASH3D beim Projektpartner genutzt und am Fraunhofer IOF weiterentwickelt. Das System wurde für und mit der Automobilbranche entwickelt, aber auch andere Anwendungen im Sicherheitsbereich oder in der Sportmedizin sind denkbar. Mittelfristig passt die Technik für 3D-Hochgeschwindigkeitsaufnahmen hervorragend zu den wachsenden Sicherheitsansprüchen im Automobilbereich.

With goCRASH3D, it is possible to observe processes that were previously inaccessible or only accessible to a very limited extent. For this, the system uses a single LED with 15,000 lx illuminance. The two cameras each deliver 12,000 images per second with 512 × 512 px. From this, the computer calculates around 1,200 3D images per second. The field of view in the experiments was 70 × 70 cm² at a distance of one meter. These parameters can be adapted to the experiments.

The system with two cameras and the projection unit is mounted in a frame in which the components are protected against acceleration by elastomer buffers. This enables the system to withstand accelerations of up to 200g and shocks of up to 60g on a regular basis. The frame is permanently mounted in the vehicle for this purpose.

goCRASH3D is currently being used by the project partner and further developed at Fraunhofer IOF. The system was developed for and with the automotive industry. However, applications in the safety sector or in sports medicine are conceivable. In the medium term, the technology for 3D high-speed recordings is an excellent solution for the growing safety requirements in the automotive sector.

Literatur / References

- 1 S. Heist et al., »High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection«, Optics and Lasers in Engineering (2016)
- 2 S. Heist et al., »GOBO projection for 3D measurements at highest frame rates: a performance analysis«, Light: Science & Applications (2018)



[1] Die Kombination aus Roboterhund und Handscanner macht 3D-Messverfahren noch agiler und flexibler /
The unit of a robot dog and the handheld 3D scanner makes the measuring process even more agile and flexible

Mobile 3D-Vermessung mit Schreitroboter

Ob zur Wartung komplexer Bauteile oder bei der Qualitätskontrolle in der Automobilindustrie: Virtuelle 3D-Modelle ermöglichen die präzise Dokumentation großer Maschinen und ihrer kleinen Details. Dafür haben die Forschenden des Fraunhofer IOF bereits im vergangenen Jahr den mobilen Handscanner goSCOUT3D entwickelt. Er ermöglicht die 2D- und 3D-Digitalisierung komplexer, im Volumen mehrere Kubikmeter umfassende Objekte mit einer besonders hohen räumlichen Auflösung von weniger als 0,25 mm.

Bisher musste zur Erstellung dieser »digitalen Zwillinge« der Scanner manuell um das Objekt bewegt werden. In der Anwendung wurde dabei eine gleichbleibende Geschwindigkeit in der Führung des Sensorkopfes und die konstante Einhaltung eines vorgegebenen Messabstandes verlangt. Ermüdungserscheinungen oder Unvollständigkeit der Messdaten waren zum Teil die Folge.

Um die Messungen künftig komfortabler und zugleich für den betrieblichen Prozess effizienter zu gestalten, kombinierten die Forschenden den 3D-Scanner mit dem Roboterhund SPOT der Firma Boston Dynamics. Durch die Integration soll der Messprozess des goSCOUT3D-Scanners künftig automatisiert und ohne den ständigen Bedarf nach Beaufsichtigung möglich sein. Der Roboterhund kann goSCOUT3D autonom durch die Messszenarie manövrieren, bei gleichbleibender Geschwindigkeit und -abstand. Dadurch kann das Messobjekt von allen Seiten sowie auf verschiedenen Ebenen vollständig erfasst werden.

Mobile 3D measurement with walking robot

Whether for the maintenance of complex components or for quality control in the automotive industry: virtual 3D models enable precise documentation of large machines and their small details. To this end, researchers at Fraunhofer IOF developed the mobile hand scanner goSCOUT3D last year. It enables the 2D and 3D digitization of complex objects with a volume of several cubic meters with a particularly high spatial resolution of less than 0.25 mm.

Until now, the scanner had to be moved manually around the object to create these 'digital twins'. In practice, this required a consistent speed in guiding the sensor head while constantly maintaining a predefined measuring distance, sometimes resulting in fatigue or incomplete measurement data.

In order to make the measurement more convenient and, at the same time, more efficient for the operational process in the future, the researchers combined the 3D scanner with robot dog SPOT from Boston Dynamics. The integration should make it possible to automate the goSCOUT3D scanner measurement process in the future and to eliminate the constant need for supervision. The robot dog can maneuver goSCOUT3D autonomously through the measuring scene, while maintaining the same speed and distance. This allows the object being measured to be fully captured from all sides and at different levels. In addition, greater reproducibility of the results and a reduction in the measurement time are possible due to fewer redundancies. This makes the integrated



Mobile 3D-Vermessung mit Schreitroboter Mobile 3D measurement with walking robot

[2] Mithilfe des Sensors vermisst der Roboterhund komplexe Bauteile / With the help of the sensor, the robot dog measures complex components

Authors

Dr. Andreas Breitbarth
Sascha Julia Römhild
Roland Ramm
Kevin Srokos
Dr. Marc Preißler
Dr. Peter Kühmstedt

Contact

Dr. Andreas Breitbarth
Phone +49 3641 807-234
andreas.breitbarth@
iof.fraunhofer.de

Darüber hinaus ist eine größere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und ein Verringern der Messdauer durch weniger Redundanzen möglich. Das macht die integrierte Messeinheit besonders interessant für die Anwendung in seriellen Fertigungsprozessen oder der Qualitätskontrolle.

Dazu bedarf es einer verlässlichen Koordination zwischen dem Roboter und dem 3D-Sensor. Hierzu wird mit einer Hand-Auge-Kalibrierung der 3D-Sensor an das Koordinatensystem des Roboters angekoppelt.

Sobald der Schreitroboter einmal mit dem Scanner kalibriert ist, kann er durch menschliche Expertinnen und Experten auf die Messung vordefinierter Objekte hin programmiert werden. So könnte SPOT künftig z. B. Routinemessungen übernehmen. Die menschlichen Fachkräfte können stattdessen ihren Fokus auf kritische Aspekte der Überprüfung sowie Analyse und Auswertung der erstellten 2D- sowie 3D-Daten legen. Weiterhin soll die Kopplung auch Methoden zur Fernsteuerung bzw. -überwachung ermöglichen.

measuring unit particularly interesting for use in serial production processes or quality control.

This requires reliable coordination between the robot and the 3D sensor. To this end, a hand-eye calibration is used to couple the 3D sensor to the robot's coordinate system.

Once the walking robot has been calibrated with the scanner, it can be programmed by human experts to measure pre-defined objects. This means that SPOT could take over routine measurements in the future, for example. The human experts can instead focus on critical aspects of the inspection as well as the analysis and evaluation of the 2D and 3D data created. Furthermore, the coupling should also enable methods for remote control and monitoring.



Weitere Jahreshighlights
Additional Highlights of the Year





Jena ist einer jener Leuchttürme, die weltweite Strahlkraft entwickelt haben.«

“Jena is one of those
beacons that have
developed worldwide
radiance.”

*Bundespräsident Frank-
Walter Steinmeier
besuchte im Rahmen
der »Werkstatt des
Wandels« das Fraunhofer
IOF. / Federal President
Frank-Walter Steinmeier
visited Fraunhofer IOF as
part of the event series
‘Werkstatt des Wandels’.*



Bundes- präsident besucht das Fraunhofer IOF

**Frank-Walter Steinmeier
würdigt Zukunftsforschung
im Rahmen der Veranstalt-
ungsreihe »Werkstatt des
Wandels«**

Bundespräsident Frank-Walter Steinmeier besuchte im Rahmen der Veranstaltungsreihe »Werkstatt des Wandels« das Fraunhofer IOF in Jena. Er würdigte das Institut damit als einen Ort erfolgreicher Transformation, der dazu beitrage, neue Chancen für Gesellschaft, Wirtschaft und Industrie zu eröffnen. Begleitet wurde er durch den ehemaligen Thüringer Ministerpräsidenten Bodo Ramelow.

Für Institutsleiter Andreas Tünnermann war der Besuch eine große Ehre: »Der Besuch des Bundespräsidenten am Fraunhofer IOF unterstreicht die Bedeutung der angewandten Optik und Photonik für die Zukunft unserer Gesellschaft. Unsere Forschenden leisten durch ihre Arbeit einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung neuer Technologien und Innovationen, deren Ziel es ist, das Leben aller Menschen in Zukunft nachhaltiger, gesünder und sicherer zu machen.«

Bei seinem Besuch in Jena präsentierten Forschende des Fraunhofer IOF dem Bundespräsidenten neue technologische Ansätze, die aktuelle gesellschaftliche Herausforderungen adressieren und künftige Transformationen in modernen Lebens- und Arbeitswelten unterstützen sollen.

German President visits Fraunhofer IOF

**Frank-Walter Steinmeier
honors future research
as part of event series
'Werkstatt des Wandels'**

German Federal President Frank-Walter Steinmeier visited Fraunhofer IOF in Jena as part of the event series 'Werkstatt des Wandels' (Workshop of Change). He recognized the institute as a place of successful transformation that contributes to new opportunities for society, the economy, and industry. He was accompanied by the former Prime Minister of Thuringia, Bodo Ramelow.

For institute director Andreas Tünnermann, the visit was a great honor, "The Federal President's visit to Fraunhofer IOF emphasizes the importance of applied optics and photonics for the future of our society. Through their work, our researchers make an important contribution to the development of new technologies and innovations with the goal of making the lives of all people more sustainable, healthier, and safer in the future."

During his visit to Jena, Fraunhofer IOF researchers presented new technological approaches that address current societal challenges and will support future transformations in modern living and working environments to the Federal President.

A joint tour of the institute first highlighted the topic of human-machine interaction. In this context, the researchers presented a portable 3D sensor that enables a mobile — and thus particularly efficient — measurement of complex objects.





Im Austausch mit Forschenden des Fraunhofer IOF erfährt der Bundespräsident mehr über die Forschungsschwerpunkte des Institutes / In an exchange with researchers from Fraunhofer IOF, the Federal President learned more about the institute's research priorities

Ein gemeinsamer Rundgang durch das Institut warf dabei zunächst ein Schlaglicht auf das Thema Mensch-Maschine-Interaktion. Die Forschenden präsentierten in diesem Zusammenhang einen tragbaren 3D-Sensor, der eine mobile – und damit besonders effiziente – Vermessung komplexer Objekte ermöglicht.

Um die Sicherheit unserer Daten in der digitalen Welt ging es anschließend auch beim Thema Quantenkommunikation. Das Fraunhofer IOF arbeitet hierbei – zum Beispiel im Rahmen der QuNET-Initiative – eng mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie zusammen, um neue Sicherheitsstandards durch quantenphysikalische Ansätze zu etablieren. Um die Forschung in diesem Feld weiter voranzutreiben, wird das neue Forschungsgebäude des Fraunhofer IOF perspektivisch über eine eigene optische Bodenstation verfügen.

Des Weiteren besuchte der Bundespräsident ein Labor zur Ultrapräzisionsbearbeitung. Dieses Fertigungsverfahren kommt unter anderem bei der Herstellung hochpräziser Optiken für die Anwendung im Weltall zum Einsatz.

The security of our data in the digital world was the topic in quantum communications. Here, Fraunhofer IOF works closely with partners from science and industry — for example, as part of the QuNET initiative — to establish new security standards using quantum physics approaches. In order to further advance research in this field, the new Fraunhofer IOF research building will have its own optical ground station.

Furthermore, the Federal President visited a laboratory for ultra-precision machining. This is a production process used, among other applications, in the manufacturing of high-precision optics for use in space.

The visit to Fraunhofer IOF concluded with a discussion with international junior researchers. This discussion emphasized the need for an open-minded culture as the basis for an excellent and internationally competitive research environment. "Jena is one of those beacons that have developed worldwide radiance. This is made possible by the fact that Jena has become and remained an

Den Abschluss des Besuches am Fraunhofer IOF markierte ein Dialog mit internationalen Nachwuchsforschenden. Das Gespräch unterstrich die Notwendigkeit einer weltoffenen Kultur als Grundlage einer exzellenten und international wettbewerbsfähigen Forschungslandschaft. »Jena ist einer jener Leuchttürme, die weltweite Strahlkraft entwickelt haben. Das geht auch deshalb, weil Jena ein weltoffener Standort geworden und geblieben ist.«, würdigte der Bundespräsident.

Bei der Themenreihe »Werkstatt des Wandels« handelt sich um eine Veranstaltungsreihe des Bundespräsidenten in Kooperation mit der BMW Foundation sowie der Carl-Zeiss-Stiftung. Sie wird in Zusammenarbeit mit dem Center for Responsible Research and Innovation des Fraunhofer IAO umgesetzt.

open-minded location,” praised the Federal President.

The event series ‘Werkstatt des Wandels’ (Workshop of Change) is the Federal President’s event series in cooperation with the BMW Foundation as well as the Carl-Zeiss-Stiftung. It is being implemented in collaboration with the Center for Responsible Research and Innovation at Fraunhofer IAO.

*Frank-Walter Steinmeier
im Gespräch mit
Nachwuchsforschenden /
Frank-Walter Steinmeier in
conversation with young
researchers*



*An der Themenstation
Quantenkommunikation
erfährt der
Bundespräsident von den
Forschenden mehr über
die praktisch abhörsichere
Kommunikation mit
Licht. / At the station on
quantum communication,
the Federal President
learns from the researchers
about practically tap-proof
communication using light*



© Thüringer Staatskanzlei / Jacob Schröter

Andreas Tünnermann mit Bundesverdienstkreuz ausgezeichnet

Leiter des Fraunhofer IOF erhält Würdigung für wissenschaftliches und gesellschaftliches Engagement

Für sein wissenschaftliches und gesellschaftliches Engagement ist Andreas Tünnermann, Leiter des Fraunhofer IOF sowie des Instituts für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena, mit dem Verdienstkreuz am Bande des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland ausgezeichnet worden.

Andreas Tünnermann honored with Order of Merit of the Federal Republic of Germany

Director of Fraunhofer IOF honored for scientific and social commitment

Andreas Tünnermann, Director of the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF and the Institute for Applied Physics at Friedrich-Schiller-Universität Jena, has been awarded the Order of Merit of the Federal Republic of Germany for his scientific and social commitment.



Am 7. Mai erfolgt die offizielle Verleihung des Bundesverdienstkreuzes an Prof. Andreas Tünnermann (links) durch Thüringens Ministerpräsidenten Bodo Ramelow. / On May 7, Prof. Andreas Tünnermann (left) is officially awarded the Order of Merit by Thuringia's Minister President Bodo Ramelow.



Der Verdienstorden, umgangssprachlich auch als Bundesverdienstkreuz bezeichnet, ist die höchste Anerkennung, die die Bundesrepublik für Verdienste um das Gemeinwohl ausspricht. Er wird für politische, wirtschaftlich-soziale und geistige Leistungen verliehen. Im Namen von Bundespräsident Frank-Walter Steinmeier erfolgte am 7. Mai 2024 die offizielle Verleihung des Insigne durch Thüringens Ministerpräsidenten Bodo Ramelow in der Weimarahalle in Weimar.

The Order of Merit of the Federal Republic of Germany is the highest honor awarded by the country for services to the common good. It is awarded for political, economic-social, and intellectual achievements. On behalf of Federal President Frank-Walter Steinmeier, the insignia was officially presented by Thuringia's Minister President Bodo Ramelow at the Weimarahalle in Weimar on May 7, 2024.

»Prof. Dr. Tünnermann ist nicht nur ein herausragender Forscher, sondern auch ein Vorbild für zukünftige Generationen von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern«, erklärte der Ministerpräsident. »Er hat maßgeblich dazu beigetragen, Deutschland zu einem führenden Standort für Forschung und Innovation im Bereich der Photonik und Quantentechnologien zu machen. Und er hat die Rahmenbedingungen für die Sicherung und

“Prof. Dr. Tünnermann is not only an outstanding researcher, but also a role model for future generations of scientists,” explained the Minister President. “He has made a significant contribution to making Germany a leading location for research and innovation in the field of photonics and quantum technologies. And he has improved the framework conditions for securing and further

Das Bundesverdienstkreuz ist die höchste Anerkennung, die die Bundesrepublik für Verdienste um das Gemeinwohl ausspricht / The Order of Merit of the Federal Republic of Germany is the highest recognition awarded by the Federal Republic of Germany for services to the common good



den weiteren Aufstieg eines der bedeutenden Zentren der optischen Industrie in der Bundesrepublik verbessert.«

Für Andreas Tünnermann ist die Auszeichnung eine besondere Anerkennung: »Es ist eine große Ehre und ein außergewöhnliches Zeichen der Wertschätzung für mich, mit einer so hohen Auszeichnung gewürdigt zu werden. Mit dieser besonderen Ehrung sehe ich auch zahlreiche Personen gewürdigt, die mich bei der Entwicklung und Umsetzung von Ideen in Forschung und Lehre inspiriert und unterstützt haben. Ihnen gilt mein aufrichtiger Dank.«

Die Verleihung erfolgte in Gesamtwürdigung seiner Leistungen in Forschung und Wissenschaft, unter anderem unterlegt durch Erfolge bei der Drittmittelwerbung, der akademischen Publikation und den betreuten Qualifikationsarbeiten. Berücksichtigt wurden weiterhin Erfolge Prof. Tünnermanns bei der Entwicklung internationaler Studiengänge sowie seinem Engagement bei der politischen Beratung und der wissenschaftlichen Netzwerkentwicklung am Forschungsstandort Deutschland.

developing one of the most important centers of the optical industry in Germany.”

For Andreas Tünnermann, the award is a very special recognition. “It is a great honor and an extraordinary sign of appreciation for me to be recognized with such a high award. With this special honor, I also see numerous people recognized who have inspired and supported me in the development and implementation of ideas in research and teaching. My sincere thanks go to them.”

The order was presented in recognition of his overall achievements in research and science, including his success in acquiring third-party funding, academic publications, and supervised theses. Prof. Tünnermann’s success in developing international degree programs and his commitment to political consulting and scientific network development in Germany as a research location were also acknowledged.

