

Jahresbericht / Annual Report

---

**2022/23**  
Science in Focus

Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF

# **Science in Focus**

Jahresbericht 2022/23

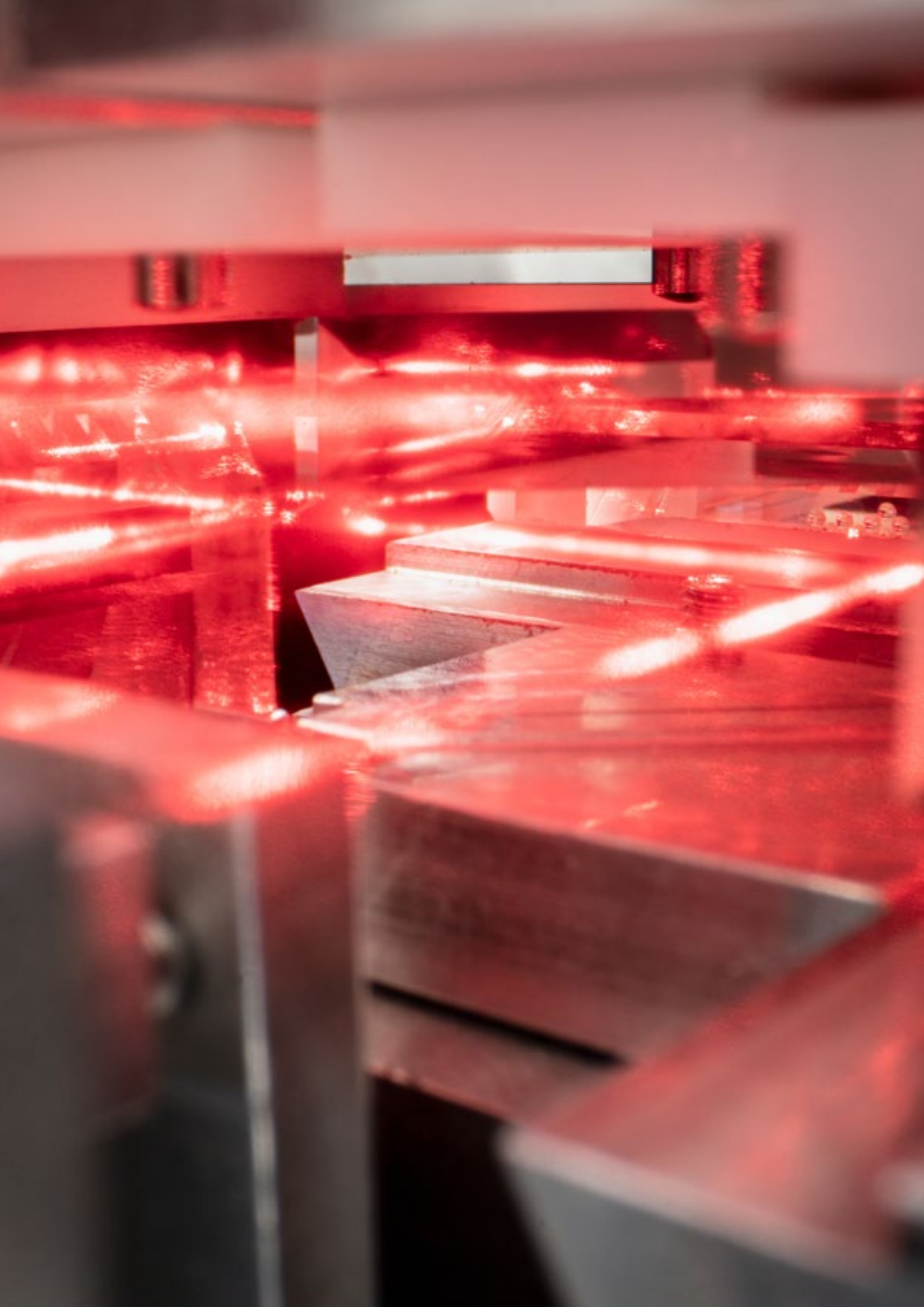
Annual Report 2022/23

---

# Inhalt / Content

---

<b>Grußwort / Foreword</b> .....	<b>4</b>
<b>Ausgewählte Forschungsergebnisse / Selected research results</b> .....	<b>8</b>
Zukunftstechnologien / Emerging Technologies .....	12
Mikro- und nanostrukturierte Optik / Micro- and Nanostructured Optics .....	22
Opto-mechatronische Komponenten und Systeme / Opto-mechatronic Components and Systems .....	34
Präzisionsoptische Komponenten und Systeme / Precision Optical Components and Systems .....	38
Funktionelle Oberflächen und Schichten / Functional Surfaces and Coatings ...	46
Laser- und Fasertechnologie / Laser and Fiber Technology .....	56
Bildgebung und Sensorik / Imaging and Sensing .....	66
Optisches und mechanisches Systemdesign / Optical and Mechanical System Design .....	76
<b>Zahlen und strategische Projekte / Figures and Strategic projects</b> .....	<b>84</b>
Das Institut in Zahlen / The institute in figures .....	86
<b>Anhang / Appendix</b> .....	<b>100</b>



# Grußwort Foreword

---



**Vor 30 Jahren wurde das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena gegründet. Als Forschungsinstitut ist es dabei unsere wichtigste Aufgabe, Technologien zu entwickeln, die das Wohlergehen und die Sicherheit der Menschen in Europa und der Welt verbessern. Seit drei Jahrzehnten entwerfen wir unter diesem Gedanken nun schon innovative Lösungen mit Licht für ein nachhaltiges, sicheres und gesundes Leben. Auch 2022 wurden wieder zahlreiche Forschungs- und Industrie-Projekte umgesetzt, die Tradition und Zukunftsvisionen des Institutes vereinen.**

Im Mai 2022 startete der erste in Deutschland entwickelte und gebaute Hyperspektralsatellit EnMAP seine Reise ins All. Von dort aus soll er künftig unsere Umwelt analysieren und damit nicht nur Folgen des Klimawandels, sondern auch potenzielle Naturgefahren sichtbar machen. Am Fraunhofer IOF wurden insgesamt elf Spiegel sowie diverse Optik-Beschichtungen für dieses bedeutende Klimaprojekt hergestellt.

Nach den Sternen griffen unsere Forschenden auch mit der Entwicklung eines neuartigen Spiegelteleskops für den Einsatz im Weltraum. Gemeinsam haben Forschendes der Fraunhofer-Institute IOF und EMI sowie der Ausgründungen »SPACEOPTIX« und »constellr« ein System entwickelt, das den Wasserkreislauf der Erde überblicken und durch umfassende Datenerhebungen eine effizientere Nutzung des Wassers in Zeiten drohender Ressourcenknappheit ermöglichen wird.

Gespannt verfolgten wir 2022 außerdem die Veröffentlichung der imposanten Bilder, die das James-Webb-Weltraumteleskop seit seinem Start aus den Tiefen des Weltalls immer wieder an die Erde schickte. Im Juli waren die ersten Aufnahmen erschienen: Die Bilder zeigten Galaxien, deren Licht bis zu 13 Milliarden Jahre durch den Weltraum gereist ist und aus der Zeit des Urknalls stammt. Es ist damit der tiefste und schärfste Blick ins Universum, den die Welt bisher je gesehen hat. Das Fraunhofer IOF hat hochpräzise Spiegel für das bisher größte Weltraumobservatorium der Menschheit hergestellt.

**The Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF was founded in Jena 30 years ago. As a research institute, our most important task is to develop technologies that improve the well-being and safety of people in Europe and the world. For three decades now, we have been designing innovative solutions with light for a sustainable, safe, and healthy life based on this thought. In 2022, numerous research and industrial projects were again implemented, combining the institute's tradition and vision for the future.**

In May 2022, the first hyperspectral satellite EnMAP, developed and built in Germany, started its journey into space. It will analyze our environment in the future, making not only the consequences of climate change but also potential natural hazards visible. At Fraunhofer IOF, a total of eleven mirrors and various optical coatings were manufactured for this important climate project.

Our researchers also reached for the stars with the development of a novel mirror telescope for use in space. Together, researchers from the Fraunhofer Institutes IOF and EMI and the spin-offs "SPACEOPTIX" and "constellr" have developed a system that will provide an overview of the Earth's water cycle and, through comprehensive data collection, enable more efficient use of water in times of impending resource scarcity.

In 2022, we also eagerly followed the release of the impressive images that the James Webb Space Telescope had been sending to Earth from the depths of space ever since its launch. By July, the first images appeared: The images showed galaxies whose light had traveled through space for up to 13 billion years, dating back to the Big Bang. It is thus the deepest and sharpest view of the universe the world has ever seen. Fraunhofer IOF has produced high-precision mirrors for mankind's largest space observatory to date.

Es war weiterhin ein besonderer Moment für uns, als in diesem Jahr der Nobelpreis für Physik an ein internationales Team aus Quantenforschern verliehen wurde – darunter Anton Zeilinger, einem wichtigen Impulsgeber der Quantenforschung am Fraunhofer IOF. 2022 wurden auch am Institut erneut große Fortschritte in diesem Zukunftsfeld erreicht: Auf einer neu in Betrieb genommenen 75 km langen Strecke zwischen Jena und Erfurt wurden erstmals erfolgreich Quantenschlüssel über konventionelle Glasfasern ausgetauscht. Diesen großen Meilenstein konnten wir zusammen mit der »Quantum Optics Jena GmbH«, einem Spin-Off des Fraunhofer IOF, erreichen. Mit dem Forschungsvorhaben »PhoQuant« startete überdies ein neues Forschungsprojekt, in dessen Rahmen eine Demonstrations- und Testanlage für photonische Quantencomputer-Chips aufgebaut werden soll.

Wir freuen uns außerdem über zwei neue RUBIN-Projekte (»Regionale Unternehmerische Bündnisse für Innovation«), die in diesem Jahr am Fraunhofer IOF gestartet sind: Das Forschungsbündnis QUANTIFISENS wird eine innovative Sensorik-Plattform basierend auf faseroptischen und quantentechnologischen Verfahren entwickeln, während im Bündnis AMI die Entwicklung multimodaler bildgebender Verfahren im Vordergrund steht.

Die genannten Projekte zeigen: Das Fraunhofer IOF erfindet sich immer wieder neu und füllt mit neuen Projekten den Raum, der durch den Abschluss anderer Forschungsvorhaben entsteht. So auch durch den Abschluss der BMBF-geförderten Forschungsallianz 3Dsensation, die nach acht Jahren 2022 nun ihr formales Ende fand. Dem Ziel, die Interaktion zwischen Mensch und Maschine mithilfe innovativer 3D-Technologien effizienter und sicherer zu gestalten, sind wir mit wegweisenden Entwicklungen innerhalb des Verbunds nähergekommen – etwa mithilfe von Systemen zur Gesundheitsüberwachung von Neugeborenen, zur fälschungssicheren Personenidentifikation oder zum optimierten Warenmanagement im Einzelhandel. Wir freuen uns, dass Start-ups wie die »Xsight Optics GmbH« in Zukunft dazu beitragen werden,

It was also a special moment for us when the Nobel Prize in Physics was awarded this year to an international team of quantum researchers – including Anton Zeilinger, an important driving force behind quantum research at Fraunhofer IOF. In 2022, major progress was again made at the institute in this field of the future: quantum keys were successfully exchanged for the first time over conventional optical fibers on a newly commissioned 75 km link between Jena and Erfurt. We were able to achieve this major milestone together with "Quantum Optics Jena GmbH", a spin-off of Fraunhofer IOF. In addition, a new research project, "PhoQuant", was launched, which aims to build a demonstration and test facility for photonic quantum computer chips.