Das Bundesverdienstkreuz würdigt Prof. Tünnermanns wissenschaftliches und gesellschaftliches Engagement / The Order of Merit honors Prof. Tünnermann’s scientific and social commitment





© EAH Jena

Jenaer Forschungs- projekt Speed erhält Bundes- förderung in Millionenhöhe

Projekt zur spektralen Detektion unter den Top 20 der DATIpilot- Förderlinie des BMBF

Mit ihrem Projekt Speed – »Spektrale Detektion für gesellschaftsrelevante Anwendungen« haben sich das Fraunhofer IOF, die Ernst-Abbe-Hochschule Jena und das SpectroNet Innovationscluster in einem dreistufigen Auswahl- und Bewertungsverfahren mit einem

Jena research project Speed receives millions in federal funding

Project on spectral detection among the top 20 of the BMBF's DATIpilot funding line

With their project Speed — 'Spectral Detection for Societally Relevant Applications', Fraunhofer IOF, the Ernst Abbe University of Applied Sciences Jena, and the SpectroNet Innovation Cluster have successfully navigated a rigorous selection process for an 'innovation community'. The funding commitment is initially for a period of four years and

*Die Partner im Projekt
Speed zusammen mit
Dr. Anna Christmann /
The partners in the Speed
project together with
Dr. Anna Christmann*



*Die Bundestags-
abgeordnete Dr. Anna
Christmann zu Gast in
Jena / Member of the
German Parliament
Dr. Anna Christmann
visits Jena*

Antrag auf eine »Innovationscommunity« gegen zahlreiche Mitbewerber durchgesetzt. Die Förderzusage gilt für einen Zeitraum von zunächst vier Jahren und beträgt bis zu fünf Millionen Euro. Zu diesem Anlass besuchte die Bundestagsabgeordnete Dr. Anna Christmann (Bündnis 90/Die Grünen) Jena, um mehr über das bevorstehende Projekt zu erfahren.

Das Förderinstrument der »Innovationscommunities« war vom BMBF eingeführt worden, um den Transferprozess von wissenschaftlichem Know-how aus dem akademischen Bereich in gesellschaftlich relevante Anwendungen zu beschleunigen. Genau diese Vision verfolgt die Jenaer Forschungsgemeinschaft nun mit dem Projekt Speed im Feld der Spektroskopie.

Die Spektroskopie hat sich zu einem unverzichtbaren Werkzeug für die Analyse der chemischen Zusammensetzung verschiedenster Stoffe entwickelt und ist heute aus der modernen Forschung, aus Laboren sowie der industriellen Qualitätssicherung oder der Weltraumforschung nicht mehr wegzudenken. Neben der Erfassung von Daten zur Pflanzengesundheit in der Forst- und Landwirtschaft, kommt die Technologie auch bei der medizinischen Diagnostik oder der

amounts to up to five million euros. Dr. Anna Christmann (Bündnis 90/Die Grünen), a member of the Bundestag, visited Jena to learn more about the upcoming project.

This funding instrument was introduced by the BMBF to accelerate the transfer of scientific know-how into socially relevant applications. It is precisely this vision that the Jena research community is now pursuing with the Speed project in the field of spectroscopy.

Spectroscopy is a crucial tool for analyzing the chemical composition of a wide variety of substances and is integral to modern research, laboratories, industrial quality assurance, and aerospace research. In addition to collecting data on plant health in forestry and agriculture, the technology is also used in medical diagnostics or therapy monitoring. Despite this potential, the possibilities of spectral sensing have yet to be realized in many areas.

The aim of Speed is to establish a cross-industry platform for technology testing and the exchange of experience. To this end, 'OpenLabs', for example, are to be offered in the coming years. Direct users, such as Thuringian farmers, will be able to discover new technologies and their potential for their

Therapieüberwachung zum Einsatz. Trotz dieses Anwendungspotenzials werden die Möglichkeiten der Spektroskopie in vielen Bereichen noch nicht umfassend genutzt.

Ziel von Speed ist es, eine branchenübergreifende Plattform für die Technologieerprobung und den Erfahrungsaustausch einzurichten. Dazu sollen in den kommenden Jahren zum Beispiel »OpenLabs« angeboten werden. Hier sollen direkte Anwender, etwa Thüringer Landwirte, neue Technologien und deren Potentiale für die alltägliche Arbeit entdecken können. Darüber hinaus sind Workshops mit Pitches geplant.

Die beiden Abteilungen für Optisches und mechanisches Systemdesign und für Bildgebung und Sensorik am Fraunhofer IOF begleiten die »Innovationscommunity« dabei mit ihrer Expertise in miniaturisierten spektralen und spektral-abbildenden Sensorsystemen. Diese haben die idealen Voraussetzungen, um mit nur geringem Entwicklungsaufwand an konkrete Anwendungsszenarien angepasst und optimiert zu werden. So können zukünftig auf den Anwender maßgeschneiderte und kostengünstige Sensorlösungen entwickelt werden.

Damit will Speed die Übergangsschwelle der Hochtechnologie hin zur Breitenanwendung in der Praxis senken und das gegebene Potenzial, welches die Spektroskopie für eine ressourceneffiziente Wirtschaft der Zukunft bietet, voll ausschöpfen. Ein erstes geplantes Community-Projekt soll den Transfer eines Sensorsystems zur Unterstützung bei der Diagnostik von Hauterkrankungen ermöglichen.

daily work. Furthermore, workshops with pitches are planned.

The departments for Optical and Mechanical System Design and for Imaging and Sensor Technology at Fraunhofer IOF are contributing their expertise in miniaturized spectral and spectral imaging sensor systems. These systems have the ideal prerequisites for adaptation and optimization to specific application scenarios with only a small amount of development effort, paving the way for customized and cost-effective sensor solutions in the future.

This way, Speed aims to lower the transition threshold of high technology to widespread application in practice and to fully exploit the potential that spectral sensor technology offers for a resource-efficient economy of the future. The first planned community project should enable the transfer of a sensor system to support the diagnosis of skin diseases.

Dr. Henrik von Lukowicz erläutert Anwendungspotentiale der Spektroskopie am Beispiel eines Mikrospektrometer-Array / Dr. Henrik von Lukowicz explains the potential applications of spectral sensor technology using the example of a microspectrometer array





Die Preistragenden des Awards mit den beiden Laudatoren Prof. Andreas Tünnermann (rechts) und Dr. Marc Krug von der Jenoptik AG (links) / The winners of the Award with the laudatory speakers Prof. Andreas Tünnermann (right) and Dr. Marc Krug of Jenoptik AG (left)

Applied Photonics Award 2024

Das sind die Preistragenden des Nachwuchsförderpreises

Von der verbesserten Diagnostik für Gewebeproben über neue Fertigungsverfahren für die Elektronikindustrie, bis hin zur hochpräzisen Synchronisation von Uhren mithilfe winziger Quanten – beim Applied Photonics Award 2024 wurden junge Nachwuchsforschende erneut für ihre zukunftsweisenden Abschlussarbeiten auf dem Gebiet der angewandten Photonik ausgezeichnet. Der Preis wurde am 26. September 2024 verliehen.

Mit Lichtgeschwindigkeit in Richtung Zukunft – unter diesem Motto prämiert der

Applied Photonics Award 2024

These are the winners of the Young Talent Award

From improved diagnostics for tissue samples and new manufacturing processes for the electronics industry to the high-precision synchronization of clocks using tiny quanta — the Applied Photonics Award 2024 once again honored young researchers for their pioneering theses in the field of applied photonics. The prize was awarded on September 26, 2024.

Under the motto “Heading towards the future at the speed of light”, the Applied Photonics Award honors young researchers

Applied Photonics Award in diesem Jahr junge Forschende und ihre herausragenden Abschlussarbeiten, die innovative Lösungen in der angewandten Photonik erforschen und damit entscheidende Impulse für unsere technologische Zukunft setzen. Der Nachwuchsförderpreis, organisiert durch das Fraunhofer IOF, wurde 2024 im Rahmen der Photonics Days Jena verliehen. Prof. Dr. Andreas Tünnermann überreichte die Preise gemeinsam mit Dr. Marc Krug von der Jenoptik AG an die Preistragenden.

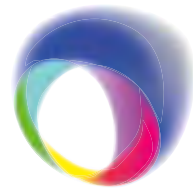
Eine Fachjury, bestehend aus Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft und Industrie, hatte zuvor die prämierten Arbeiten ausgewählt. 2024 wurden drei Abschlussarbeiten in den Kategorien Bachelor, Master und Dissertation ausgezeichnet. Darüber hinaus vergab die Jury in diesem Jahr erstmalig drei Sonderpreise in den Kategorien wissenschaftliche Exzellenz, Nachhaltigkeit und Biophotonik, die die Bandbreite und Exzellenz der eingereichten Arbeiten wiederholt unterstreichen.

and their outstanding theses, recognizing innovative solutions in applied photonics and providing important contributions for our technological future. The young talent award, organized by Fraunhofer IOF, was presented as part of the Photonics Days Jena. Prof. Dr. Andreas Tünnermann presented the awards with Dr. Marc Krug of Jenoptik AG.

A jury of experts consisting of representatives from science and industry had previously selected the award-winning theses. In 2024, three theses were awarded in the categories of Bachelor's, Master's, and Doctoral dissertations. Additionally, the jury introduced three special awards this year for scientific excellence, sustainability, and biophotonics, further highlighting the breadth and excellence of the submitted projects.



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



Die Gewinnerinnen und Gewinner des »Applied Photonics Award« 2024 sind:

Beste Bachelorarbeit (1.000 €)

Leon Fuchs (Hochschule Aalen): »Konzeption einer Multispektralen Lichtquelle als Halogenlampenersatz«

Beste Masterarbeit (2.000 €)

Paula Heik (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg): »Development and characterisation of AlN VAT photopolymerisation«

Beste Dissertation (3.000 €)

Dr. Christopher Spiess (Friedrich-Schiller-Universität Jena): »Clock Synchronization with Single Photons«

Preis der Jury für wissenschaftliche Exzellenz (1.000 €)

Nils Bernhardt (Technische Universität Berlin): »Optical Bound States in the Continuum: Boosting the Effective Nonlinear Susceptibility of WS₂«

Preis der Jury für Anwendungen in der Nachhaltigkeit (1.000 €)

Karina Trindade Ribeiro (Karlsruher Institut für Technologie): »Hybrid PV-thermal and Radiative Cooling Technology for Tri-generation of electricity, heating and cooling«

Preis der Jury für Anwendungen in der Biophotonik (1.000 €)

Dr. Jakob Lingg (Technische Universität München): »Shortwave-infrared Line-Scanning Confocal Microscope for Deep Tissue Imaging«

The winners of the 'Applied Photonics Award' 2024 are:

Best Bachelor's Thesis (1,000 €)

Leon Fuchs (Aalen University): "Concept of a Multi-Spectral Light Source as a Halogen Lamp Replacement"

Best Master's Thesis (2,000 €)

Paula Heik (Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuremberg): "Development and Characterization of AlN VAT Photopolymerization"

Best Dissertation (3,000 €)

Dr. Christopher Spiess (Friedrich Schiller University Jena): "Clock Synchronization with Single Photons"

Jury Prize for Scientific Excellence (1,000 €)

Nils Bernhardt (Technical University of Berlin): "Optical Bound States in the Continuum: Boosting the Effective Nonlinear Susceptibility of WS₂"

Jury Prize for Applications in Sustainability (1,000 €)

Karina Trindade Ribeiro (Karlsruhe Institute of Technology): "Hybrid PV-Thermal and Radiative Cooling Technology for Tri-Generation of Electricity, Heating, and Cooling"

Jury Prize for Applications in Biophotonics (1,000 €)

Dr. Jakob Lingg (Technical University of Munich): "Shortwave-Infrared Line-Scanning Confocal Microscope for Deep Tissue Imaging"



Photonics Days Jena 2024

Die Grenzen des Möglichen verschieben

Was ist Wissenschaft, wenn nicht der Drang, die Welt zu verstehen und Grenzen zu durchbrechen? Unter dem Motto »New Limits« zeigten die diesjährigen Photonics Days Jena vom 26. bis 27. September, wie Photonik- und Optikforschung immer wieder dazu beiträgt, die Grenzen des Möglichen zu verschieben.

»Am Anfang war mein Forschungsfeld sehr klein«, erinnert sich Prof. Dr. Anne L'Huillier.

Photonics Days Jena 2024

Shifting the bounds of possibility

What is science if not the desire to understand the world and break through boundaries? With the theme "New Limits", this year's Photonics Days Jena from September 26 to 27 showed how photonics and optics research is constantly helping to shift the bounds of possibility.

"In the beginning, my research area was very small," recalls Prof. Anne L'Huillier. ▶

Ein Workshop von Dr. Reinhold Pabst unterstützte die Teilnehmenden in ihrer individuellen Karriereplanung / A workshop by Dr. Reinhold Pabst supported the participants in their individual career planning



*Prof. Dr. Anne L'Huillier bei
Ihrer virtuellen Keynote / Prof.
Dr. Anne L'Huillier during her
virtual keynote speech*

»Ich hätte nicht vorhersehen können, was sich daraus entwickeln würde.« Was sich daraus entwickelt hat, war eine bahnbrechende Pionierarbeit, die wesentlich zur Entwicklung der Attosekundenphysik beitrug und der Physikerin damit 2023 den Nobelpreis für Physik einbrachte. Mit Grenzen – und damit, wie man sie verschiebt – kennt Anne L'Huillier sich also aus.

Das machte sie zu der idealen Keynote-Speakerin für die Photonics Days Jena. Rund 180 Teilnehmende aus 26 Nationen nahmen, in Präsenz oder virtuell, an dem Netzwerk- und Karriereevent teil. In Vorträgen präsentierten Forschende des Fraunhofer IOF neueste Technologien. Dr. Jan Kinast stellte das MICADO-Instrument vor, eines der ersten »Augen« des Extremely Large Telescope (ELT). Michael Reibe erläuterte das »Photonic Packaging«. Dr. Sebastian Schmitt zeigte, wie fortschrittliche 2D-Materialien die Potenziale photonischer integrierter Schaltungen steigern können. Abdel Karim Ruvalcaba Perez der ams-OSRAM-Gruppe thematisierte, mit wie mittels Multispektralanalyse Lebensmittelverschwendung reduziert werden könnte.

”I couldn’t have predicted what would develop from this.” What ensued was groundbreaking pioneering work that contributed significantly to the development of attosecond physics and earned the physicist the Nobel Prize in Physics in 2023. So Anne L'Huillier knows a thing or two about boundaries — and how to push them.

This made her the ideal keynote speaker for the event. Around 180 participants from 26 countries took part in person or virtually in the networking and career event. In lectures, researchers from Fraunhofer IOF presented the latest technologies. Dr. Jan Kinast presented the MICADO instrument, one of the first 'eyes' of the Extremely Large Telescope (ELT). Michael Reibe explained 'Photonic Packaging'. Dr. Sebastian Schmitt showed how advanced 2D materials can increase the potential of photonic integrated circuits. Abdel Karim Ruvalcaba Perez of the ams-OSRAM group discussed how multispectral analysis could be used to reduce food waste.

The speakers at this year's Photonics Days Jena once again showed that young researchers have no shortage of innovative ideas. But



Die Referenten der Photonics Days Jena zeigten damit auch in diesem Jahr wieder: An innovativen Ideen mangelt es den jungen Forschenden keinesfalls. Doch Forschungs-ideen brauchen auch Forschungsbudgets, um umgesetzt werden zu können. Das Leistungszentrum Photonik lud daher wieder zu den »Idea Pitches« ein, bei denen es insgesamt 45.000 € Fördergelder zu gewinnen gab.

Weitere Auszeichnungen wurden im Rahmen der Photonics Days Jena an herausragende Nachwuchsforschende verliehen – darunter der Applied Photonics Award (siehe Seite 62) sowie der Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung.

Der zweite Tag der Veranstaltung lenkte den Fokus indes auf die aktive Vernetzung zwischen Forschung und Wirtschaft. Bei einem »Industry Breakfast« bot sich den Teilnehmenden die Möglichkeit, mit Unternehmen aus der Optik- und Photonikindustrie ins Gespräch zu kommen. Eine zweite Keynote von Dr. Hagen Zimer von TRUMPF, richtete den Blick auf innovative Lasertechnologien. Ein Workshop zur Karriereplanung sowie eine Labortour rundeten das Angebot der Photonics Days Jena 2024 ab.

research ideas also need research budgets in order to be implemented. The Center of Excellence in Photonics therefore again hosted the 'Idea Pitches' with a total of 45,000 euros in funding to be won.

More awards were presented to outstanding young researchers during the Photonics Days Jena — including the Applied Photonics Awards (see page 62) and the Dr.-Ing. Siegfried Werth Foundation Prize.

The second day of the event focused on active networking between science and industry. At an 'Industry Breakfast', participants had the opportunity to talk to companies from the optics and photonics industry. A second keynote by Dr. Hagen Zimer from TRUMPF focused on innovative laser technologies. A workshop on career planning and a laboratory tour rounded off the Photonics Days Jena program.

Die Vernetzung von jungem Nachwuchs mit renommierten Unternehmen – das ist ein wesentliches Ziel der Photonics Days Jena. / Networking young talent with renowned companies — that is a key objective of Photonics Days Jena.



Neuer Innovationsimpuls für Thüringen

Jena wird de:hub für »Photonics & Digital Experience Platforms«

Im Rahmen des Startup Germany Summit 2024 in Berlin wurde der Innovations- und Digitalstandort Jena zum neuen de:hub der Digital Hub Initiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ernannt. Mit dieser Initiative fördert das BMWK ein Netzwerk zwischen jungen Start-ups und etablierten Wirtschaftsunternehmen. Durch den gestärkten Austausch von technologischer und wirtschaftlicher Expertise sollen neue, disruptive Innovationen ermöglicht werden. Die Ernennung des neuen Jenaer Hubs ist Teil der Erweiterung der deutschlandweiten Initiative von bisher zwölf auf nun 25 de:Hubs. Die Integration des Jenaer Hubs in dieses Netzwerk eröffnet der Region völlig neue Möglichkeiten, um den Innovationsstandort Thüringen nachhaltig zu stärken.

Mit der Unterstützung des Freistaats Thüringen sowie der Stadt Jena und vielen weiteren Partnern des Thüringer Gründungsökosystems, soll der neue de:hub künftig eine zentrale Rolle in der digitalen Transformation und wirtschaftlichen Entwicklung der Region einnehmen.

Andreas Tünnermann erklärt dazu: »Wir freuen uns, dass wir zusammen mit Jena Digital und OptoNet den neuen de:hub nach Jena holen

New innovation impulse for Thuringia

Jena becomes de:hub for "Photonics & Digital Experience Platforms"

At the Startup Germany Summit 2024 in Berlin, Jena was named the new de:hub of the Digital Hub Initiative of the German Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action (BMWK). Through this initiative, BMWK fosters a network between young start-ups and established commercial enterprises. By strengthening the exchange of technological and economic expertise, the aim is to enable new, disruptive innovations. The appointment of the new Jena hub is part of the expansion of the Germany-wide initiative from 12 to 25 de:hubs. The integration of the Jena hub into this network creates new opportunities for the region to sustainably strengthen Thuringia as a location for innovation.

With the support of the Free State of Thuringia, the city of Jena, and many other partners in the Thuringian start-up ecosystem, the new de:hub is set to play a central role in the future digital transformation and economic development of the region.

Andreas Tünnermann commented, "We are delighted that we were able to bring the new de:hub to Jena together with Jena Digital and OptoNet. The hub is a strong sign of the

*Neuer de:hub in
Thüringen für
»Photonics & Digital
Experience Platforms«
/ New de:hub for
"Photonics & Digital
Experience Platforms"*

konnten. Der Hub ist ein starkes Zeichen für die Expertise in der Region und zugleich eine Anerkennung für die Arbeit, die wir hier gemeinsam mit unseren Partnern in den vergangenen Jahren geleistet haben: Wir haben hier ein einzigartiges Ökosystem entwickelt, das die Basis für wegweisende technologische Entwicklungen im Bereich Photonik und E-Commerce bildet und damit dem neuen de:hub einen fruchtbaren Nährboden bieten wird.«

Seit 2017 setzt das BMWK die Digital Hub Initiative um. Die Hubs sind regional über die Bundesrepublik verteilt und widmen sich jeweils verschiedenen Schwerpunktthemen in besonders zukunftsrelevanten Branchen.

Einer der weißen Flecken auf der Landkarte der de:hubs war bisher der Freistaat Thüringen. Der neue de:hub wird dies mit Schwerpunkt auf Photonik und E-Commerce ändern. An der Schnittstelle von Photonik und Digitalwirtschaft entwickeln junge Startups ebenso wie etablierte Größen in Wirtschaft und Forschung zukünftig innovative High-Tech-Lösungen für industrielle Anwendungen.

expertise in the region and at the same time a recognition of the work we have done here together with our partners in recent years. We have developed a unique ecosystem here that forms the basis for pioneering technological developments in the fields of photonics and e-commerce and will therefore provide fertile ground for the new de:hub."

BMWK has been implementing the Digital Hub Initiative since 2017. The hubs are distributed regionally across the country and are each dedicated to different key topics in sectors that are particularly relevant for the future.

Until now, the Free State of Thuringia has been one of the blank spots on the map of de:hubs. The new de:hub will change this with a focus on photonics and e-commerce. At the interface between photonics and the digital economy, young start-ups as well as established players in business and research are developing innovative high-tech solutions for industrial applications in the future.

*Vertreter und
Vertreterinnen des Jenaer
de:hub beim Startup
Germany Summit 2024
/ Representatives of the
Jena de:hub at the Startup
Germany Summit 2024*





© Marc Ermer

*Die US-Diplomaten
mit Vertretern und
Vertreterinnen der Stadt
Jena und des Fraunhofer
IOF / The US diplomats
with representatives
of the city of Jena and
Fraunhofer IOF*

Politische Besuche am Fraunhofer IOF

Diplomaten erkunden Zukunftstechnologien

Mit seiner Forschungsarbeit trägt das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF nicht nur zur Entwicklung innovativer Technologien bei, sondern dient auch als Anlaufpunkt für den internationalen Austausch. Wie eng Wissenschaft und Politik zusammenarbeiten, um diesen wissenschaftlichen Austausch zu stärken, technologische Fortschritte und wirtschaftliche Impulse zu fördern, zeigte sich im vergangenen Jahr durch eine Reihe hochrangiger Besuche am

Political visits to Fraunhofer IOF

Diplomats explore future technologies

Through its research, the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF not only contributes to the development of innovative technologies, but also serves as a point of contact for international dialogue. The close collaboration between science and politics to strengthen this scientific exchange, promote technological advances, and economic impulses was demonstrated last year by a series of high-profile visits to Fraunhofer IOF. One highlight was the visit of Federal President Frank-Walter Steinmeier (see page 53).



Fraunhofer IOF. Ein Highlight war hier der Besuch des Bundespräsidenten Frank-Walter Steinmeier (siehe Seite 53).

Daneben durfte das Institut im Oktober 2024 Alan Meltzer, den Geschäftsträger ad interim der US-Botschaft in Deutschland, sowie US-Generalkonsul John R. Crosby willkommen heißen. In Vorträgen und Gesprächen

In addition, the institute welcomed Alan Meltzer, Chargé d'Affaires a.i. of the U.S. Embassy in Germany, and U.S. Consul General John R. Crosby in October 2024. They learned about current photonics research in lectures and discussions and explored opportunities for increased transatlantic cooperation. Meltzer and Crosby were impressed by the scientific progress and



Thomas Nitzsche, John R. Crosby und Alan Meltzer (v. r. n. l.) informieren sich über die Forschungsschwerpunkte des Fraunhofer IOF / Thomas Nitzsche, John R. Crosby und Alan Meltzer (from right to left) find out about the main research areas of Fraunhofer IOF

© Marc Ermer

Die Delegation aus Litauen zusammen mit Vertretern des Fraunhofer IOF. Gemeinsam loteten sie Möglichkeiten zu zukünftigen Kooperationen aus. / The Lithuanian delegation together with representatives of Fraunhofer IOF. Together they explored possibilities for future cooperation.

informierten sie sich über die aktuelle Photonikforschung und loteten Möglichkeiten für eine verstärkte transatlantische Zusammenarbeit aus. Meltzer und Crosby zeigten sich beeindruckt von den wissenschaftlichen Fortschritten und betonten die Bedeutung solcher Innovationen für Gesellschaft und Wirtschaft. Zudem würdigten sie das interdisziplinäre Forschungsnetzwerk, das in Jena auch durch die zentrale Mitwirkung des Fraunhofer IOF entstanden ist.

emphasized the importance of such innovations for society and the economy. They also praised the interdisciplinary research network that has been established in Jena, in no small part thanks to the central role played by Fraunhofer IOF.

The institute also received the Ambassador of the Republic of Lithuania, Giedrius Puodžiūnas, who was accompanied by a delegation. Discussions focused on joint research





Weiterhin empfing das Institut den Botschafter der Republik Litauen, Giedrius Puodžiūnas, begleitet von einer Delegation. Im Mittelpunkt standen Diskussionen über gemeinsame Forschungsprojekte in Schlüsseltechnologien wie Mobilität, Fertigung und Weltraumanwendungen. Auch die Unterstützung von Start-ups und Ausgründungen im Bereich der Photonik wurde besprochen. Die Delegation zeigte großes Interesse an Initiativen wie dem Digital Innovation Hub Photonics (siehe Seite 103), der junge Unternehmen und Spin-offs in der Optik und Photonik am Beutenberg Campus fördert.

projects in key technologies such as mobility, manufacturing, and space applications. The support of start-ups and spin-offs in the field of photonics was also discussed. The delegation showed great interest in initiatives such as the Digital Innovation Hub Photonics (see page 103), which promotes young companies and spin-offs in optics and photonics at the Beutenberg Campus.

Die Delegation aus Litauen erlebt beim Rundgang durch das Institut Photonikforschung hautnah / During a tour of the institute, the delegation from Lithuania experiences photonics research up close



*Ein Blick in den Reinraum:
Die litauischen Gäste
informieren sich
zur Forschung an
Schlüsseltechnologien am
Fraunhofer IOF / A look
inside the clean room:
The Lithuanian guests
learn about research
into key technologies at
Fraunhofer IOF*



*Klarer Publikumsfavorite:
der Roboterhund SPOT.
Er kann 3D-Sensoren wie
goSCOUT3D eigenständig
führen und somit
menschliche Mitarbeitende
von Routineaufgaben
entlasten. / The clear crowd
favorite: the SPOT robot
dog. It can independently
guide 3D sensors such
as goSCOUT3D and thus
relieve human employees
of routine tasks.*

Lange Nacht der Wissenschaften Jena 2024

Eisige Temperaturen und Schneeregen luden am 22. November eher dazu ein, den Freitagabend auf dem heimischen Sofa auszusitzen. Doch über 12.000 begeisterte Wissenschaftsfans trotzen dem launischen Herbstwetter und durchstreiften die diesjährige »Lange Nacht der Wissenschaften« in Jena. 1.300 davon statteten dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF auf dem Beutenberg Campus einen Besuch ab.

Wer sich am vergangenen Freitag der widrigen Witterung zum Trotz in die Nacht hinaus wagte, der wurde reich belohnt. Über ganz Jena öffneten Forschungs-,

Long Night of Science 2024

Icy temperatures and sleet on November 22 were more of an invitation to sit out on the sofa at home on Friday evening. However, over 12,000 enthusiastic science fans braved the moody autumn weather and roamed through this year's 'Long Night of Science' in Jena. 1,300 of them paid a visit to the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF on the Beutenberg Campus.

Those who ventured out into the night last Friday despite the adverse weather conditions were richly rewarded. All over Jena, research, science and technology institutions once again opened their doors until midnight to welcome curious science fans. Fraunhofer IOF also provided insights into the latest technologies and developments.

Wissenschafts- und Technologieeinrichtungen bis Mitternacht erneut Tür und Tor, um neugierige Wissenschaftsfans willkommen zu heißen. Auch das Fraunhofer IOF gab Einblicke in neuste Technologien und Entwicklungen.

In insgesamt vier Themenwelten konnten die Gäste Fraunhofer-Forschung »made in Jena« aus nächster Nähe entdecken. In der Ausstellung »Abenteuer Weltraum« gab es Exponate zu bestaunen, deren baugleiche Zwillinge zum Teil bereits ihre Reise ins Weltall angetreten haben. So etwa ein Spiegelteleskop für die Space-Mission JUICE, die 2023 ihren Weg zum Jupitermond Ganymed angetreten hat, um dessen Beschaffenheit zu erforschen. Doch auch auf so manches Projekt der Zukunft gewährten die Forschenden spannende Ausblicke: Für das Einsteinteleoskop, ein Gravitationswellen-Detektor der nächsten Generation, haben Forschende des Fraunhofer IOF hochsensible Schwingungssensoren gebaut. Wenn das Einsteinteleoskop in den 2030er Jahren seinen Betrieb aufnehmen wird, werden diese Sensoren dazu beitragen, Gravitationswellen – wie sie zum Beispiel bei der Kollision von schwarzen Löchern entstehen – zu messen und somit unser Wissen über das Universum signifikant zu erweitern.

Darüber hinaus waren die Besucherinnen und Besucher der Langen Nacht der Wissenschaften auch in diesem Jahr wieder dazu eingeladen, »Quantensprünge in die Zukunft« zu wagen. Im Quanten-Themenraum zeigten die Forschenden, wie sich mithilfe von Lichtteilchen in Zukunft praktisch abhörsicher kommunizieren lässt oder wie neuste Methoden zur Quantenbildgebung die Medizin von Morgen revolutionieren werden. Was genau es dabei mit der sagenumwobenen Superposition von Quantenteilchen auf sich hat, konnten die Gäste bei einem kniffligen Spiel austesten, das ein wenig an den Handyspiel-Klassiker Snake erinnerte: Hier ging es darum, mithilfe einer unvorhersehbaren Steuerung über gequetschtes Laserlicht präzise Positionen auf einem Computer abzufahren, um eine möglichst hohe Punktzahl zu erzielen.

In a total of four themed worlds, guests were able to discover Fraunhofer research 'made in Jena' up close. In the 'Space Adventure' exhibition, there were exhibits to marvel at, some of whose identical twins have already embarked on their journey into space. For example, a reflector telescope for the JUICE space mission, which set off for Jupiter's moon Ganymede in 2023 to explore its composition. However, the researchers also provided exciting insights into a number of future projects: Fraunhofer IOF researchers have built highly sensitive vibration sensors for the Einstein Telescope, a next-generation gravitational wave detector. When the Einstein Telescope goes into operation in the 2030s, these sensors will help to measure gravitational waves — such as those produced by the collision of black holes — and thus significantly expand our knowledge of the universe.

In addition, visitors to this year's Long Night of Science were once again invited to take "quantum leaps into the future". In the quantum themed room, researchers showed how light particles can be used to communicate in a practically tap-proof manner in the future and how the latest quantum imaging methods will revolutionize the medicine of tomorrow. Guests were able to find out exactly what the legendary superposition of quantum particles is all about in a

Ein Hit vor allem bei den kleinen Gästen: Farbige Perlen unter rotem Licht sortieren – auch für echte Optik-Profis keine einfache Aufgabe. / A hit with younger guests in particular: sorting colored beads under red light — no easy task, even for real optics professionals.



*Erinnerte ein bisschen an den Handyspiele-Klassiker »Snake«: Durch die kaum vorhersehbare Steuerung von gequetschtem Laserlicht sollten die Gäste einen Punkt auf einem Computerbildschirm gezielt auf eine vorgegebene Position hinsteuern.
/ A bit reminiscent of the classic mobile game 'Snake': The guests had to steer a dot on a computer screen to a predetermined position using the almost unpredictable control of squeezed laser light.*

In den Ausstellungen »Licht und Mobilität« sowie »Sehen und Fühlen in der Zukunft« entdeckten die Besucherinnen und Besucher weiterhin optische Technologie für Robotik, Sicherheitstechnik oder den Verkehr der Zukunft. Klarer Publikumsliebbling bei großen wie kleinen Gästen war hier der Roboterhund SPOT, der – meist gefolgt von einer kleinen Menschentraube – die ganze Nacht lang durch das Institut streifte. Forschende des Fraunhofer IOF nutzen eine Kombination aus Roboterhund und speziellen 3D-Sensoren, um neusten Anwendungen der 3D-Formerkennung künftig noch effizienter zu gestalten.

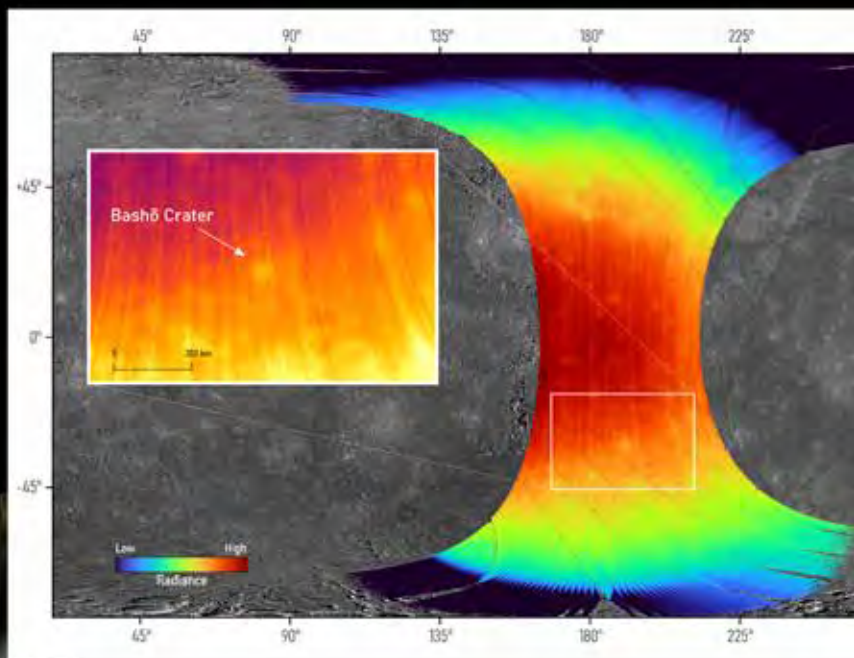
Und auch für die kleinsten Gäste gab es wie immer ein abwechslungsreiches Interaktionsangebot, das spielerisch an optische Phänomene – wie etwa die Beugung von Licht oder das Spiel mit Farben bei verschiedenen Wellenlängen – heranführte.

tricky game that was somewhat reminiscent of the classic mobile game Snake: The aim was to use an unpredictable control system and squeezed laser light to move to precise positions on a computer in order to achieve the highest possible score.

In the 'Light and Mobility' and 'Seeing and Feeling in the Future' exhibitions, visitors continued to discover optical technology for robotics, safety technology and the traffic of the future. The clear crowd favorite among visitors of all ages was the robot dog SPOT, which — usually followed by a small crowd of people — roamed the institute all night long. Researchers at Fraunhofer IOF are using a combination of robot dog and special 3D sensors to make the latest 3D shape detection applications even more efficient in future.

As always, there was also a varied range of interactive activities for the youngest guests, which playfully introduced them to optical phenomena such as the diffraction of light or playing with colors at different wavelengths.





Mission »BepiColombo«

MERTIS zeigt Merkur in neuem Licht

Am 1. Dezember 2024 absolvierte die ESA-Mission BepiColombo erfolgreich ihren 5. Vorbeiflug am Zielplaneten Merkur. Dabei konnten erstmals Aufnahmen im mittleren Infrarotbereich erfasst werden, die neue Einblicke in die Eigenschaften des Planeten geben.

Verantwortlich für diese einzigartigen Aufnahmen ist das an Bord befindliche Messinstrument MERTIS (Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer). Eine darin verbaute und am Fraunhofer IOF entwickelte hochpräzise Optik erlaubt es, die Oberfläche des Merkur im thermischen Infrarotbereich zu analysieren. Die neusten Aufnahmen zeigen nun neue Informationen zu Bereichen mit unterschiedlichen Temperaturen und Materialeigenschaften.

Im Jahr 2026 soll BepiColombo die Umlaufbahn des Merkur erreichen. Dann soll MERTIS eine globale Karte der mineralogischen Verteilung auf der Merkur-Oberfläche erstellen – mit einer Auflösung von bis zu 500 Metern.

Mission 'BepiColombo'

MERTIS shows Mercury in a new light

On December 1, 2024, ESA's BepiColombo mission successfully completed its 5th flyby of the target planet Mercury. For the first time, images were captured in the mid-infrared range, providing new insights into the properties of the planet.

The measuring instrument MERTIS (Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer) on board is responsible for these unique images. A high-precision optical system developed at Fraunhofer IOF allows the surface of Mercury to be analyzed in the thermal infrared range. The latest images now reveal new information on areas with different temperatures and material properties.

BepiColombo is due to reach Mercury's orbit in 2026. MERTIS will then create a global map of the mineralogical distribution on Mercury's surface — with a resolution of up to 500 meters.