We are also pleased to announce two new RUBIN projects ("Regional Entrepreneurial Alliances for Innovation") that started at Fraunhofer IOF this year: The research alliance QUANTIFISENS will develop an innovative sensor platform based on fiber-optic and quantum technology methods, while the AMI alliance focuses on the development of multimodal imaging methods.

The aforementioned projects show: Fraunhofer IOF is constantly reinventing itself and filling the space left by the completion of other research projects with new ventures. This was also the case with the conclusion of the BMBF-funded 3Dsensation research alliance, which formally came to an end in 2022 after eight years. We have come closer to our goal of making the interaction between humans and machines more efficient and safer with the help of innovative 3D technologies through groundbreaking developments within the alliance – for example, with the help of systems for monitoring the health of newborns, forgery-proof personal identification, and optimized merchandise management in retail. We are pleased that start-ups such as "Xsight Optics GmbH" will contribute to transferring the gained knowledge and technologies to the market in the future. The founding of the company was accompanied by the "Digital Innovation Hub Photonics".



*Die Gewinner des Joseph-von-Fraunhofer-Preises Dr. Peter Kühmstedt, Dr. Christoph Munkelt und Matthias Heinze (v.l.n.r.). / The winners of the Joseph von Fraunhofer Prize Dr. Peter Kühmstedt, Dr. Christoph Munkelt and Matthias Heinze (from left to right).*

die gewonnenen Kenntnisse und Technologien in den Markt zu überführen. Begleitet wurde die Unternehmensgründung durch den »Digital Innovation Hub Photonics«.

Auch in den traditionellen Anwendungsgebieten der Photonik haben unsere Forschenden 2022 großes geleistet, etwa in der Medizintechnik. Neue Hoffnung im Kampf gegen Krebs bot dabei ein spezielles Industrieprojekt: Gemeinsam mit dem Medizintechnikhersteller Varian Medical Systems haben Fraunhofer-Forschende ein neuartiges System zur Strahlenbehandlung von Tumoren entwickelt. Durch das System werden die Heilungschancen bei Krebs deutlich verbessert. Für diese herausragende Leistung erhielten unsere Wissenschaftler 2022 den Joseph-von-Fraunhofer-Preis.

Dass das Institut ein besonders fruchtbares Umfeld für ambitionierten Nachwuchs bietet, zeigen auch Ehrungen, die in diesem Jahr an unsere (ehemaligen) Mitarbeitenden gingen: Unser Masterand Uday Chandrashekar wurde mit dem Quantum Futur Award ausgezeichnet, dem Nachwuchspreis des BMBF für herausragende Abschlussarbeiten in den angewandten Quantentechnologien. Weiterhin erhielt unsere Ausgründung »Quantum Optics Jena GmbH« für ihren Beitrag zu mehr Cybersicherheit dank quantenbasierter Verschlüsselungen den IQ Innovationspreis Mitteldeutschland.

Auch Veranstaltungen haben wieder an Fahrt aufgenommen: Wir freuen uns sehr, dass wir bereits zum zweiten Mal die Ehre hatten, die Microoptics Conference (MOC) in Jena zu veranstalten. Insgesamt 125 internationale Gäste aus 14 Ländern besuchten uns in der Stadt des Lichts, um sich über die neuesten Ergebnisse, Anwendungen und Herausforderungen auf dem Gebiet der Mikrooptik auszutauschen. Auch unser traditioneller und von der Forschungsgemeinschaft

Our researchers also achieved great results in the traditional areas of application for photonics in 2022, such as medical technology. A special industrial project offered new hope in the fight against cancer: Together with the medical technology manufacturer Varian Medical Systems, Fraunhofer researchers developed a novel system for the radiation treatment of tumors. The system significantly improves the chances of curing cancer. Our scientists received the Joseph von Fraunhofer Prize 2022 for this outstanding achievement.

The fact that the institute offers a particularly fertile environment for ambitious young scientists is also demonstrated by honors that went to our (former) employees this year: Our master's student Uday Chandrashekar was awarded the Quantum Futur Award, the BMBF's prize for young researchers for outstanding theses in applied quantum technologies. Furthermore, our spin-off company "Quantum Optics Jena GmbH" received the IQ Innovation Award Central Germany for its contribution to more cyber security thanks to quantum-based encryption.

Events have also picked up speed again: We are very pleased to have had the honor of hosting the Microoptics Conference (MOC) in Jena for the second time. A total of 125 international guests from 14 countries visited us in the City of Light to share the latest results, applications, and challenges in the field of microoptics. Our traditional ultra-precision fabrication workshop, which is in high demand from the research community, also took place for the 10th time this year. The hybrid event, the "Photonics Days Jena", the networking event for young researchers in optics and photonics, was again met with broad international demand. During the "Lange Nacht der Wissenschaften" (Long Night of Sciences), we could finally welcome young and old science fans once again.