*Oben: Messinstrument
MERTIS ganz nah /
Top: Measuring instrument
MERTIS up close*

*Eingebettete Grafik:
Das Bild zeigt, wie Merkur
im mittleren Infrarotlicht
strahlt. Die Farben
repräsentieren MERTIS-
Daten der Wärmestrahlung
bei 8,45 µm. Die graue
Hintergrundkarte basiert
auf Bildern im sichtbaren
Licht von der NASA-
Mission Messenger. /
Inset graphic: The image
shows how Mercury
radiates in mid-infrared
light. The colors represent
MERTIS data of thermal
radiation at 8.45 µm. The
gray background map
is based on visible light
images from NASA's
Messenger mission.*

*© MERTIS/DLR/University
of Münster & NASA/Johns
Hopkins University Applied
Physics Laboratory/
Carnegie Institution of
Washington*

Unser neuestes Forschungsgebäude Our newest research building

Visualisierung / Visualization

Visualisierung des neuen
Forschungsgebäudes für das
Fraunhofer IOF.
© Heinle, Wischer und Partner
Freie Architekten /
Visualization of the new Fraun-
hofer IOF research building on
the Beutenberg Campus in Jena.
© Heinle, Wischer und Partner
Freie Architekten



Spatenstich am 29. Mai 2019 / Groundbreaking ceremony on May 29, 2019

V.l.n.r. / from left:

Dr. Stefan Traeger (Jenoptik), Prof. Dr. Andreas
Tünnermann (Fraunhofer IOF), Wolfgang Tiefen-
see (Thüringer Minister für Wirtschaft, Wissen-
schaft und Digitale Gesellschaft), Bodo Ramelow
(Ministerpräsident Thüringens), Prof. Georg
Pohnert (Friedrich-Schiller-Universität Jena)



Grundsteinlegung am 15. Juli 2021 / Laying the foundation stone on July 15, 2021

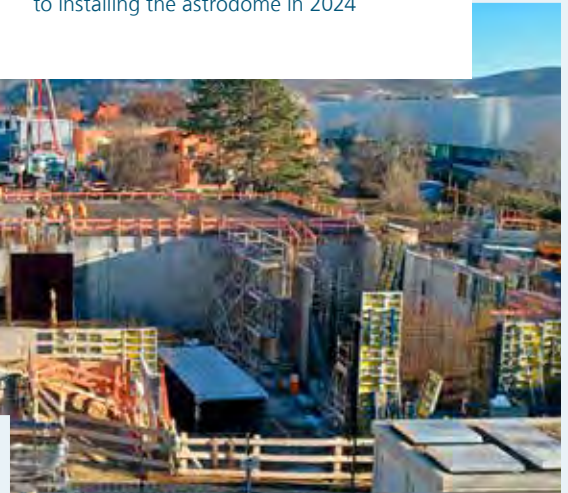
Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Tün-
nermann mit Ministerpräsident Bodo
Ramelow und weiteren Vertretern aus
Politik und Wissenschaft /
Institute director Prof. Dr. Andreas Tün-
nermann with Minister-President Bodo
Ramelow and other representatives
from politics and science





Bauarbeiten über die Jahre / Construction work over the years

Vom Aushub der Baugrube 2021 bis zur
Montage der Astrokuppel 2024 /
From digging the construction pit in 2021
to installing the astrodome in 2024





Das fertige Gebäude / The finished building

Ansicht der Südseite mit Fraunhofer IOF-Logo und montierter Astrokuppel /

View of the south side with the Fraunhofer IOF logo and the mounted astrodome



Innenansichten / Interior views

Fertiggestelltes Haupttreppenhaus, Büroflächen und Labore werden bezogen /

The completed main staircase, office space and laboratories are ready for occupancy



2. Obergeschoss / 2nd floor

Büro und Dachterrasse
mit Kunst am Bau /
Office and roof terrace
with art for buildings



Kunst am Bau / Art for buildings

V.l.n.r. / from left:
Prof. Dr. Andreas Tünnermann und
Technischer Leiter Wieland Stöckl mit
Künstler Sebastian Kuhn vor dem »Bull-
auge« des »Infinity Space Generators« /
Prof. Dr. Andreas Tünnermann and tech-
nical manager Wieland Stöckl with artist
Sebastian Kuhn in front of the 'porthole'
of the 'Infinity Space Generator'



Infinity Space Generator

Zwei künstlerische Objekte, welche mit
optischen Phänomenen, die durch eine
Doppelspiegelung des Lichts einen ver-
meintlichen dritten Raum der Illusionen
schaffen, wurden am neuen Gebäude
installiert. Hier die »kardanische Aufhän-
gung« des sogenannten »Infinity Space
Generators«.

Two artistic objects that use optical phe-
nomena to create a supposed third space
of illusions through the double reflection
of light were installed on the new building.
Shown here is the 'cardanic suspension' of
the so-called 'Infinity Space Generator'.



Auszeichnungen Awards



Jenaer Forscher- team erhält Thüringer Forschungspreis

Fraunhofer Wissenschaftler für innovative 2D-Materialforschung ausgezeichnet

Dünnere als ein Haar, fester als Stahl und effiziente Vermittler zwischen Licht und Strom – sogenannte 2D-Materialien sind eine Materialklasse mit einzigartigen Eigenschaften und großem Anwendungspotenzial.

Für ihre Forschung an diesen 2D-Materialien wurden Forschende der Universität Jena und des Fraunhofer IOF mit dem Thüringer Forschungspreis ausgezeichnet. Mit dem Preis ehrt der Freistaat jährlich wissenschaftliche Spitzenleistungen an Thüringer Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Die Preistragenden – Prof. Dr. Andrey Turchanin, Dr. Antony George, Dr. Christof Neumann und Dr. Falk Eilenberger (Fraunhofer IOF) – entwickelten innovative Methoden, um maßgeschneiderte 2D-Materialien für photonische, elektronische und optoelektronische Anwendungen herzustellen und nutzbar zu machen. Die 2D-Materialien bestehen aus nur einer oder wenigen atomaren Lagen und verändern ihre Eigenschaften im Vergleich zu den dreidimensionalen Ausgangsstoffen drastisch.

Am Fraunhofer IOF untersuchte Falk Eilenberger Übergangsmetall-Dichalcogeniden, kurz TMDs. In dreidimensionaler Form nur indirekte Halbleiter, werden sie als 2D-Material zu direkten Halbleitern, die Strom effizient in Licht umwandeln können. Ein spezielles Herstellungsverfahren ermöglicht es, die Materialien skalierbar als funktionelle Bestandteile auf optischen Komponenten aufwachsen zu lassen und TMD-Materialien zu integrieren.

Dadurch können optische Fasern und photonische Chips so funktionalisiert werden, dass sie Licht erzeugen, verändern oder detektieren. Die Integration der Nanomaterialien ermöglicht die Herstellung von extrem kleinen und leistungsfähigen Bauelementen. Die effiziente Umwandlung von Strom und Licht macht 2D-Materialien für Anwendungen in der Datenübertragung oder Kameratechnologie interessant. Zudem eröffnen sie neue Wege in der Halbleitertechnologie und eignen sich dank ihrer Quanteneigenschaften für die Quantensicherung von Kommunikationsnetzen.

Jena research team receives 'Thüringer For- schungspreis' (Thuringian Research Prize)

Fraunhofer scientists honored for innovative 2D materials research

Thinner than a hair, stronger than steel, and efficient mediators between light and electricity — so-called 2D materials are a rapidly developing class of materials with unique properties and great application potential.

Researchers from the University of Jena and Fraunhofer IOF have now been awarded the 'Thüringer Forschungspreis' (Thuringian Research Prize) for their research into 2D materials. With the prize, the Free State of Thuringia honors top scientific achievements from Thuringian universities and non-university research institutions annually. The prize winners, Prof. Andrey Turchanin, Dr. Antony George, Dr. Christof Neumann, and Dr. Falk Eilenberger (Fraunhofer IOF), developed innovative methods to produce and utilize tailor-made 2D materials for photonic, electronic, and optoelectronic applications. The 2D materials consist of just one or a few atomic layers and drastically change their properties compared to the three-dimensional starting materials.

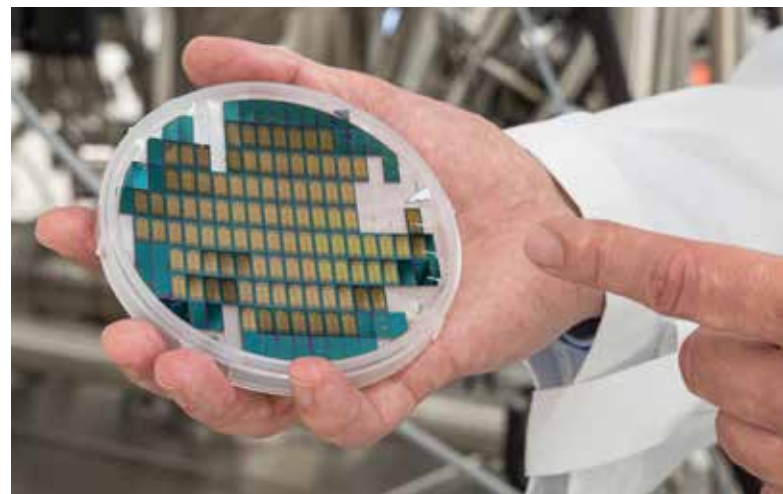
At Fraunhofer IOF, Falk Eilenberger studied and characterized transition metal dichalcogenides (TMDs). In three-dimensional form, these materials are only indirect semiconductors, but their substance transforms into a direct semiconductor as a 2D material that can efficiently convert electricity into light. A specialized manufacturing process enables the growth of these materials as functional elements on optical components in a scalable manner and to integrate TMD materials.

Thus, optical fibers and photonic chips can be functionalized to generate, modify, or detect light. The integration of nanomaterials enables the production of extremely small and powerful components. The conversion of electricity and light makes the 2D materials interesting for applications in data transmission and camera technology. They also open up new possibilities in semiconductor technology and, thanks to their quantum properties, are suitable for securing communication networks.



Alle Fotos auf dieser Seite:
© Nicole Nerger |
Universität Jena

Die Gewinner des Thüringer Forschungspreis:
Prof. Dr. Andrey Turchanin, Dr. Falk Eilenberger,
Dr. Antony George und Dr. Christof Neumann
(v.l.n.r.) / The winners of the 'Thüringer Forschungs-
preis' (Thuringian Research Prize): Prof. Andrey
Turchanin, Dr. Falk Eilenberger, Dr. Antony George
and Dr. Christof Neumann (from left to right)



Oben/above:
Der entwickelte Prozess ermöglicht eine
industriekompatible und skalierbare Herstellung von
maßgeschneiderten 2D-Materialien / The developed
process enables industry-compatible and scalable
production of customized 2D materials

Links/left:
Als atomare Schichten ändern 2D-Materialien ihre
Eigenschaften drastisch / As atomic layers, 2D materials
drastically change their properties

EPS-QEOD-Preis 2024 an Jens Limpert und Jan Rothhardt verliehen

Hochleistungsquelle im EUV-Bereich erschließt neue Potentiale in der Nano- und Materialwissenschaft

Prof. Dr. Jens Limpert und Dr. Jan Rothhardt haben Technologien zur Realisierung von EUV-Quellen mit Synchrotron-ähnlicher Leistung entwickelt. Mithilfe von hochleistungsfähigen Femtosekunden-Faserlasersystemen und kohärenter Kombination mehrerer Faserverstärker erzielten sie hochharmonische Quellen mit hoher Konversionseffizienz, deren Photonenfluss den Stand der Technik um mehrere Größenordnungen übertrifft.

Ihre Arbeit führte zur Entwicklung eines hochauflösenden, linsenlosen EUV-Mikroskops, das die Ptychographie-Methode nutzt. Mit einer Auflösung von 16 nm liefert es quantitative Amplituden- und Phaseninformationen und erschließt Potenziale in der Nano- und Materialwissenschaft, z. B. für Nanoelektronik, Datenspeicher oder biologische Bildgebung, einschließlich der Krebszellerkennung und Untersuchung biologischer Interaktionen von Pathogenen, Medikamenten oder Nanopartikeln mit biologischen Zellen.

Die Leistungen resultierten aus der Zusammenarbeit von Prof. Limpert, Mitglied des Wissenschaftlichen Direktoriums des Fraunhofer IOF und Professor an der Universität Jena, und Privatdozent Dr. Rothhardt, Forschungsgruppenleiter am Helmholtz-Institut Jena.

Prof. Limpert betont: »Die interdisziplinäre Zusammenarbeit hat es uns ermöglicht, ein kompaktes EUV-Mikroskop im Labormaßstab zu realisieren und an Mikroorganismen zu demonstrieren.« »Die Auszeichnung ist der Glanzpunkt dieser Gesamtleistung«, schließt Dr. Rothhardt an.

Der EPS-QEOD-Preis, eine der höchsten Auszeichnungen in der Laserwissenschaft, wird alle zwei Jahre von der Division of Quantum Electronics and Optics der European Physical Society (EPS) vergeben und würdigt innovative Beiträge zur Lasertechnologie. Die Auszeichnung unterstreicht die internationale Anerkennung der Arbeit von Limpert und Rothhardt.

EPS-QEOD Prize 2024 awarded to Jens Limpert and Jan Rothhardt

High-power source in the EUV range opens up new potential in nanoscience and materials science

Prof. Dr. Jens Limpert and Dr. Jan Rothhardt have developed new technologies to realize EUV sources with synchrotron-like performance. Using high-performance femtosecond fiber laser systems and coherent combination of multiple fiber amplifiers, they developed high-harmonic sources with high conversion efficiency. These sources achieve photon flux that exceeds the state of the art by several orders of magnitude.

Their work led to the development of a high-resolution, lensless EUV microscope that uses the ptychography method. With a resolution of 16 nm, it provides quantitative amplitude and phase information and opens up new possibilities in nanoscience and materials science, e.g., for nanoelectronics, data storage, or biological imaging, including cancer cell detection and the study of biological interactions of pathogens, drugs, or nanoparticles with biological cells.

The achievements resulted from the collaboration between Prof. Limpert, member of the Scientific Directorate of Fraunhofer IOF and Professor at the University of Jena, and Dr. Rothhardt, research group leader at the Helmholtz Institute Jena.

Prof. Limpert emphasized, "The interdisciplinary collaboration has enabled us to create a compact EUV microscope on a laboratory scale and to demonstrate it on microorganisms." "The award is the highlight of this overall achievement," Dr. Rothhardt concluded.

The EPS-QEOD Prize, one of the highest honors in laser science, is awarded every two years by the Division of Quantum Electronics and Optics of the European Physical Society (EPS) and recognizes innovative contributions to laser technology. The award highlights the international recognition of Limpert and Rothhardt's work.



*Prof. Jens Limpert und
Dr. Jan Rothhardt wurden
mit dem EPS-QEOD-Preis
2024 ausgezeichnet /
Prof. Jens Limpert and
Dr. Jan Rothhardt were
awarded the EPS-
QEOD Prize 2024*

SPIE Photonics Europe

Doktorand des Fraunhofer IOF erhält »Best Student Paper Award« in Straßburg

Vom 7. bis 11. April 2024 fand in Straßburg die diesjährige SPIE Photonics Europe statt, eine bedeutende interdisziplinäre Branchen-Veranstaltung, auf der zahlreiche Akteure aus den Bereichen Optik und Photonik zusammenkommen.

Ein Teil des internationalen Events war die Subkonferenz »Specialty Optical Fibres VIII«. Im Rahmen dieser präsentierte Gonzalo Palma-Vega, Wissenschaftler am Fraunhofer IOF, seine Forschungsarbeit zum Thema »Static and dynamic mode interaction in high-average power polarization maintaining fibers«.

In seiner Arbeit beschäftigt sich Gonzalo Palma-Vega mit Modeninteraktionen in polarisationserhaltenden (PM) Ytterbium-dotierten Faserverstärkern, die eine hohe Durchschnittsleistung aufweisen. Dabei wird untersucht, wie diese Interaktionen die Effizienz des Verstärkers beeinflussen, abhängig von der Polarisation des Seedlasers.

Es zeigt sich, dass Kreuzungen zwischen Kern- und Mantelmoden besonders intensiv sind, wenn die Polarisation parallel zur schnellen Achse der PM-Faser ausgerichtet ist. Die Studie beleuchtet außerdem den Einfluss der Eingangspolarisation auf Modeninstabilitäten. Er konnte nachweisen, dass eine unerwartet starke Verformung des Ausgangsstrahls auftritt, wenn die Faser in ihrer schnellen Achse betrieben wird. Diese entsteht aufgrund einer statischen Kreuzkopplung zwischen der Grundmode in der schnellen Achse und der ersten höheren Mode in der langsamen Achse, und zwar unterhalb der TMI-Schwelle.

Durch seinen innovativen Forschungsansatz und die exzellente Qualität seiner Präsentation konnte er die Fachjury überzeugen und wurde dafür mit dem »Best Student Paper Award« ausgezeichnet.

SPIE Photonics Europe

PhD student from Fraunhofer IOF receives 'Best Student Paper Award' in Strasbourg

From April 7 to 11, 2024, Strasbourg played host to the annual SPIE Photonics Europe, a major interdisciplinary industry event that brings together numerous players from the fields of optics and photonics.

Part of the international event was the sub-conference 'Specialty Optical Fibres VIII'. At this event, Gonzalo Palma-Vega, a researcher at Fraunhofer IOF, presented his work on "Static and dynamic mode interaction in high-average power polarization maintaining fibers".

In his work, Palma-Vega studies the impact of mode interactions in polarization maintaining (PM) ytterbium-doped fiber amplifiers with high-average powers. He investigates how these interactions influence the efficiency and power scaling of the amplifier, depending on the polarization of the seed laser.

It was found that avoided-crossings between core and cladding modes are particularly intense when the polarization is aligned parallel to the fast axis of the PM fiber. The study also explained the influence of the input polarization on transverse mode instabilities (TMI). Furthermore, it was demonstrated that an unexpected strong deformation of the output beam occurs when the fiber is operated in the fast axis. This deformation results from a static cross-coupling between the fundamental mode in the fast axis and the first high-order mode in the slow axis, and this below the TMI threshold.

Thanks to his innovative research approach and the excellent quality of his presentation, he was able to convince the expert jury and was awarded the 'Best Student Paper Award'.



*Gonzalo Palma Vega –
Gewinner des »Best Student
Paper Awards« / Gonzalo
Palma Vega — winner of the
‘Best Student Paper Award’*

SPIE Photonics West

Forschende des Fraunhofer IOF und des Instituts für Angewandte Physik Jena mit »Best Student Presentation Awards« ausgezeichnet

Die neuesten Forschungsentwicklungen und Technologien im Bereich der Optik und Photonik lockten vom 30. Januar bis 1. Februar 2024 zahlreiche Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft und Industrie nach San Francisco zur größten internationalen Konferenz für Photonik – der SPIE Photonics West.

Die diesjährige Teilnahme an der Messe war für teilnehmende Forschende aus Jena von Erfolg gekrönt: Gleich drei »Best Student Presentation Awards« gingen für die besondere wissenschaftliche Relevanz und die Qualität ihrer Präsentation an Wissenschaftler des Fraunhofer Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und des Instituts für Angewandte Physik (IAP) der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Maximilian Karst (IAP), Friedrich Möller (IOF) und Mathias Lenski (IAP) konnten das Konferenzkomitee von sich und ihrer Forschung überzeugen.

Mit seiner Präsentation »Pulse quality improvement in multipass cells through dispersion engineering« erreichte Maximilian Karst den ersten Platz der »Frontiers in Ultrafast Optics Best Student Paper Competition«. In der »Fiber Lasers Best Student Oral Paper Competition« belegte Friedrich Möller, Forscher am Fraunhofer IOF in der Abteilung Laser- und Fasertechnologie, mit seiner Präsentation »Spectral beam combining of kW-class thulium-doped fiber lasers« den zweiten Platz. Mathias Lenski freut sich über den dritten Platz des Symposiums mit der Vorstellung seiner Forschung zum Thema »Highly efficient, in-band pumped, thulium-doped, Q-switched fiber laser«.

Die prämierten Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des »Leistungszentrum Photonik« durchgeführt (siehe Seite 102).

SPIE Photonics West

Researchers from Fraunhofer IOF and the Institute for Applied Physics Jena honored with 'Best Student Presentation Awards'

The latest research developments and technologies in the field of optics and photonics attracted numerous representatives from science and industry to San Francisco from January 30 to February 1, 2024, for the largest international conference for photonics — SPIE Photonics West.

This year's participation in SPIE Photonics West in San Francisco was crowned with success for participating researchers from Jena. Three 'Best Student Presentation Awards' went to scientists from the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF and the Institute of Applied Physics (IAP) at Friedrich Schiller University Jena for the particular scientific relevance and quality of their presentations. Maximilian Karst (IAP), Friedrich Möller (IOF), and Mathias Lenski (IAP) successfully convinced the conference committee of their research.

With his presentation 'Pulse quality improvement in multipass cells through dispersion engineering', Maximilian Karst took first place in the 'Frontiers in Ultrafast Optics Best Student Paper Competition'. In the 'Fiber Lasers Best Student Oral Paper Competition', Friedrich Möller, researcher at Fraunhofer IOF in the Laser and Fiber Technology department, took second place with his presentation "Spectral beam combining of kW-class thulium-doped fiber lasers". Mathias Lenski is pleased to have won third place at the symposium with the presentation of his research on "Highly efficient, in-band pumped, thulium-doped, Q-switched fiber laser".

The award-winning research work was carried out as part of the 'Center of Excellence in Photonics' (see page 102).



*Maximilian Karst, Mathias
Lenski und Friedrich Möller
(v.l.n.r.) – Gewinner der »Best
Student Presentation Awards«
/ Maximilian Karst, Mathias
Lenski and Friedrich Möller
(f.l.t.r.) — winners of the 'Best
Student Presentation Awards'*

Dr.-Ing. Siegfried Werth Preis für Anne-Sophie Munser

Junge Forscherin für innovatives Verfahren zur Bakteriendetektion ausgezeichnet

Bei der Diagnose von Krankheiten sowie in der Lebensmittel- und Wasserüberwachung ist eine schnelle und präzise Detektion von Bakterien und Mikroorganismen von entscheidender Bedeutung. Bislang benötigten klassische Verfahren oft mehrere Stunden bis Tage, um zuverlässige Ergebnisse zu liefern. Die von Dr. Anne-Sophie Munser vorgestellte Methode könnte in Zukunft diesen Prozess drastisch beschleunigen.

Dafür wurde Anne-Sophie nun mit dem Dr.-Ing. Siegfried Werth Preis ausgezeichnet. Die Preisverleihung fand am 26. September im Rahmen der Photonics Days Jena statt. Als Vertreter der Siegfried Werth Stiftung übergab Dr. Raoul Christoph die Auszeichnung feierlich an Dr. Munser.

»In meiner Dissertation habe ich untersucht, wie man mithilfe von Streulichtmesstechnik mikrobielle Zellen, insbesondere Bakterien, detektieren und analysieren kann«, erklärt die Wissenschaftlerin. »Durch verschiedene Versuchsaufbauten konnte ich zeigen, dass man aus den Streulichtmustern Rückschlüsse auf unbekannte Zellproben ziehen kann – etwa auf Zellgrößen, -anzahl oder sogar den Zelltyp.« Diese schnelle und sensitive Methode ermöglicht die Untersuchung von Bakterien, ohne dass aufwendige Probenvorbereitungen oder der Einsatz von Fluoreszenzfarbstoffen notwendig sind. Selbst kleinste Zellaggregate können so detailliert analysiert werden.

Das Verfahren eignet sich daher für Lab-on-a-Chip-Technologien. In der Zellbiologie und Biomedizin wird so die Geschwindigkeit der Analyse erheblich gesteigert. »In einem Verbundprojekt mit dem Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie (HKI) konnten wir zeigen, dass die Wirkung von Antibiotika auf verschiedene Bakterien oder ausgebildete Antibiotikaresistenzen in weniger als drei Stunden nachweisbar ist – herkömmliche Methoden benötigen dafür oft mehrere Tage«, ergänzt die Forscherin.

Die entwickelte Methode findet Anwendung in der Infektions- und Arzneimittelforschung sowie in der Lebensmittelsicherheit und eröffnet neue Perspektiven für die medizinische Diagnostik sowie die Qualitätskontrolle von Lebensmitteln.

Dr.-Ing. Siegfried Werth Prize for Anne-Sophie Munser

Young researcher awarded for innovative bacteria detection method

Fast and precise detection of bacteria and microorganisms is crucial in the diagnosis of diseases and in food and water monitoring. Until now, conventional methods have often needed several hours or even days to deliver reliable results. The method presented by Dr. Anne-Sophie Munser could drastically speed up this process in the future.

Anne-Sophie has now been awarded the Dr.-Ing. Siegfried Werth Prize. The award ceremony took place on September 26 as part of the Photonics Days Jena. Dr. Raoul Christoph, representing the Siegfried Werth Foundation, presented the award to Dr. Munser.

”In my dissertation, I investigated how light scattering measurement technology can be used to detect and analyze microbial cells, especially bacteria,” she explains. ”Using various experimental setups, I was able to show that conclusions can be drawn about unknown cell samples from the scattered light patterns — for example, about cell size, number or even cell type.” This fast and sensitive method enables the examination of bacteria without the need for complex sample preparation or the use of fluorescent dyes. Even the smallest cell aggregates can be analyzed in detail.

The method is therefore suitable for lab-on-a-chip technologies. In cell biology and biomedicine, for example, for the detection of pathogenic germs, the speed of analysis is significantly increased. ”In a joint project with the Leibniz Institute for Natural Product Research and Infection Biology (HKI), we were able to show that the effect of antibiotics on various bacteria or developed antibiotic resistance can be detected in less than three hours – conventional methods often take several days,” adds the researcher.

The developed method is applicable in infection and pharmaceutical research as well as in food safety and opens up new perspectives for medical diagnostics as well as quality control.



*Anne-Sophie Munser
präsentiert Ihr
Dissertationsthema bei
den Photonics Days Jena /
Anne-Sophie Munser
presents her dissertation
at the Photonics Days
Jena 2024*

*Dr. Anne-Sophie Munser
mit Dr. Raoul Christoph
von der Dr.-Ing. Siegfried
Werth Stiftung. /
Dr. Anne-Sophie Munser
with Dr. Raoul Christoph
of the Dr.-Ing. Siegfried
Werth Foundation*

WLT-Preis für innovative Fügetechnologien

Dr. Carolin Rothhardt für herausragende wissenschaftliche Leistungen ausgezeichnet

Wie können optische Komponenten zusammengeklebt werden – ganz ohne Klebstoff? Dieser Frage widmet sich Dr. Carolin Rothhardt, Gruppenleiterin für Fügetechnologien in der Abteilung Präzisionsoptische Komponenten und Systeme am Fraunhofer IOF.

Sie forscht mit ihrem Team an innovativen Fügetechnologien für optische Komponenten für Hochleistungslaser und wurde nun für ihre hervorragenden wissenschaftlichen Leistungen mit dem Preis der Wissenschaftlichen Gesellschaft Lasertechnik und Photonik e.V. (WLT) ausgezeichnet. Die Auszeichnung wurde auf der 13. CIRP-Konferenz für photonische Technologien LANE 2024 an die Wissenschaftlerin überreicht.

Im Rahmen ihrer Promotion entwickelte die Jenaer Forscherin die wissenschaftlichen Grundlagen für das »Kleben ohne Klebstoff«, wie sie es nennt. So können optische Komponenten durch beispielsweise wässrige Silikat-Lösungen oder sogar völlig zwischenschichtfrei durch eine spezielle Aktivierung der Oberflächen dauerhaft miteinander verbunden werden – ganz ohne Klebstoff.

Bei den innovativen Fügetechnologien, die am Fraunhofer IOF entwickelt werden, werden die Bauteiloberflächen gezielt so modifiziert, dass die Komponenten direkt aneinanderhaften. Ein weiteres Ziel in der Entwicklung war es, die durch Absorption der Laserstrahlung entstehende Erwärmung zu minimieren. Dies ist entscheidend, um die optische Leistung zu optimieren und die Lebensdauer der Bauteile zu verlängern. Um dies zu erreichen, nutzen die Forschenden transparente Wärmeleiter, die direkt mit dem optisch aktiven Material verbunden werden.

Auf Basis dieser Technologien konnte Carolin Rothhardt die optische Leistung von Komponenten für Hochleistungslaser wesentlich optimieren und in verschiedenen Projekten zur Anwendung bringen.

Die Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik und Photonik e.V. (WLT) vergibt jährlich den WLT-Preis für herausragende Leistungen auf dem Gebiet der angewandten Laserforschung.

WLT prize for innovative bonding technologies

Dr. Carolin Rothhardt awarded for outstanding scientific achievements

How can optical components be bonded together — without any adhesive? This question is the focus of Dr. Carolin Rothhardt, group leader for bonding technologies in the Precision Optical Components and Systems department at Fraunhofer IOF.

She and her team are researching innovative bonding technologies for optical components for high-power lasers. Carolin has been awarded the prize of the Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik und Photonik e.V. (WLT) for her outstanding scientific achievements. The award was presented to her on September 16 at the 13th CIRP Conference on Photonic Technologies LANE 2024.

As part of her PhD, the Jena researcher developed the scientific basis for "bonding without glue", as she calls it. This means that optical components can be permanently bonded together using aqueous silicate solutions, for example, or even completely without interlayers by activating the surfaces in a special way — completely without adhesive.

In the innovative joining technologies developed at Fraunhofer IOF, the component surfaces are specifically modified so that the components adhere directly to each other. A further development goal was to minimize the heating caused by the absorption of laser radiation. This is crucial in order to optimize the optical performance and extend the lifespan of the components. To achieve this, the researchers use transparent heat conductors that are bonded directly to the optically active material.

Based on these technologies, Carolin Rothhardt was able to significantly optimize the optical performance of components for high-power lasers and apply them in various projects.

The Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik und Photonik e.V. (WLT) annually awards the WLT Prize for outstanding achievements in the field of applied laser research.



*Gruppenleiterin Dr. Carolin
Rothhardt für ihre
langjährige Forschung
an klebstofffreien
Fügetechniken
ausgezeichnet / Group
leader Dr. Carolin
Rothhardt honored for
her many years of research
into adhesive-free joining
techniques*





Zahlen und Service 2024
Figures and Service 2024

2024 – Das Institut in Zahlen

2024 – The institute in figures

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2024 ist gegenüber dem Vorjahr um 2,5 % gestiegen, worin die Aufwendungen für Personal um 10 % stiegen, die Sachausgaben reduzierten sich um 9 %. Basis ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag lag bei 17,4 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten 24,5 Millionen Euro.

Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2024 wurden insgesamt 8,8 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

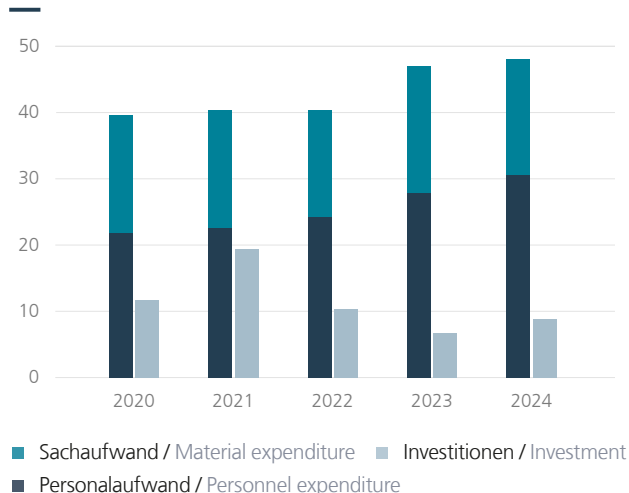
Operating budget

Compared with the previous year the operating budget increased in 2023 by 2.5 %, with expenditures for staff grow by 10 % and material costs expenditures decreased by 9 %. The basis is still the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached more than 17.4 million euros. The received public funding also reached 24.5 million euros.

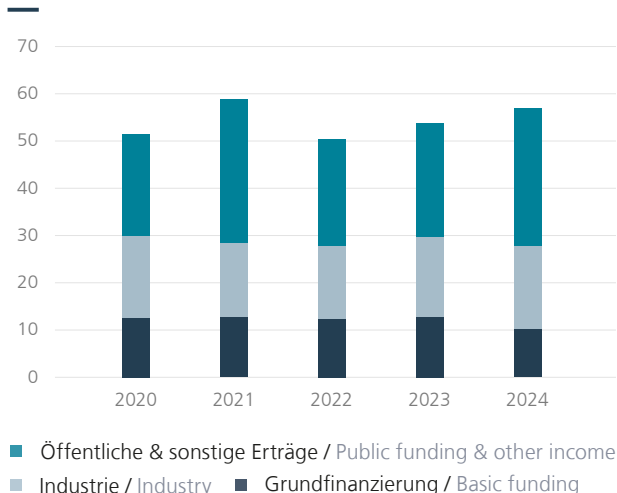
Investments

The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 8.8 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2024.

Fraunhofer IOF Gesamthaushalt / Budget (Mio. €)



Fraunhofer IOF Ertrag / Revenue (Mio. €)



Personal

Im Jahr 2024 gestaltet sich das Personalwachstum im wissenschaftlichen Bereich des Fraunhofer IOF moderat, wobei die Anzahl der Studierenden rückläufig ist. 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 Institut für Angewandte Physik (IAP) der Friedrich-Schiller-Universität Jena in Zahlen

Zum IAP gehörten 2024 6 Professoren, 47 wissenschaftliche und 20 technische Mitarbeitende sowie 127 Promovierende und 93 Studierende. Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

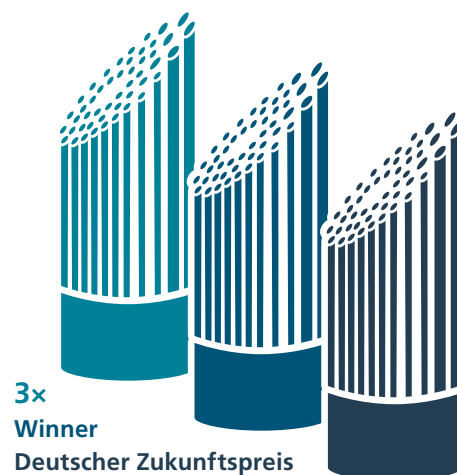
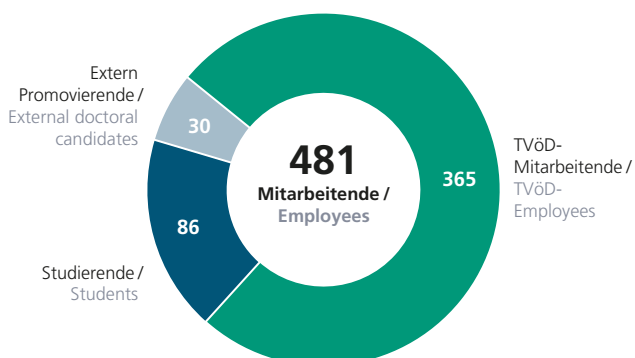
Staff

In 2024, staff growth in the scientific area of Fraunhofer IOF is moderate, with the number of students declining. Young scientists are trained in close cooperation with higher education institutions, in particular the Friedrich Schiller University Jena, the University of Applied Sciences Jena and the Ilmenau University of Technology.

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

A total staff of 6 professors, 47 research assistants, 20 technical assistants, 127 doctoral candidates, and 93 students were working at IAP in 2024. The majority of completed theses are listed in the attachment.

Fraunhofer IOF Mitarbeitende / Staff



Weltoffene Forschung und Diversität

Open-minded research and diversity

Unterschiedliche Perspektiven in der Forschung fördern innovative Ansätze und umfassende Lösungen. Durch den Austausch vielfältiger Ideen werden Bias minimiert und die Validität der Ergebnisse gestärkt.

Different perspectives in research promote innovative approaches and more comprehensive solutions. The exchange of diverse ideas minimizes biases and strengthens the validity of the results.

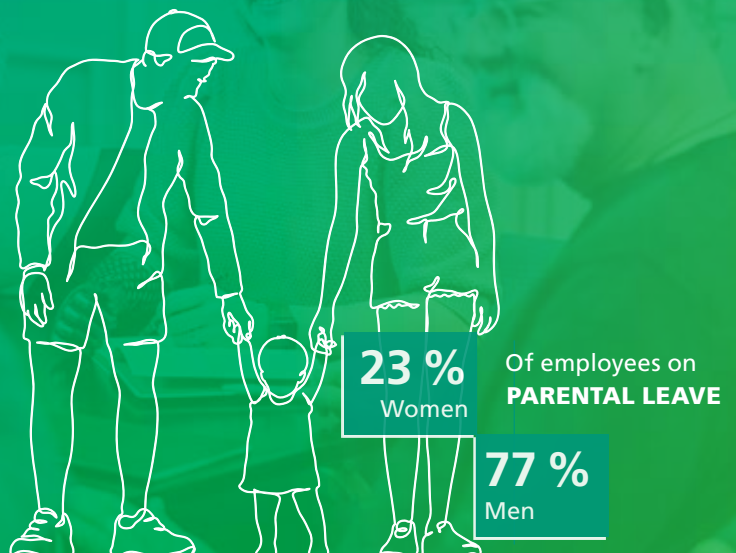
The data is based on the information on the number of employees from Fraunhofer IOF Annual Report 2023. N= 499 includes all TVöD employees, including students and external doctoral candidates. Date of the collected data: December 31, 2023.