*»Lange Nacht der Wissenschaften« in Jena, 2.000 Menschen zu Gast am Leistungszentrum Photonik. /  
"Long Night of the Sciences" in Jena, 2,000 people visited the Center of Excellence in Photonics.*

stark nachgefragter Ultrapräzisionsfertigung-Workshop fand in diesem Jahr zum 10. Mal statt. Mit einem hybriden Format stießen weiterhin die »Photonics Days Jena«, das Netzwerk-event für studentischen Nachwuchs in der Optik und Photonik, erneut auf eine breite internationale Nachfrage. Bei der »Langen Nacht der Wissenschaften« begrüßten wir überdies endlich wieder große und kleine Wissenschaftsfans.

All diese herausragenden Leistungen waren uns 2022 erneut nur dank fruchtbarer Kooperationen mit unseren Partnerinnen und Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik möglich. Ich bedanke mich daher bei unseren Fördermittelgebern, kooperierenden Unternehmen sowie Partneereinrichtungen. Nur dank Ihrer Unterstützung ist es uns möglich, seit 30 Jahren innovative und anwendungsorientierte Forschung zu betreiben. Mein besonderer Dank gilt dabei im Jubiläumsjahr allen Mitarbeitenden des Fraunhofer IOF. Trotz der vielen und schwierigen Herausforderungen, die sich uns als Institut speziell in den vergangenen Jahren der Pandemie gestellt haben, ist es uns in Teamarbeit gelungen, außergewöhnliche Leistungen zu erbringen. Mit Freude und Spannung blicke ich in die Zukunft, in der wir weiterhin gemeinsam innovative Lösungen mit Licht entwickeln werden.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
Leiter Fraunhofer IOF / Director of the Fraunhofer IOF

All these outstanding achievements were only possible for us in 2022 thanks to fruitful collaborations with our partners from science, industry, and politics. I would therefore like to thank our funding bodies, cooperating companies, and partner institutions. It is only thanks to your support that we have been able to conduct innovative and application-oriented research for 30 years. In this anniversary year, my special thanks go to all employees of the Fraunhofer IOF. Despite the many difficult challenges we have faced as an institute, especially in the past years of the pandemic, we have managed to achieve extraordinary results through teamwork. It is with pleasure and excitement that I look forward to the future, where we will continue to work together to develop innovative solutions with light.







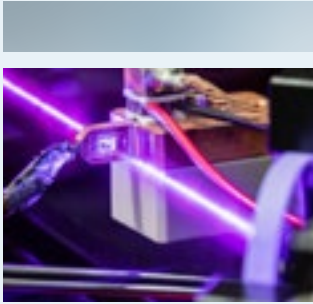
Ausgewählte Forschungsergebnisse 22/23  
Selected research results 22/23

---

# Wissenschaftliche Fachabteilungen

## Scientific departments

---



### Emerging Technologies

#### Research focus

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

#### Head of department

Dr. Ramona Eberhardt

#### Scientific research groups

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



### Micro- and Nano-structured Optics

#### Research focus

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

#### Head of department

Dr. Falk Eilenberger

#### Scientific research groups

- **Center for Advanced Micro- and Nano-Optics**  
Dr. Martin Rumpel  
Group leader
- **Advanced Microoptical Components**  
Dr. Robert Leitel  
Group leader



### Opto-mechatronic Components and Systems

#### Research focus

- Quantum technologies hard- and software
- Microassembly and packaging technologies
- Hybrid system integration
- Interlayer bonding technologies
- 3D printing technologies

#### Head of department

Dr. Erik Beckert

#### Scientific research groups

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



### Precision Optical Components and Systems

#### Research focus

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

#### Head of department

Dr. Stefan Risse

#### Scientific research groups

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



### Functional Surfaces and Coatings

#### Research focus

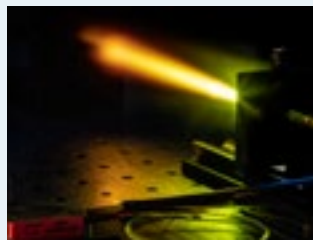
- Ultra-broadband AR and HR coatings
- Conformal coatings using atomic layer deposition
- Ultra-stable, space-qualified coatings
- Metrology for low-loss coatings: light scattering and absorption

#### Head of department

Dr. Sven Schröder

#### Scientific research groups

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



### Laser and Fiber Technology

#### Research focus

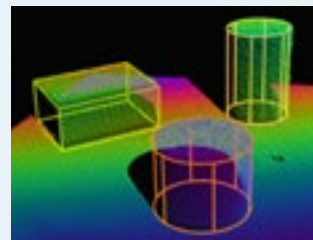
- From glass materials to custom fabrication: special fibers
- Custom laser systems for space, telecommunication, sensing, security, and quantum application
- Application labs with novel laser sources for EUV, MIR, and THz wavelength region

#### Head of department

Dr. Thomas Schreiber

#### Scientific research groups

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



### Imaging and Sensing

#### Research focus

- 3D measurement methods
- Development of high-speed, real-time, in-line, self-calibrating, and handheld systems for 3D measurement
- Imaging systems and their miniaturization

#### Head of department

Dr. Peter Kühmstedt

#### Scientific research groups

- **Image Processing and AI**  
Dr. Peter Kühmstedt  
Group leader
- **3D Sensing**  
Dr. Stefan Heist  
Group leader