69 %
Full-time

AVERAGE AGE
of our employees

36
years



¹ N= 383 includes all TVöD employees, excl. students, external doctoral candidates

Messebeteiligungen

Trade show participations

SPIE Photonics West	San Francisco, USA	30.01.–01.02.2024
DWT Kongress	Bonn	19.–21.03.2024
analytica	München	09.–12.04.2024
Control	Stuttgart	23.–26.04.2024
GPEC	Leipzig	06.–08.05.2024
Rapid.Tech 3D	Erfurt	14.–16.05.2024
Optatec	Frankfurt am Main	14.–16.05.2024
4S Symposium	Palma de Mallorca, Spanien	27.–31.05.2024
ILA Berlin	Berlin	05.–09.06.2024
Optica Quantum 2.0	Rotterdam, Niederlande	23.–27.06.2024
DLR – Nationale Konferenz Satellitenkommunikation	Bonn	03.–04.09.2024
W3+ fair Jena	Jena	24.–25.09.2024
Vision	Stuttgart	08.–10.10.2024
ICSO	Antibes Juan-les-Pins, Frankreich	21.–25.10.2024
IZB	Wolfsburg	22.–24.10.2024
COMPAMED/Medica	Düsseldorf	11.–14.11.2024
EQTC	Lissabon, Portugal	18.–20.11.2024
Space Tech Expo Europe	Bremen	19.–21.11.2024
Formnext	Frankfurt am Main	19.–22.11.2024

Strategische Initiativen

Strategic Initiatives



Leistungszentrum Photonik

Das Leistungszentrum Photonik ist eine einrichtungsübergreifende Forschungs- und Transferplattform des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, der Friedrich-Schiller-Universität Jena, den Leibniz-Instituten HKI und IPHT, dem Helmholtz-Institut Jena sowie der Ernst-Abbe-Hochschule Jena. Im Jahr 2024 hat es im ersten Wettbewerbsdurchlauf der insgesamt 21 evaluierten Fraunhofer Leistungszentren den zweiten Platz erreicht. Die Auszeichnung würdigt insbesondere die exzellente interdisziplinäre Zusammenarbeit der beteiligten Einrichtungen sowie die umfassenden Transferaktivitäten in photonischen Zukunftsmärkten.

Dabei wurde durch das Gutachtergremium die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit im Netzwerk der beteiligten Einrichtungen besonders hervorgehoben. Die Transferaktivitäten, die sich auch in der Unterstützung von Ausgründungen und Startups aus dem Bereich der Photonik durch den Digital Innovation Hub Photonics (DIHP) zeigen, wurden in der Evaluation ebenfalls positiv herausgestellt. Beide Maßnahmen ermöglichen dem Leistungszentrum regional bedeutende, wirtschaftliche Impulse zu setzen und national und international auszustrahlen.

Vor dem Hintergrund dieser positiven Evaluation startet das Leistungszentrum ab 2025 in einen zweiten Wettbewerbsdurchlauf und wird hierbei bis 2027 mit insgesamt drei Millionen Euro durch die Fraunhofer-Gesellschaft gefördert.

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 HKI and IPHT, the Helmholtz Institute Jena and the University of Applied Sciences Jena. In 2024, it achieved second place in the first round of the competition of 21 evaluated Fraunhofer High-Performance Centers. The award particularly recognizes the excellent interdisciplinary cooperation between the participating institutions and the comprehensive transfer activities in photonic future markets.

The panel of experts particularly emphasized the close interdisciplinary cooperation within the network of participating institutions. The transfer activities, which are also reflected in the support provided by the Digital Innovation Hub Photonics (DIHP) to spin-offs and start-ups in the field of photonics, were also positively highlighted in the evaluation. Both measures enable the Center of Excellence in Photonics to provide regionally significant economic impetus and to radiate nationally and internationally.

In light of this positive evaluation, the Center will enter a second funding period starting in 2025 and will receive a total of three million euros in funding from the Fraunhofer-Gesellschaft until 2027.

Digital Innovation Hub Photonics (DIHP)

Das Leistungszentrum Photonik fördert den Transfer von neuen Ideen und Forschungsdesigns aus dem Bereich der Optik und Photonik in die konkrete Anwendung. Ein wichtiger Akteur in diesem Vorhaben: der »Digital Innovation Hub Photonics« (DIHP). Der DIHP unterstützt seit 2019 den Technologietransfer aus der Wissenschaft in die Wirtschaft, insbesondere durch innovative (Aus-) Gründungen und Kooperationen von regionalen, nationalen und internationalen Startups mit der Wissenschaft am Standort Jena.

Diese Expertise im Transfer von Wissen und Technologien aus und mit Startups wurde in den letzten Jahren auf den Standort Ilmenau ausgeweitet. Hier fungiert der »Leistungszentrum InSignA Innovation HUB« (iHUB) als Schwesterprojekt zum DIHP aus Jena. Für die Befähigung von Startups und Gründungen erhalten die »Thüringer Innovation Hubs« bis 2026 eine Förderung durch den Freistaat Thüringen und das Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft in Höhe von 4,2 Millionen Euro. Dieser neu gegründete Zusammenschluss soll innovative Startups beim Wissens- und Technologietransfer fördern. Dabei werden sowohl Ausgründungen aus der Wissenschaft als auch Kooperationen von externen Startups mit den wissenschaftlichen Einrichtungen in Jena und Ilmenau unterstützt.

Einen Kern der »Thüringer Innovation Hubs« DIHP und iHUB bilden die jährlichen Ideenpitches für Gründungsinteressierte als auch für gegründete junge Unternehmen mit innovativen Ideen im Bereich der Optik und Photonik. Hier haben die Teilnehmenden die Möglichkeit, ihre Projekte einer Jury aus Technologie- und Marktexperten vorzustellen. Diese wählt anschließend die Preisträger aus, die eine wissenschaftliche Begleitung erhalten. Beim DIHP-Pitch 2024 präsentierten zehn Projekte ihre Vorhaben in fünfminütigen Präsentationen. Am Ende konnten sich die Firmen Heteromerge GmbH aus Dresden, Midel Photonics GmbH aus Bonn sowie die Jenaer Unternehmen Linkdlab, Laser+, Indigo Optical Systems GmbH und Alwin Schönberg durchsetzen. Diese werden von den Forschungseinrichtungen auf dem Beutenberg-Campus gezielt wissenschaftlich unterstützt.

Digital Innovation Hub Photonics (DIHP)

The Center of Excellence in Photonics promotes the transfer of new ideas and research designs from the field of optics and photonics into concrete applications. An important player in this endeavor is the 'Digital Innovation Hub Photonics' (DIHP). Since 2019, the DIHP has been supporting technology transfer from science to industry, in particular through innovative (spin-off) start-ups and collaborations between regional, national and international start-ups and science in Jena.

This expertise in the transfer of knowledge and technologies from and with start-ups has been extended to the Ilmenau location in recent years. Here, the 'Leistungszentrum InSignA Innovation HUB' (iHUB) acts as a sister project to the DIHP in Jena. The 'Thüringer Innovation Hubs' will receive funding of 4.2 million euros from the Free State of Thuringia and the Thuringian Ministry for Economic Affairs, Science and Digital Society until 2026 to enable start-ups and new businesses. This newly established network aims to promote innovative start-ups in the transfer of knowledge and technology. Both spin-offs from science and collaborations between external start-ups and scientific institutions in Jena and Ilmenau are supported.

The annual idea pitches for people interested in founding a company as well as for young companies that have already been founded and have innovative ideas in optics and photonics form the core of the 'Thüringer Innovation Hubs' DIHP and iHUB. Here, participants have the opportunity to present their projects to a diverse jury of technology and market experts. The jury then selects the prize-winners, who receive scientific support. At the DIHP Pitch 2024, ten projects, either already established or on the verge of being established, presented their plans in five-minute presentations. In the end, Heteromerge GmbH from Dresden, Midel Photonics GmbH from Bonn, and the Jena-based companies Linkdlab, Laser+, Indigo Optical Systems GmbH and Alwin Schönberg were able to assert themselves. They will receive targeted scientific support from the research institutions on the Beutenberg Campus.

Fraunhofer-Zentrum Erfurt

Im Jahr 2024 ging die Leitung des Fraunhofer-Zentrums in Erfurt (FZE) auf das Fraunhofer IOF über. Das FZE ist der Nachfolger des ehemaligen »Fraunhofer Zentrums für Mikroelektronische und Optische Systeme für die Biomedizin« (MEOS). Die neu organisierte Form der Zusammenarbeit verfolgt auch weiterhin das Ziel, die interdisziplinäre Kooperation der drei Fraunhofer-Institute für Photonische Mikrosysteme IPMS, für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF sowie für Zelltherapie und Immunologie IZI zu stärken und zu fördern. Das Zentrum widmet sich daher auch in Zukunft der innovativen kunden- und anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung in den Märkten Informationstechnologien, Medizintechnik, Biotechnologie, Biophotonik sowie Hochleistungslaser und integrierte optische Systeme (PIC).

Fraunhofer Center Erfurt

In 2024, the management of the Fraunhofer Center in Erfurt (FZE) was transferred to Fraunhofer IOF. The FZE is the successor to the former 'Fraunhofer Center for Microelectronic and Optical Systems for Biomedicine' (MEOS). The newly organized form of cooperation continues to pursue the goal of strengthening and promoting interdisciplinary cooperation between the three Fraunhofer Institutes for Photonic Microsystems IPMS, for Applied Optics and Precision Engineering IOF and for Cell Therapy and Immunology IZI. The center will therefore continue to dedicate itself to innovative customer and application-oriented research and development in the markets of information technologies, medical technology, biotechnology, biophotonics and high-power lasers and integrated optical systems (PIC).

de:hub
»Photonics & Digital Experience Platforms«

Der Photonik- und Digitalstandort Jena wurde 2024 zum neuen de:hub der Digital Hub Initiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ernannt. Mit dieser Initiative fördert das BMWK ein Netzwerk zwischen jungen Startups und etablierten Wirtschaftsunternehmen. Dem neuen Thüringer Hub ging unter dem Leitbild »Photonics & Digital Experience Platforms« eine gemeinsame Bewerbung von Jena Digital e. V., dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und OptoNet e. V. voraus. Durch den gestärkten Austausch von technologischer und wirtschaftlicher Expertise sollen neue, disruptive Innovationen ermöglicht werden. Die Ernennung des neuen Jenaer Hubs ist Teil der Erweiterung der deutschlandweiten Initiative von bisher zwölf auf nun 25 de:hubs.

Mit der Unterstützung des Freistaats Thüringen, der eine Förderung in Höhe von einer Million Euro für die Pilotphase bis 2027 bereitstellt, sowie der Stadt Jena und vielen weiteren Partnern des Thüringer Gründungs- und Innovationsökosystems, soll der neue de:hub künftig eine zentrale Rolle in der Transformation und wirtschaftlichen Entwicklung der Region einnehmen und den Standort Thüringen nachhaltig stärken.

de:hub
‘Photonics & Digital Experience Platforms’

The photonics and digital location Jena was named a new de:hub of the Digital Hub Initiative of the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Protection (BMWK). With this initiative, the BMWK is promoting a network between young startups and established commercial enterprises. The new Thuringian hub was preceded by a joint application from Jena Digital e. V., the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF and OptoNet e. V. under the motto "Photonics & Digital Experience Platforms". The strengthened exchange of technological and economic expertise should enable new, disruptive innovations. The appointment of the new Jena hub is part of the expansion of the Germany-wide initiative from the previous 12 to now 25 de:hubs.

With the support of the Free State of Thuringia, which is providing funding of one million euro for the pilot phase until 2027, as well as the city of Jena and many other partners in the Thuringian start-up and innovation ecosystem, the new de:hub is set to play a central role in the transformation and economic development of the region in the future and sustainably strengthen Thuringia as a business location.



Artikel Articles

- Abdullah A. et al.
Implementing a Hybrid Method for Shack–Hartmann Wavefront Spots Labeling on FPGA
Electronics (Switzerland), 13(7), Art. No. 1221, DOI 10.3390/electronics13071221
- Abasifard M. et al.
The ideal wavelength for daylight free-space quantum key distribution
APL Quantum, 1(1), Art. No. 16113, DOI 10.1063/5.0186767
- Abel J.J. et al.
Non-destructive depth reconstruction of Al–Al₂Cu layer structure with nanometer resolution using extreme ultraviolet coherence tomography
Materials Characterization, 211, Art. No. 113894, DOI 10.1016/j.matchar.2024.113894
- Afsharnia M. et al.
Generation of infrared photon pairs by spontaneous four-wave mixing in a CS₂-filled microstructured optical fiber
Scientific Reports, 14(1), Art. No. 977, DOI 10.1038/s41598-024-51482-0
- Ahmadi N. et al.
QUICK3 - Design of a Satellite-Based Quantum Light Source for Quantum Communication and Extended Physical Theory Tests in Space
Advanced Quantum Technologies, 7(4), Art. No. 2300343, DOI 10.1002/qute.202300343
- Alberucci A., Jisha C.P., Nolte S.
Application of the Green's function formalism to the interplay between avalanche and multiphoton ionization induced by optical pulses
Physical Review B, 109(14), Art. No. 144302, DOI 10.1103/PhysRevB.109.144302

Veranschaulichung der Quantenkommunikation zur Langen Nacht der Wissenschaften 2024 am Fraunhofer IOF / Demonstration of quantum communication at the Long Night of Science 2024 at Fraunhofer IOF

- Bartnick M. et al.
Wavelength-stabilized figure-of-9 thulium-doped all-fiber laser emitting 560 fs pulses
Laser Physics, 34(2), Art. No. 25101, DOI 10.1088/1555-6611/ad1504
- Baruah R. et al.
Deposition of CdSe Nanocrystals in Highly Porous SiO₂ Matrices—In Situ Growth vs. Infiltration Methods
Materials, 17(17), Art. No. 4379, DOI 10.3390/ma17174379
- Bender V. et al.
Spectroscopic Study of the Excitonic Structure in Monolayer MoS₂ under Multivariate Physical and Chemical Stimuli
Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science, 221(1), Art. No. 2300113, DOI 10.1002/pssa.202300113
- Bennenhei C. et al.
Organic Room-Temperature Polariton Condensate in a Higher-Order Topological Lattice
ACS Photonics, 11(8), DOI 10.1021/acsp Photonics.4c00268
- Besaga V.R. et al.
Nonlocal quantum differentiation between polarization objects using entanglement
APL Photonics, 9(4), Art. No. 41301, DOI 10.1063/5.0190665
- Birckigt P. et al.
A geometrically scalable method for manufacturing high quality factor mechanical resonators
Optics Letters, 49(21), DOI 10.1364/OL.542065
- Birckigt P. et al.
Water Stress Corrosion in a Directly Bonded Borofloat Glass Interface
ECS Journal of Solid State Science and Technology, 13(12), Art. No. 123005, DOI 10.1149/2162-8777/ad9d79
- Blothe M. et al.
Transverse Inscription of Silicon Waveguides by Picosecond Laser Pulses
Laser and Photonics Reviews, 18(11), Art. No. 2400535, DOI 10.1002/lpor.202400535
- Bräuer-Burchardt C. et al.
Deepwater 3D Measurements with a Novel Sensor System
Applied Sciences (Switzerland), 14(2), Art. No. 557, DOI 10.3390/app14020557
- Brückner L. et al.
Mid-infrared dielectric laser acceleration in a silicon dual pillar structure
Optics Express, 32(16), DOI 10.1364/OE.531071
- Bucher T. et al.
Influence of resonant plasmonic nanoparticles on optically accessing the valley degree of freedom in 2D semiconductors
Nature Communications, 15(1), Art. No. 10098, DOI 10.1038/s41467-024-54359-y
- Carter J.J. et al.
Designing gram-scale resonators for precision inertial sensors
Physical Review Applied, 22(1), Art. No. 14045, DOI 10.1103/PhysRevApplied.22.014045
- Carter J.J. et al.
Compact inertial sensors for measuring external disturbances of physics experiments
Scientific Reports, 14(1), Art. No. 17775, DOI 10.1038/s41598-024-68623-0
- Cheng X.B., Schröder S., Lequime M.
Special Section Guest Editorial: Frontiers of Optical Coatings II
Optical Engineering, 63(9), Art. No. 91601, DOI 10.1117/1.OE.63.9.091601
- Chester A.M. et al.
Loading and thermal behaviour of ZIF-8 metal-organic framework-inorganic glass composites
Dalton Transactions, 53(25), DOI 10.1039/d4dt00894d
- Cholsuk C. et al.
Efficient light propagation algorithm using quantum computers
Physica Scripta, 99(4), Art. No. 45110, DOI 10.1088/1402-4896/ad2d4c
- Conlon L.O. et al.
Testing the postulates of quantum mechanics with coherent states of light and homodyne detection
New Journal of Physics, 26(5), Art. No. 53003, DOI 10.1088/1367-2630/ad4203
- Cholsuk C. et al.
Identifying Electronic Transitions of Defects in Hexagonal Boron Nitride for Quantum Memories
Advanced Optical Materials, 12(13), Art. No. 2302760, DOI 10.1002/adom.202302760

Artikel Articles

- Cholsuk C. et al.
The hBN Defects Database: A Theoretical Compilation of Color Centers in Hexagonal Boron Nitride
Journal of Physical Chemistry C, 128(30), DOI 10.1021/acs.jpcc.4c03404
- Ehtesabi S. et al.
Assessing plasmon-induced reactions by a combined quantum chemical-quantum/classical hybrid approach
Nanoscale, 16(32), DOI 10.1039/d4nr02099e
- Eisenbach L. et al.
Highly efficient nonlinear compression of mJ pulses at 2 μ m wavelength to 20 fs in a gas-filled multi-pass cell
JPhys Photonics, 6(3), Art. No. 35015, DOI 10.1088/2515-7647/ad4cc4
- Eschen W. et al.
Structured illumination ptychography and at-wave-length characterization with an EUV diffuser at 13.5 nm wavelength
Optics Express, 32(3), DOI 10.1364/OE.507715
- Fang Y.D. et al.
Crystalline Microstructure, Microsegregations, and Mechanical Properties of Inconel 718 Alloy Samples Processed in Electromagnetic Levitation Facility
Crystals, 14(3), Art. No. 244, DOI 10.3390/cryst14030244
- Fazili R. et al.
Simple but efficient polarization-entangled photon sources
Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, 41(12), DOI 10.1364/JOSAB.531089
- Ferreira B. et al.
Revealing Dark Exciton Signatures in Polariton Spectra of 2D Materials
ACS Photonics, 11(6), DOI 10.1021/acsphotonics.3c01795
- Frasch J. et al.
Additive manufacturing of variothermal injection moulding insert made of Al-40Si
International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 134(45750), DOI 10.1007/s00170-024-14151-0
- Frasch J., von Lukowicz H., Risse S.
Investigation of additively manufactured lattice structures for refractive optical systems based on auxetic properties
Progress in Additive Manufacturing, 9(3), DOI 10.1007/s40964-024-00658-1
- Gäbler T.B. et al.
Photon Pair Source based on PPLN-Waveguides for Entangled Two-Photon Absorption
Advanced Physics Research, 3(2), Art. No. 2300037, DOI 10.1002/apxr.202300037
- Goessinger E. et al.
Novel, non-invasive method for classification of melanocytic lesions using a direct illumination multispectral imaging camera
EJC Skin Cancer, 2, Art. No. 100099, DOI 10.1016/j.ejcskn.2024.100099
- Goessinger E.V. et al.
Classification of melanocytic lesions using direct illumination multispectral imaging
Scientific Reports, 14(1), Art. No. 19036, DOI 10.1038/s41598-024-69773-x
- Gonoskov I. et al.
Nonclassical light generation and control from laser-driven semiconductor intraband excitations
Physical Review B, 109(12), Art. No. 125110, DOI 10.1103/PhysRevB.109.125110
- Gour J. et al.
Wafer-scale nanofabrication of sub-5 nm gaps in plasmonic metasurfaces
Nanophotonics, DOI 10.1515/nanoph-2024-0343
- Hong M. et al.
Polarization-entangled photon-pair source using beam displacers and thin crystals
Optics Letters, 49(19), DOI 10.1364/OL.536820
- Höppener C. et al.
Tip-enhanced Raman scattering
Nature Reviews Methods Primers, 4(1), Art. No. 47, DOI 10.1038/s43586-024-00323-5
- Junaid S. et al.
Cascaded four-wave mixing in liquid-core optical fibers
APL Photonics, 9(1), Art. No. 16114, DOI 10.1063/5.0166810

- Kappe F. et al.
Chirped Pulses Meet Quantum Dots: Innovations, Challenges, and Future Perspectives
Advanced Quantum Technologies, DOI 10.1002/qute.202300352
- Karli Y. et al.
Robust single-photon generation for quantum information enabled by stimulated adiabatic rapid passage
Applied Physics Letters, 125(25), Art. No. 254002, DOI 10.1063/5.0241504
- Kesorn A. et al.
Formation energy prediction of neutral single-atom impurities in 2D materials using tree-based machine learning
Machine Learning Science and Technology, 5(3), DOI 10.1088/2632-2153/ad66ae
- Knoblich M. et al.
Annular lithography for fabricating micro- and meso-scale optical structures on curved surfaces
Optics Express, 32(27), DOI 10.1364/OE.542829
- Kobylinskiy A. et al.
Tailored detection efficiency for linear variable filter-based sensors: applying simulation models of spectral characteristics in optical design
Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, 41(8), DOI 10.1364/JOSAA.529080
- Koch T. et al.
Ultrabroadband two-beam coherent anti-Stokes Raman scattering and spontaneous Raman spectroscopy of organic fluids: A comparative study
Journal of Biophotonics, 17(9), DOI 10.1002/jbio.202300505
- Kodgirwar S. et al.
Bayesian multi-exposure image fusion for robust high dynamic range ptychography
Optics Express, 32(16), Art. No. 524284, DOI 10.1364/OE.524284
- Kohler F.C. et al.
Standardized analysis of syndesmosis stability in ankle trauma with an innovative syndesmosis-test-tool: a biomechanical study
Scientific Reports, 14(1), Art. No. 1659, DOI 10.1038/s41598-024-51872-4
- Korolev V. et al.
Tunable high-order harmonic generation in GeSbTe nano-films
Nanophotonics, 13(18), DOI 10.1515/nanoph-2023-0859
- Kretzschmar T. et al.
Quantitative Investigation of Quantum Emitter Yield in Drop-Casted Hexagonal Boron Nitride Nanoflakes
ACS Applied Optical Materials, 2(7), DOI 10.1021/acsaom.4c00200
- Krstić A. et al.
Hybrid Source of Quantum Light for Generation of Frequency Tunable Fock States
Physical Review Letters, 133(20), Art. No. 203605, DOI 10.1103/PhysRevLett.133.203605
- Kumar A. et al.
Comparative Study of Quantum Emitter Fabrication in Wide Bandgap Materials Using Localized Electron Irradiation
ACS Applied Optical Materials, 2(2), DOI 10.1021/acsaom.3c00441
- Kumar A. et al.
Polarization Dynamics of Solid-State Quantum Emitters
ACS Nano, 18(7), DOI 10.1021/acsnano.3c08940
- Lammers K. et al.
Electro-optical control of polarization in femtosecond-laser written waveguides using an embedded liquid crystal cell
International Journal of Development and Conflict, 14(4), DOI 10.1364/OME.507230
- Lenski M. et al.
In-band pumped, Q-switched thulium-doped fiber laser system delivering 140 W and 7 mJ pulse energy
Optics Letters, 49(14), DOI 10.1364/OL.528330
- Leon-Torres J.R. et al.
Off-axis holographic imaging with undetected light
Optics Express, 32(20), DOI 10.1364/OE.528724
- Liao W. et al.
Leveraging 3D convolutional neural network and 3D visible-near-infrared multimodal imaging for enhanced contactless oximetry
Journal of biomedical optics, 29, DOI 10.1117/1.JBO.29.S3.S33309

Artikel Articles

- Liu D. et al.
Dendritic Si growth morphologies in highly undercooled Al–Si alloys
Journal of Materials Research and Technology, 31, DOI 10.1016/j.jmrt.2024.05.252
- Liu P. et al.
Volcanic Eruption in the Nanoworld: Efficient Oxygen Exchange at the Si/SnO₂ Interface
Small, 20(35), Art. No. 2404508, DOI 10.1002/sml.202404508
- Lung S. et al.
Robust Classical and Quantum Polarimetry with a Single Nanostructured Metagrating
ACS Photonics, 11(3), DOI 10.1021/acsphotonics.3c01287
- Mincigrucci R. et al.
Structured illumination microscopy with extreme ultraviolet pulses
Optics Express, 32(17), DOI 10.1364/OE.531302
- Mitryakhin V. N. et al.
Engineering the Impact of Phonon Dephasing on the Coherence of a WSe₂ Single-Photon Source via Cavity Quantum Electrodynamics
Physical Review Letters, 132, Art. No. 206903, DOI 10.1103/PhysRevLett.132.206903
- Monika M. et al.
Quantum state processing through controllable synthetic temporal photonic lattices
Nature Photonics, DOI 10.1038/s41566-024-01546-4
- Nizovtseva I. et al.
Climate related phase transitions with moving boundaries by virtue of mushy zone investigation in Al–Cu: Experiment and phase-field modeling
Math. Meth. Appl. Sci., 47, DOI 10.1002/mma.9901
- Pabst, R.
Konzipieren, Messen und Lernen Entwicklungsprogramm für die Zukunft der Führung in der Photonik Sozialmanagement, 22(1), DOI N/A
- Pedram A. et al.
Quantum estimation of the stokes vector rotation for a general polarimetric transformation
New Journal of Physics, 26(9), Art. No. 93033, DOI 10.1088/1367-2630/ad7979
- Pedram A. et al.
Nonlocality Enhanced Precision in Quantum Polarimetry via Entangled Photons
Advanced Quantum Technologies, 7(11), Art. No. 2400059, DOI 10.1002/qute.202400059
- Pileri T. et al.
Direct competitive assay for HER2 detection in human plasma using Bloch surface wave-based biosensors
Analytical Biochemistry, 684, Art. No. 115374, DOI 10.1016/j.ab.2023.115374
- Qi X. et al.
Nonlinear Dynamics of Higher-Order Quasi-Phase-Matched Dispersive Waves Formation in Dispersion-Oscillating Liquid-Core Fibers
Laser and Photonics Reviews, 18(7), Art. No. 2301302, DOI 10.1002/lpor.202301302
- Ramm R. et al.
Fusion of Multimodal Imaging and 3D Digitization Using Photogrammetry
Sensors, 24(7), Art. No. 2290, DOI 10.3390/s24072290
- Santos E.A. et al.
Entangled photon-pair generation in nonlinear thin-films
Nanophotonics, 13(18), DOI 10.1515/nanoph-2024-0111
- Schaffrath S. et al.
Quantum imaging beyond the standard-quantum limit and phase distillation
New Journal of Physics, 26(2), Art. No. 23018, DOI 10.1088/1367-2630/ad223f
- Schraml D., Notni G.
Synthetic Training Data in AI-Driven Quality Inspection: The Significance of Camera, Lighting, and Noise Parameters
Sensors, 24(2), Art. No. 649, DOI 10.3390/s24020649
- Sevilla-Gutiérrez C. et al.
Spectral properties of transverse Laguerre-Gauss modes in parametric down-conversion
Physical Review A, 109(2), Art. No. 23534, DOI 10.1103/PhysRevA.109.023534

- Severino S. et al.
Attosecond core-level absorption spectroscopy reveals the electronic and nuclear dynamics of molecular ring opening
Nature Photonics, 18(7), DOI 10.1038/s41566-024-01436-9
- Shradha S. et al.
Towards Double Resonant Cavity Enhanced Second Harmonic Generation in Monolayer MoS₂
Advanced Optical Materials, 12(6), Art. No. 2300907, DOI 10.1002/adom.202300907
- Sinelnik A. et al.
Ultrafast all-optical second harmonic wavefront shaping
Nature Communications, 15(1), Art. No. 2507, DOI 10.1038/s41467-024-46642-9
- Speck H. et al.
Analysis of the measurement accuracy of a thermal 3D sensor for transparent objects
Measurement: Sensors, Art. No. 101319, DOI 10.1016/j.measen.2024.101319
- Spiess C., Steinlechner F.
Clock synchronization with pulsed single photon sources
Quantum Science and Technology, 9(1), Art. No. 15019, DOI 10.1088/2058-9565/ad0ce0
- Stefanidi D. et al.
Design of highly efficient far-field beam shapers with irregular maskless microlens arrays
Applied Optics, 63(12), DOI 10.1364/AO.516730
- Stoecker A. et al.
Collagen crosslinking-induced corneal morphological changes: a three-dimensional light sheet Microscopy-based evaluation
Scientific Reports, 14(1), Art. No. 28330, DOI 10.1038/s41598-024-78516-x
- Talbot L. et al.
Mid-infrared tunable filter based on a femtosecond-written silica volume Bragg grating
Optics Letters, 49(13), DOI 10.1364/OL.521708
- Theidel D. et al.
Evidence of the Quantum Optical Nature of High-Harmonic Generation
PRX Quantum, 5(4), Art. No. 40319, DOI 10.1103/PRXQuantum.5.040319
- Topper B. et al.
Laser cooling ytterbium doped silica by 67 K from ambient temperature
Optics Express, 32(3), DOI 10.1364/OE.507657
- Topper B. et al.
Revisiting ytterbium doped silica spectroscopy
Optical Materials Express, 14(12), DOI 10.1364/OME.542870
- Walden S.L. et al.
Two-Color Spatially Resolved Tuning of Polymer-Coated Metasurfaces
ACS Nano, 18(6), DOI 10.1021/acsnano.3c11760
- Walther D. et al.
Recurrent Autoencoder for Weld Discontinuity Prediction
Journal of Advanced Joining Processes, 9, Art. No. 100203, DOI 10.1016/j.jajp.2024.100203
- Wang J. et al.
Phase retrieval algorithm applied to high-energy ultrafast lasers
Applied Optics, 63(10), DOI 10.1364/AO.516820
- Weissflog M.A. et al.
A tunable transition metal dichalcogenide entangled photon-pair source
Nature Communications, 15(1), Art. No. 7600, DOI 10.1038/s41467-024-51843-3
- Weissflog M.A. et al.
Directionally tunable co- and counterpropagating photon pairs from a nonlinear metasurface
Nanophotonics, 13(18), DOI 10.1515/nanoph-2024-0122
- Weissflog M.A. et al.
Nonlinear nanoresonators for Bell state generation
Applied Physics Reviews, 11(1), Art. No. 11403, DOI 10.1063/5.0172240
- Werner L., Hillmer H., Brunner R.
Advanced linear axial wavelength spreading through cascaded double hyperchromats
Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, 41(5), DOI 10.1364/JOSAA.521502
- Wunsch L. et al.
Realisation of an Application Specific Multispectral Snapshot-Imaging System Based on Multi-Aperture-Technology and Multispectral Machine Learning Loops
Sensors, 24(24), Art. No. 7984, DOI 10.3390/s24247984

Artikel Articles

- Wunsch L. et al.
Data Fusion of RGB and Depth Data with Image Enhancement
Journal of Imaging, 10(3), Art. No. 73, DOI 10.3390/jimaging10030073
- Yang Y. et al.
A Near Fourier-Limited Pulse-Preserving Monochromator for Extreme-Ultraviolet Pulses in the Few-Fs Regime
Photonics, 11(6), Art. No. 525, DOI 10.3390/photonics11060525
- Yang M. et al.
Second harmonic generation in monolithic gallium phosphide metasurfaces
Nanophotonics, 13(18), DOI 10.1515/nanoph-2024-0177
- Yao X. et al.
Mechanism of Plasmon-Induced Catalysis of Thiolates and the Impact of Reaction Conditions
Journal of the American Chemical Society, 146(5), DOI 10.1021/jacs.3c09309
- Younesi M. et al.
Erbium doping of lithium niobate on insulator using low-temperature ion exchange
Optical Materials Express, 14(1), DOI 10.1364/OME.500099
- Zhang L. et al.
Probing polarization response of monolayer cell cultures with entangled photon pairs
Journal of Biophotonics, Art. No. e202400018, DOI 10.1002/jbio.202400018

Abschlussarbeiten Theses

Bachelorarbeiten / Bachelor's theses

- Rebecca Crabus
Analyse und Minimierung von Störlichteinflüssen auf die Positionsensorik in MEMS Scanspiegeln
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Daniel Fischer
Implementierung eines Experiments zur Quervernetzung von Kollagen mittels ultrakurzer Laserpulse
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Timo Gemeinhardt
Aufbau und experimentelle Erprobung eines Reglers zur thermischen Stabilisierung von nichtlinearen optischen Kristallen sowie Charakterisierung und Optimierung des dynamischen Verhaltens
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Ali Golband
Entwicklung und Implementierung einer SSOT-Lösung zur Analyse von Q-Problemen in einem Emaillierwerk
Technische Universität Ilmenau
- Moritz Grimm
Inkoherente Strahlkombinierung bei einem Multikernfaser-Oszillator
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Nele Herzog
Einfluss des Polierwerkzeugs auf die hochfrequenten und mittelfrequenten Fehler bei der chemisch-mechanischen Subapertur-Politur von röntgenamorphen Nickel-Phosphor-Schichten
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Joshua Holle
Untersuchungen zur Konzeption eines steuerbaren multispektralen Beleuchtungssystems
Technische Universität Ilmenau
- Marvin Kuß
Aufbau und Charakterisierung mehrerer monolithischer Laserverstärkungskonzepte basierend auf Erbium und Ytterbium dotierten Glasfasern
Technische Universität Ilmenau
- Chang Liu
Prädiktive Beleuchtungssteuerung für die dreidimensionale Erfassung von Forstwegen auf Basis des Stereo Imaging
Technische Universität Ilmenau
- Leon Metz
Design und numerische Simulation eines dynamischen Ofens für nicht-lineare optische Medien
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Paul Mößnang
Untersuchung von Belichtungsstrategien und Prozessanpassungen zur Laser-lithografischen Erzeugung stitchingfreier, hoher Graftonstrukturen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Lukas Petrich
Erprobung und Beschreibung geeigneter VIS und NIR Spektralbereiche für die bildgestützte 3D-Messtechnik im Outdoor-Bereich
Technische Universität Ilmenau
- Jakob Pflugbeil
Entwicklung eines funktionalen Moduls zur Gesicht-Identifizierung mit dem Roboter Boston-Dynamics-Spot
Technische Universität Ilmenau
- Erik Prenzel
Automatization and Characterization of an Entangled Photon Pair Source for Two-Photon Fluorescence Applications
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Paul Rost
Shift-Invarianz und Reziprozität in optischen Streulichtphänomenen
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Yannik Seuß
Aluminiumbasierte Mehrschichtspiegel für den Extrem-Ultra-Violetten Spektralbereich
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Rasmus Trommer
Structure-dependent reflectivity of sputtered gold
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Abschlussarbeiten Theses

Masterarbeiten / Master's theses

- Ajeesh Ajay
Additive Manufacturing of Micro-Lenses from IP-PDMS using Two-Photon Polymerization
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Surja Amit Shaha
Conversion Efficiency and Damage Threshold Investigation in Plasmonic Metasurfaces
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Malte Arps
Optical Inter-Satellite Link Acquisition Algorithm Based on Variable Beam Divergence Using Active Metal Mirror
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- Lea Bohne
Vergleich von Regelungsalgorithmen für den Einsatz von Risley-Prismen in einem CubeSat Laser-Terminal
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Silvia Bornmann
Radiation influence and test strategies for optical coatings in space
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Matthew Chacko Dherish
Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy (FLIM)-Analysis of Tm-doped Fiber Preforms
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Saikat Chandra Das
Optically Measuring the Thickness of Transparent Materials Using Thermal Radiation
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Takele Chanie
Point Spread Function Engineering for Increased Depth of Field Imaging
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Haozhe Chen
Simulations on nanostructures used as a strain gauge
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Siying Chen
All Inkjet Printed PVDF-TrFE Actuators for Deformable Mirror
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Siavash Davani
A sample-based phase algorithm for quantum computers
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Pengfei Dfuan
Entwicklung einer Methode der Abfallerkennung und -lokalisierung für die Reinigung von flächigen Arealen basierend auf RGB-D-Bildverarbeitung für einen mobilen Schreitroboter Boston-Dynamics-Spot
Technische Universität Ilmenau
- Alexander Dörrie
Qualitative Analyse des Energiebegriffes »Primärenergieverbrauch« und Kategorisierung seiner verschiedenen Verwendungen des Begriffes zur Vorbereitung einer quantitativen computergestützten Analyse
Bauhaus-Universität Weimar
- Gerald Ebert
Theoretische Beschreibung der Wasserstoffentwicklung in Photokatalysatoren auf [PtCl₂]-Perylen-Basis
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Mohamed Eid
Spectroscopic Investigation of Thulium Ions
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Hendrik Ellenberg
Error Mitigation in Lossy Gaussian Boson Sampling
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Anne-Marie Engelhardt
Untersuchungen zu geschützten Silberschichtsystemen für Spiegelanwendungen
Ernst-Abbe-Hochschule
- Christian Finger
Position Correlations in Spontaneous Parametric Down Conversion with an Incoherent Light Source
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Niklas Föllmer
Verlustarme, hochbrechende Si₃N₄-Schichten für strukturierbare Lichtwellenleiter
Ernst-Abbe-Hochschule