### Optical and Mechanical System Design

#### Research focus

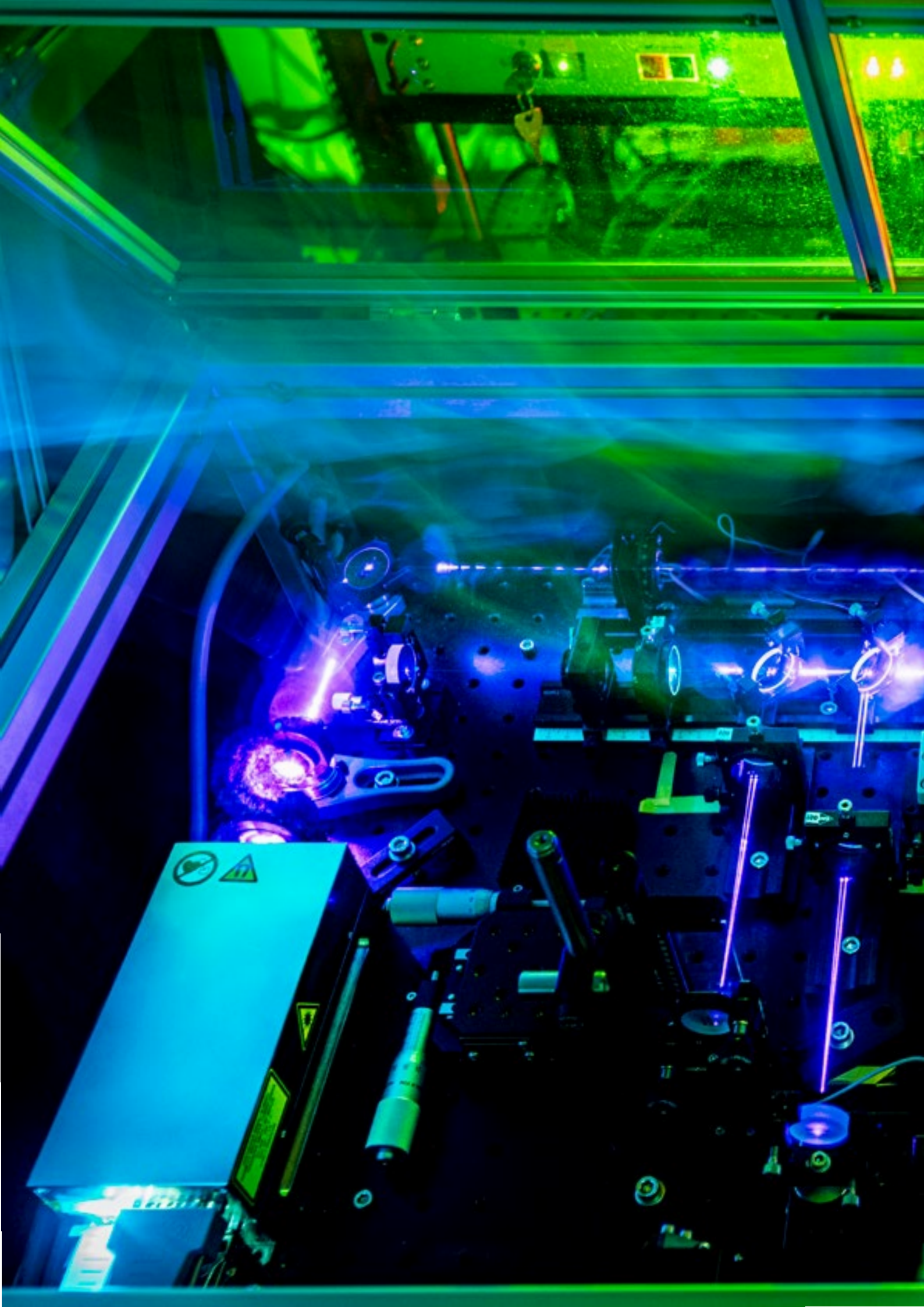
- Optical design
- Mechanical design
- System design
- Simulation and analysis
- Optimization

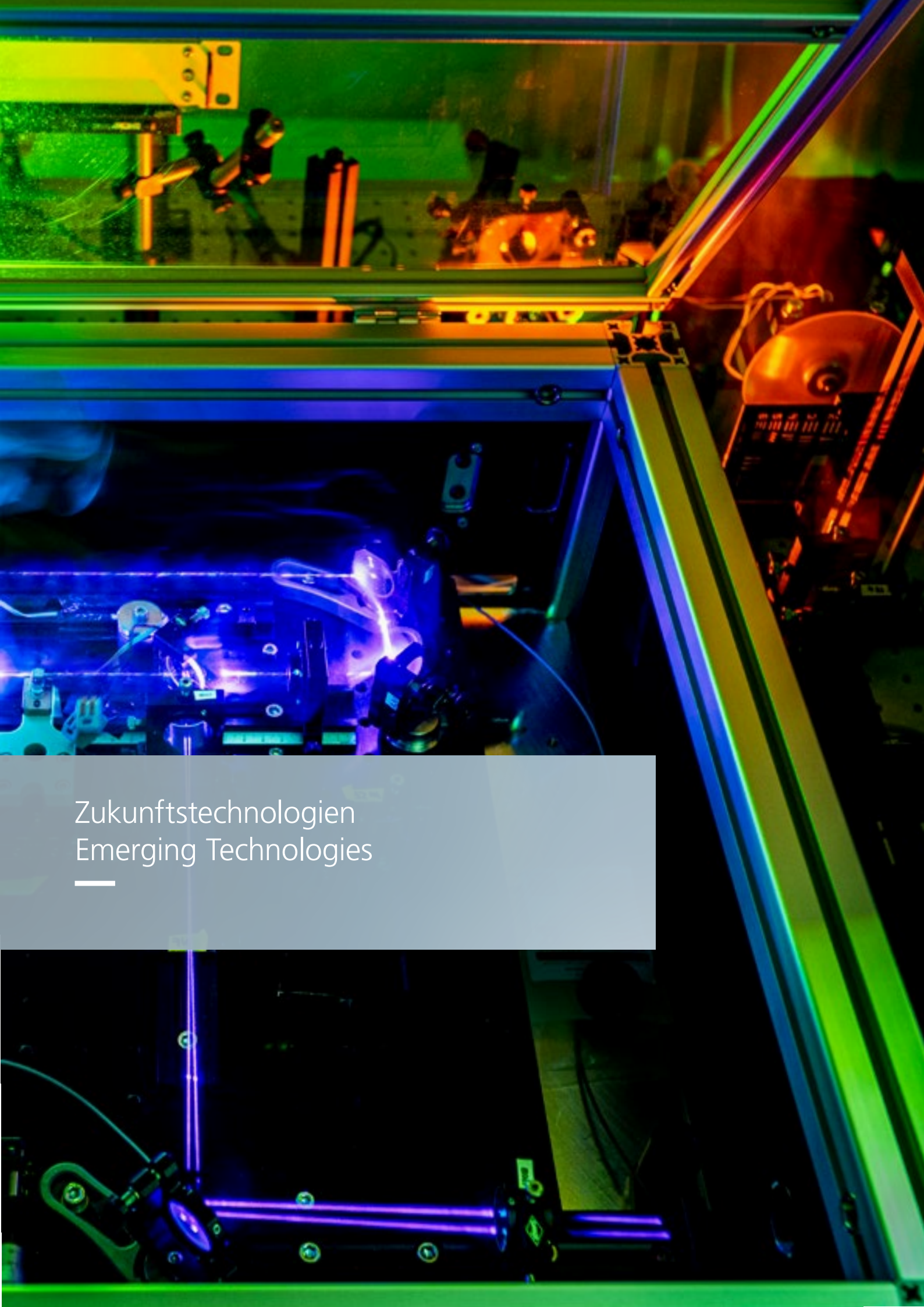
#### Head of department

Dr. Robert Brüning

#### Scientific research groups

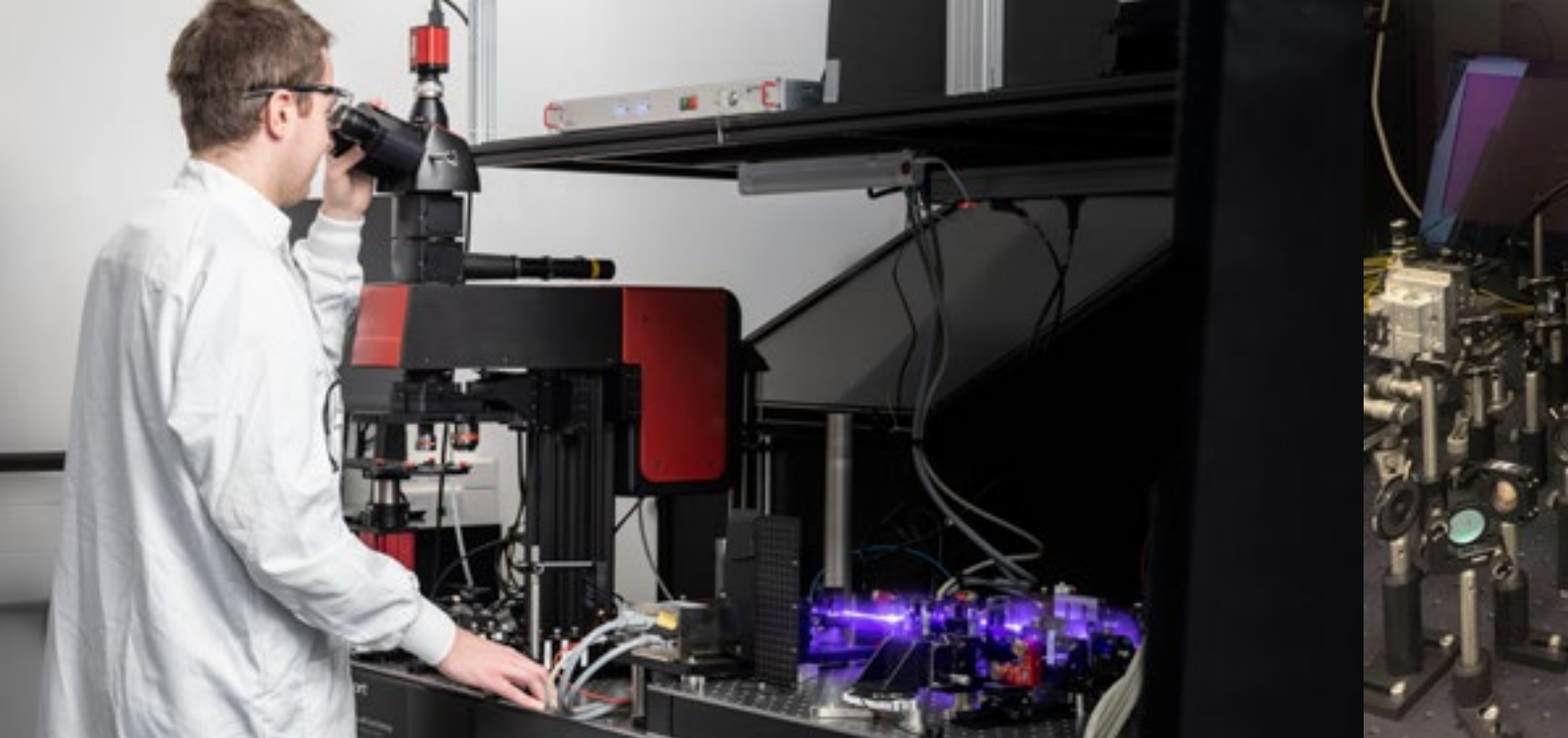
- **Advanced Optical Design**  
Dr. Christian Vetter  
Group leader
- **Micro-Optical Systems**  
Dr. Norbert Danz  
Group leader
- **Opto-Mechanical Design**  
Dr. Thomas Peschel  
Group leader





Zukunftstechnologien  
Emerging Technologies

---



[1] Laboraufbau Rasterquantenmikroskopie. /  
Laboratory setup scanning quantum microscopy.