- Illia Fomin
Untersuchungen zu den Anforderungen und der Umsetzung der DIN EN ISO / IEC 27001:2002-10 sowie zur TISAX
Technische Universität Ilmenau
- Glenn Tresor Legnongo Galekassage
Untersuchung zur Effizienzsteigerung telezentrischer Objektive im sichtbaren und kurzwelligen infraroten (SWIR) Spektralbereich
Technische Universität Ilmenau
- Zengyang Gao
Development and Characterization of a Thermal Single-Shot 3D Sensor Using Statistical Point Pattern Projection
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Kevin Hanemann
Ausheizen von Antireflexbeschichtungen zur Reduktion der optischen Verluste und Testen der thermischen Stabilität (ALD Coatings)
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Mohamed Hassan
Designing a Balanced Homodyne Detector using a Common-base Amplifier
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Patrick Hendra
Broadband Correlated Photon-Pair Recombination by Linearly Chirped Lithium Niobate Waveguide
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Kaveri Jagtap
Phase-Shifted Quantum State Tomography of Undetected Photons for Pure States
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Sebastian Klimke
Örtlich aufgelöste Photometrie unter nicht senkrechten Blickwinkeln
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Eike Krieg
Entwurf eines Systems für die autonome Wegpunktverfolgung und -kartierung in dynamischen Umgebungen anhand des Boston Dynamics »Spot«
Technische Universität Ilmenau
- Dennis Lafeld
Quantenchemische Untersuchungen zur lichtinduzierten Wasserstoffgenerierung mittels molekularen Photokatalysatoren
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Kangrui Liu
Design of Optical Waveguides Based On the Kapitza Effect
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Ben Lüskow
Modellierung und Materialcharakterisierung von Aluminium-Silicium-Gitterstrukturen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Maryam Iran Manesh
Tuning catalytic activity of cobalt oxide: role of spin configuration from first principles calculations
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Styliani Markogiannaki
Direct Glass-to-Metal Ultrafast Laser Welding
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Chiara Maria Mathis
Entwicklung und Funktionsnachweis für einen ortsauflösenden bildgebenden Sensor mit steuerbaren spektralen Beleuchtungssystem
Technische Universität Ilmenau
- Tobias Mehlhorn
Untersuchungen zur strahlungstechnischen Messung und Kalibrierung von Lichtquellen für die spektrale Bildverarbeitung
Technische Universität Ilmenau
- Moritz Meier
Untersuchung der technologischen Grundlagen zur Herstellung versenkter, doppelschichtiger Blaze-Gitter aus einer Kombination fester und flüssiger Materialien
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Ashraf Mir Umair
Photon Number Resolution using 4 pixel Superconducting Nanowire Detectors
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Jyotirmaya Mohanta
Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy (FLIM) Analysis of Thulium Doped Fiber Preforms
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Abschlussarbeiten

Theses

- Sayonil Mollah
Engineering and Characterization of Phase Randomness in Driven Optical Microresonators
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Nicolas Mosquera Hernandez
Developing a Proof of Concept for a Cost-Efficient, High-Precision Deflectometry System
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Noah Leonhard Mühl
Konzeptionierung und konstruktive Umsetzung einer diodengepumpten Festkörperlaserquelle für den medizinischen Einsatz
Technische Universität Ilmenau
- Yash Pathak
Alice in Quantum Time-Frequency Land: Optimized Generation of Single-Mode Squeezed Vacuum State in Waveguides
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Inmaculada Pérez Pérez
Investigation of atom-mediated photon-pair generation in plasmonic nanoparticles
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Michael Riesmeyer
Analysis of noise reduction algorithm performance regarding integration into PLD-based camera system
Technische Universität Ilmenau
- Lisa Rüb
Objekterkennung in PKW mittels Deep Learning Computer Vision Ansätzen unter Verwendung von Radardaten
Technische Universität Ilmenau
- Mahshid Sabbaghiya
Fabrication of diffractive microlens arrays by using ring-shaped lithography
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Andres Saenz Perez
Ferroelectric Domain Engineering for Thin-Film Lithium Niobate Nanophotonic Waveguides
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Nicolás Santos Gómez
Electrooptical Modulator on Lithium Niobate on Insulator Platform
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Rebecca Sophie Schaller
Entwicklung eines Messaufbaus zur dreidimensionalen Oberflächenerfassung transparenter Objekte auf Basis inkohärenter Strahlungsquellen
Technische Universität Ilmenau
- Konrad Scheller
Automatisierte bodendruckarme Methoden zur Durchführung von Bepflanzungsaufgaben im Waldbau
Technische Universität Ilmenau
- David Schobel
Untersuchungen zu einem Probennahmesystem für die Prüfung von Bremsenemissionen
Technische Universität Ilmenau
- Reema Shrestha
Investigation of the Targeted Zernike Modes on the Precompensation of the Uplink Under Different Point-ahead-angles
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Nicolas Eduardo Tangarife Villamizar
Active Interferometric Stabilization and Channel Characterization for Distribution of Quantum Information
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Muhammad Shakil Tariq
Implementation of a pre-processing data pipeline for multispectral image processing
Technische Universität Ilmenau
- Besat Tokhi
Eine qualitative Analyse von Start-ups in der PropTech-Industrie: Wahrnehmungen von Erfolgsfaktoren im Gründungsverlauf aus Sicht der Gründerinnen und Gründer
Bauhaus-Universität Weimar

- Ana Maria Torres
Heralded Hong-Ou-Mandel interference between independent microring resonators
Karlsruhe Institute of Technology
- Idoia Ugarte Olcoz
Characterization of a squeezed light source via optical homodyne tomography
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Xavier Uwurukundo
Entwicklung eines Laserlithographiesystems zur effizienten Herstellung radialsymmetrischer mikrooptischer Elemente auf ebenen und gekrümmten Oberflächen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Aparna Binu Varghese
Investigating interfacial chemistry and mechanical strength of silicate bonded fused silica glass
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Hanjörg Wagner
Entwicklung absorptionsarmer nanostrukturierter Organik/SiO₂ - Schichten für 355 nm
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Maria Wagner
Investigation of Varifocal Micro Lens Array Imaging Systems
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Chuanming Wang
Untersuchung über die Nutzung eines multispektralen Kamerasystems zur Ver-unreinigungserkennung und -lokalisation für eine mobilen Roboter Boston-Dynamics-Spot zur Lösung von Reinigungsaufgaben
Technische Universität Ilmenau
- Mahdieu Werme
Adaptive Synthese von Sensordaten mittels maschinellen Lernens unter Berücksichtigung von bildbasierten Inspektionsprozessen im automatisierten Faserverbundleichtbau
Technische Universität Ilmenau
- Jianxing Xiao
Modelling of plasmonic Nanostructures
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dongli Xu
Untersuchung des Lightweighting von kollaborativen Bildverarbeitungsmodell in industriellen Anwendungen
Technische Universität Ilmenau
- Qian Xu
Output characteristics of a Tm-doped fiber amplifier as a function of the pump wavelength
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Guo Kai Xun
Entwicklung eines funktionalen Modules von Hand-Gesten-Erkennung für den Roboter Boston-Dynamics-Spot
Technische Universität Ilmenau
- Zifei Zhang
Investigating Charge Dynamics Between Monolayer TMDs and Boron Doped Si-nanoparticles with Kelvin Probe Microscope and Other Optical Spectroscopies
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Abschlussarbeiten

Theses

Promotionen / Dissertations

- Pascal Birckigt
Direct Bonding of Microstructured Surfaces on Non-Planar Substrates
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Paul-Gerald Dittrich
Ortsaufgelöste Spektral- und Farbwertermittlung mit Filter-On-Chip Snapshot-Mosaik-Kameras
Technische Universität Ilmenau
- Wilhelm Eschen
Material-Specific and High-Resolution Imaging Using Extreme Ultraviolet Ptychography
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Anna Fedotova
Nonlinear frequency conversion in lithium niobate metasurfaces
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Marta Gilaberte Basset
Resolution limits of quantum imaging with undetected light and optimization towards application
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Philipp Greiner
Webbasierte integrierte Management- und Auditsmanagementsysteme
Technische Universität Ilmenau
- Tianbai Huang
Computational studies of transition metal catalysts and the exploration of structure-reactivity relationships using machine learning approaches
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tobias Kaaden
Experimentelle Untersuchung von raschen Festkörperphasenumwandlungen in Cu-Zn-Al-Legierungen
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Rešad Kavedžić
Intense-laser-field ionization with nondipole corrections
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Alexander Kirsche
Exploring and pushing the boundaries of tunable and waveguide-based high harmonic sources
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Maria Knoblich
Variable optische Strahlformungssysteme zur anwendungsspezifischen Anpassung der Lichtverteilung
Universität Kassel
- Andrej Kržič
Quantum key distribution with entangled photons in daylight
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Pawan Kumar
Photon-Pair Generation and Nonlinear Interference in Nanophotonic Waveguides
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Athira Kuppadakkath
Creation and investigation of hybrid photonic nanostructures with TMDs
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Sebastian Linß
Subwellenlängenstrukturen zur Erzeugung allgemeiner Phasenfunktionen
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Stephanie Lippmann
Developing new methods for characterizing metallic materials employing temperature and concentration gradients
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Anne-Sophie Munser
Analysis of microbial cells and cell aggregates using angle resolved light scattering
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Gia Quyet Ngo
Guided waves systems with embedded two-dimensional materials
Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Gonzalo Palma Vega
Polarization maintaining fibers- fundamental limits and mitigation strategies in high power fiber lasers
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Marc Preißler
Empirische Prozessmodellierung des Fused Filament Fabrication Verfahrens durch semantisch-segmentierte In-Prozessdaten
 Technische Universität Ilmenau

- Anna Rühl (geb. Fedotova)
Nonlinear frequency conversion in lithium niobate metasurfaces
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Paul Schmitt
Schichtwachstum und Eigenschaften von Iridium-Dünnschichten hergestellt mittels Atomlagenabscheidung
 Friedrich-Schiller-Universität

- Christopher Spiess
Clock synchronization with single photons
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Konstantin Trambitzky
2D Surface Analysis of Metal Surfaces Using Texture Feature Algorithms
 Technische Universität Ilmenau

- Chen Zhang
Multispektrale und dreidimensionale Bildgebung im Nahbereich
 Technische Universität Ilmenau

- Xiaodong Zhao
Gas analysis in harsh environments by coherent anti-Stokes Raman scattering
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

Schutzrechte

Intellectual Property

Patentoffenlegungen / Patent First Publications

- 22 F65235
Rothhardt, Jan; Kirschbaum, Michael
Ptychographisches Bildgebungsverfahren und -system
DE 10 2022 117 214 A1
- 22 F65298
Schreiber, Peter; Kundu, Rohan; Michaelis, Dirk
Optischer Strahlformer und maskenloser Zeichenprojektor
DE 10 2022 210 090 A1
- 22 F65317
Wilhelm, Leo Maximilian; Schreiber, Peter; Stefanidi, Dmitrii
Abblendlichtscheinwerfer und Verfahren zum Herstellen derselben
DE 10 2022 210 092 A1
- 22 F65338
Stefanidi, Dmitrii; Schreiber, Peter; Wilhelm, Leo Maximilian
Optikstrahlformer, Fernlichtscheinwerfer und Verfahren zur Projektion von einfallendem Licht
DE 10 2022 210 091 A1
- 22 F65372
Limpert, Jens; Jáuregui, César; Klenke, Arno
Optisches System zur Erzeugung von Licht hoher Leistung
DE 10 2022 126 964 A1
- 22 F65224
Schreiber, Thomas; Nold, Johannes; Steinkopf, Albrecht
Mehrkern-Lichtwellenleiter mit Polarisationserhaltung
DE 10 2023 102 052 A1
- 22 F65438
Freitag, Christoph; Kühmstedt, Peter; Heist, Stefan
Vorrichtung und Verfahren zum optischen Erfassen von Szenen
DE 10 2023 108 640 A1

- 22 F65471
Limpert, Jens; Tünnermann, Andreas; Aleshire, Christopher; Jauregui Misas, Cesar; Klenke, Arno; Maier, Andreas; Lee-mans, Wim; Palmer, Guido; Eichner, Timo
Lichtquelle zum optischen Pumpen eines laseraktiven Mediums
DE 10 2023 102 807 A1
- 23 F66137
Danz, Norbert
Vorrichtung für die Durchführung von biochemischen Untersuchungen einer Probe
DE 10 2023 204 533 A1

Patenterteilungen / Patent Assignment

- 11 F52671
Böhme, Steffen; Schreiber, Thomas; Fabian, Simone
Laser-based splicing of glass fibers onto optical components
US 11,982,840 B1
- 16 F58319
Vetter, Christian; Szameit, Alexander; Gross, Herbert; Nolte, Stefan; Ornigotti, Marco; Steinkopf, Ralf
Anordnung zur Erzeugung eines Bessel-Strahls
EP 3955049 B1
- 17 F59077
Wippermann, Frank; Brückner, Andreas; Duparré, Jacques; Oberdörster, Alexander
Vorrichtung zur Abbildung von Teilgesichtsfeldern, Multiaperturabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Bereitstellen derselben
EP 3610637 B1
- 17 F59163
Wippermann, Frank; Brückner, Andreas; Duparré, Jacques; Oberdörster, Alexander
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
EP 3610637 B1
- 18 F61015
Richter, Daniel; Krämer, Ria; Goebel, Thorsten Albert; Siems, Malte Per, Nolte, Stefan
Method and Device for machining by means of interfering laser radiation
EP 3762176 B1

- 18 F61183
Kinast, Jan; Risse, Stefan
Mirror support for a composite optical mirror and method for its production
CA 3,099,808; US 11,971,605

- 19 F62156
Wippermann, Frank; Duparré, Jacques
Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung zur Erzeugung einer Tiefenkante
EP 3948389 B1

- 20 F63529
Eilenberger, Falk; Vogl, Tobias
Erzeugung von Einzelphotonen
DE 102020126956 B1

- 21F64179
Marques Muniz, André Luiz; Gonzalez Martin Del Campo, Luis Javier; Tangarife Villamizar, Nicolas Eduardo; Steinlechner, Fabian
Phase tuning and phase stabilization of an interferometer
EP 4123257 B1

Ausgewählte Vorlesungen

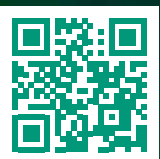
Selected lectures

- Dr. Roland Ackermann
Experimental Optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Erik Beckert
Optikmontage
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Prof. Dr. Robert Brunner
Grundlagen Optik
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Dr. Valerio Gili
Quantum Imaging and Sensing
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Markus Gräfe
Photonic Quantum Technologies
Technische Universität Darmstadt
- Prof. Dr. Stefanie Gräfe
Quantenchemie
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Sebastian Händschke
Universitäre Gründungen und Ausgründungen
Bauhaus-Universität Weimar
- Prof. Dr. Thomas Hühn
Netzwerktechnik
Hochschule Nordhausen
- Prof. Jens Limpert
Grundlagen der Laserphysik
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Stephanie Lippmann
Werkstoffprüfung
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tom Lippoldt
Lasers in Medicine
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Stefan Nolte
Ultrafast Optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Gunther Notni
Aufnahme und Verarbeitung von 3D Daten
Technische Universität Ilmenau
- Prof. Dr. Reinhold Pabst
Coaching und Führung
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Prof. Thomas Pertsch
Fundamentals of modern optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Frank Setzpfandt
Optical Metrology and Sensing
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. René Sondenheimer
Quantum Information Theory
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Olaf Stenzel
Thin film optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Fabian Steinlechner
Fundamentals of quantum information
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Adriana Szeghalmi
Vakuum und Dünnschichtphysik
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Andreas Tünnermann
Structure of Matter
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Uwe Zeitner
Technische Optik
Hochschule München



Wir öffnen Forschung große Türen in die Praxis.

Die Herausforderungen, die uns die Welt um uns herum stellt, sind groß – gut, dass wir bei Fraunhofer in zeitnahen Lösungen denken. Nutzen Sie Ihr Wissen, um mit uns in interdisziplinären Teams Top-Forschung zu forcieren und fit für die Praxis zu machen.



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

Veränderung startet mit uns.

The Fraunhofer-Gesellschaft

The Fraunhofer-Gesellschaft, headquartered in Germany, is one of the world's leading organizations for applied research. Since its founding as a nonprofit organization in 1949, Fraunhofer has held a unique position in the German research and innovation ecosystem. With nearly 32,000 employees, the research organization operates 75 institutes and legally independent research units across Germany. The Fraunhofer-Gesellschaft plays a major role in innovation by prioritizing research on cutting-edge technologies and the transfer of results to industry to strengthen Germany's industrial base and for the benefit of society as a whole.

Fraunhofer's primary customer base consists of large and medium-sized companies that utilize its expertise to boost their competitiveness with new technologies. For years, Fraunhofer has been one of the most active patent applicants in both Germany and Europe. Its extensive international patent portfolio is the basis for technology transfer through research projects, spin-offs and licensing. Moreover, Fraunhofer addresses societal goals in key technology sectors through interdisciplinary and international partnerships in specific markets. Examples include developments in microelectronics, artificial intelligence (AI), quantum computing, healthcare, the circular economy, new materials, energy systems, critical infrastructure security and defense.

Fraunhofer is an attractive and established partner in publicly funded joint projects with industry partners. The Fraunhofer-Gesellschaft is also instrumental in strengthening Germany's innovation and industrial base and ensuring its viability. Its activities create jobs in Germany, increase public-sector investments, give companies competitive edges and foster public acceptance of advanced technology. International partnerships with leading research partners and companies around the world ensure direct contact with the most influential research communities and economic areas.

Fraunhofer's annual business volume is €3.6 billion, €3.1 billion of which is generated by contract research — Fraunhofer's core business model. Unlike other public research organizations, base funding from the German federal and state governments is merely the foundation for the annual research budget. This serves as the basis for groundbreaking precompetitive research that will become important for the private sector and society in the years ahead. Fraunhofer's distinctive feature is its large share of industry revenue, guaranteeing close collaboration with the private sector and industry and the consistent focus of Fraunhofer's research on the market. In 2024 alone, industry revenue accounted for €867 million of its total budget. Fraunhofer's research portfolio is augmented by competitively acquired public-sector funding, pursuing the right balance between public-sector and industry revenue.

Highly motivated employees are the most important factor behind Fraunhofer's success. The research organization therefore fosters an environment that encourages independent thinking, creativity and goal-driven work. It supports career development in both research and industry by providing targeted programs for professional and personal development.

The Fraunhofer-Gesellschaft is a recognized nonprofit organization named after Joseph von Fraunhofer (1787–1826), a Munich-based scholar who enjoyed equal success as a scientist, inventor and entrepreneur. His legacy continues to inspire the organization's spirit of innovation to this day.

Figures as of: April 2025

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
Henning Sylla

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

Walter Oppel
Christian Süß

Gestaltung | Graphic Design

Anne Walterfang

Redaktionsschluss | Editorial deadline

10.04.2024

Druck | Print

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



natureOffice.com/DE-591-2H7E8KQ





iof.fraunhofer.de

**ALL INFO
AT WWW.**



[linkedin.com/company/
fraunhofer-iof](https://www.linkedin.com/company/fraunhofer-iof)

FOLLOW US



[instagram.com/fraunhoferiof](https://www.instagram.com/fraunhoferiof)

**LOOK AT US
ON INSTA**



[youtube.com/
@FraunhoferIOFJena](https://www.youtube.com/@FraunhoferIOFJena)

**DISCOVER
LIGHT**



[wisskomm.social/
@Fraunhofer_IOF](https://www.wisskomm.social/@Fraunhofer_IOF)

**WE SHARE
OPTICS**



Winner Deutscher
Zukunftspreis

3x