## Rasterquantenmikroskopie / Scanning quantum microscopy

Quantenkorrelationen sind in quantenmechanischen Systemen allgegenwärtig und haben Physikerinnen und Physiker seit der Formulierung des Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxons und der Bell-Ungleichungen sowohl verwirrt als auch fasziniert. Sie werden in einer Reihe neuer Anwendungen genutzt, unter anderem für die Quantenbildgebung, bei der ein geringeres Bildrauschen erwartet wird. In unserer Arbeit nutzen wir Quantenkorrelationen von Nahinfrarot-Photonenpaaren, die durch spontane parametrische Konversion (SPDC) in einem Lithiumniobat-Wellenleiter erzeugt werden, um Quantenmikroskopie durchzuführen. SPDC wird durch nichtlineare Materialien zweiter Ordnung vermittelt und ermöglicht es, ein Photon in ein Photonenpaar umzuwandeln, das zeitliche, Frequenz-, Impuls- und räumliche Korrelationen aufweist.

Unser Mikroskopieansatz ist in Abbildung 2 konzeptionell dargestellt: Ein Photon wird direkt zur Detektion gesendet und zeigt die Präsenz des zweiten Photons an. Dieses wird in ein Rastermikroskop eingekoppelt, das mit zwei schnellen galvanischen Spiegeln arbeitet. Von diesen wird das Photon über die Probenoberfläche gescannt, zurückreflektiert und danach detektiert. Zeitliche Korrelationen werden mit einem Zeit-zu-Digital-Wandler rekonstruiert, der auch ein Zeilen-scan-Triggersignal vom Mikroskop erhält, um die gemessenen Korrelationen räumlichen Pixeln zuzuordnen und schließlich ein Bild der Probe zu rekonstruieren. Mit unserem Ansatz konnten wir biologische Proben wie Zwiebelzellen (Abb. 3)

Quantum correlations are ubiquitously present in quantum mechanical systems, and have both puzzled and intrigued physicists since the formulation of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox and the Bell inequalities. Nowadays, researchers are trying to exploit them in a number of emerging quantum technologies, for example, quantum imaging, in which increased signal-to-noise ratios are expected due to the statistics of non-classical light. In our work, we exploit quantum correlations of near-infrared photon pairs generated through spontaneous parametric down-conversion (SPDC) in a lithium niobate waveguide to perform quantum microscopy. SPDC, mediated by second-order nonlinear materials, allows one photon to decay into a pair of photons exhibiting time, frequency, momentum, and spatial correlations.

Our quantum microscope is conceptualized in figure 2: one photon, the signal, is directly sent to detection and heralds the detection of the second photon, the idler. The idler photon is injected into a scanning microscope, operating with two fast galvo-galvo mirrors, is scanned across the sample surface, and then reflected and sent to detection. Temporal correlations are evaluated with a time-to-digital converter, which also receives a line-scan triggering signal from the microscope to assign correlation counts to spatial pixels and finally reconstruct an image of the sample. With our approach, we were able to investigate biological samples such as onion cells (Fig. 3) at an infrared wavelength of 1,670 nm. This spectral region is beyond the sensitive region



### Authors

Valerio Flavio Gili  
Thomas Pertsch  
Frank Setzpfandt

### Contact

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

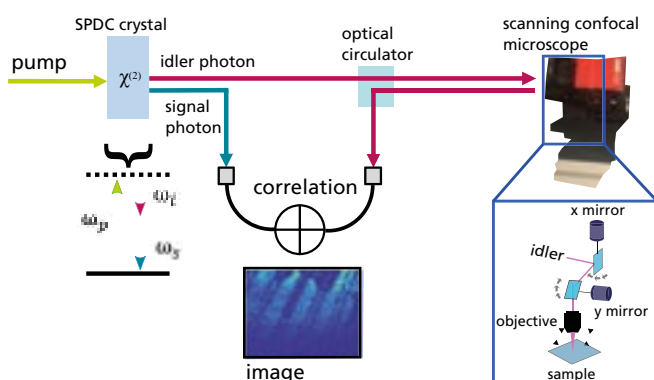
bei einer Infrarotwellenlänge von 1670 nm untersuchen. Dieser Spektralbereich liegt außerhalb des empfindlichen Bereichs von InGaAs-Infrarotkameras, und seine Untersuchung wurde durch die Nutzung supraleitender Nanodraht-Einzelphotonendetektoren ermöglicht. Unsere Systemauflösung ist fundamental durch das Beugungslimit begrenzt und nicht an den Korrelationsgrad des nichtlinearen Kristalls gebunden, wodurch Quantenweitfeldbildgebung oftmals limitiert ist. Unsere Ergebnisse stellen einen ersten Schritt in Richtung komplexerer Quantenmikroskopieverfahren wie Hyperspektral- und 3D-Bildgebung dar.

Schließlich kann die jüngste Entwicklung von Nanodraht-Detektoren, die bei Wellenlängen von bis zu 10  $\mu\text{m}$  arbeiten, möglicherweise zu einer Ausweitung der Quantenbildgebung und -sensorik auf die molekulare Fingerabdruckregion führen.

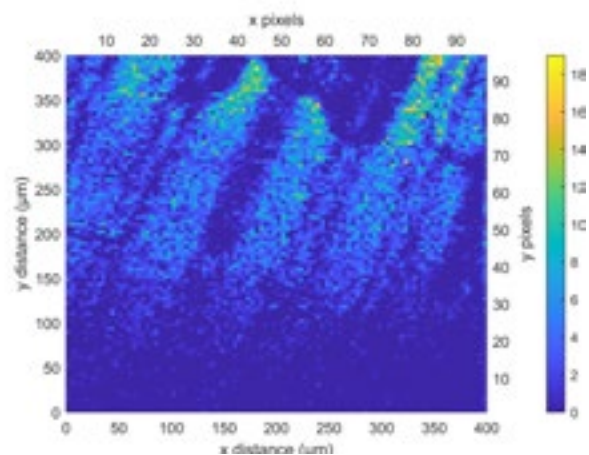
of InGaAs infrared cameras, and its investigation has been unlocked by the development of superconducting nanowire single-photon detectors. Importantly, the spatial resolution of our quantum microscope is limited only by diffraction, rather than by the SPDC source as in wide-field quantum imaging. Our results represent a first step towards more complex quantum-enhanced microscopy schemes such as hyperspectral and 3D imaging. Finally, the very recent development of nanowire detectors working at wavelengths up to 10  $\mu\text{m}$  can lead potentially to the extension of quantum imaging and sensing application toward the molecular fingerprint region.

### References / Literatur

/1/ V. F. Gili et al.: Appl. Phys. Lett. 121, 104002 (2022).



[2] Schema unseres Systems zur Rasterquantenmikroskopie. / Schematics of our system for scanning quantum microscopy.



[3] Quantenbild von Zwiebelepithelzellen. / Quantum image of onion epithelial cells.





[1] Visualisierung des Kleinsatelliten CubEnik. /  
Visualization of the small satellite CubEnik.

## CubEnik – Satellitengestützte Quantenschlüsselverteilung CubEnik – Satellite based quantum key distribution

Das Fraunhofer IOF ist Teil des CubEnik-Konsortiums und maßgeblich an der Entwicklung eines Kleinsatelliten für die Quantenschlüsselverteilung (QKD) beteiligt. In diesem Vorhaben soll die Quantenschlüsselverteilung in einer Dual-Downlink-Konfiguration demonstriert werden. Eine Quelle verschränkter Photonen EPS auf dem Satelliten erzeugt verschränkte Photonenpaare, die getrennt, aber durch die »spukhafte Fernwirkung« verbunden, ihren Weg zu den optischen Bodenstationen antreten. Wie viele dieser Photonenpaare die Bodenstationen erreichen und zur Quantenschlüsselverteilung beitragen, wird in Linkbudgetbetrachtungen analysiert und ist ausschlaggebend für die technische Umsetzung aller Systemkomponenten. Die Verringerung der Verluste und Optimierung der erzeugten Schlüsselrate ist ein Hauptantrieb der Entwicklungsarbeit im Projekt CubEnik. Erfolgreiche QKD erfordert verlässliche Infrastruktur. Satellitennetzwerke können diese Anforderung erfüllen. Aber auch für niedrige Orbits (LEO) werden Verluste im Bereich von 30 dB erwartet, wenn der Satellit im Zenit steht.

Sinnvoll nutzbar ist satellitengestützte QKD aber erst dann, wenn sie auch kostengünstig umsetzbar ist. Ziel von CubEnik ist deshalb, die erforderlichen Komponenten in einem CubeSat der Größe 12 U (20x20x34 cm<sup>3</sup>) zu integrieren. Für dieses modulare Standardformat für Kleinsatelliten sind viele Systemkomponenten bereits jetzt kommerziell erhältlich.

Fraunhofer IOF is part of the CubEnik consortium and is involved significantly in the development of a small satellite for quantum key distribution (QKD) which will demonstrate QKD in a dual downlink configuration. An entangled photon source (EPS) on the satellite generates entangled photons that start their journey to the optical ground stations (OGS) separately but are connected by "spooky action at a distance". How many of these photon pairs reach the ground stations and contribute to the QKD is analyzed in detailed link budget considerations and is crucial for the technical implementation of all system components. Reducing losses and maximizing the generated key rate is the main driver of the development work in the CubEnik project.

Successful QKD requires reliable infrastructure. Satellite networks can fulfill this requirement. However, even for low orbits (LEO), losses in the range of 30 dB are expected when the satellite is in its zenith.

However, satellite-based QKD can only be used meaningfully if it can also be implemented cost-effectively. The aim of CubEnik is therefore to integrate the necessary components in a CubeSat of size 12 U (20x20x34 cm<sup>3</sup>). Many system components are already commercially available for this modular standard format for small satellites. However, high demands are placed on the payload - especially on the optical and



#### Authors

Daniel Heinig

#### Contact

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

An die Nutzlast werden allerdings hohe Anforderungen gestellt – insbesondere an das optische System und das Pointing Tracking. Zudem muss eine Einzelphotonenquelle auf dem Satelliten ohne die Möglichkeit des direkten Eingriffs arbeiten. Sämtliche Komponenten sind beim Start extremen Belastungen ausgesetzt.

Die komplexe Systemstruktur («System of Systems») erfordert ein erfahrenes Konsortium. Zwei Spin-offs des Fraunhofer IOF (Quantum Optics Jena, SPACEOPTIX) unterstützen im Bereich QKD und Teleskopoptik. Das Zentrum für Telematik in Würzburg (ZfT) stellt Erfahrung und Equipment für Demonstrator-Tests zur Verfügung. Die Digos GmbH kann auf Erfahrungen mit Laser Ranging und das Betreiben von Bodenstationen verweisen.

Fraunhofer IOF leitet die Zusammenarbeit und das Systems Engineering und bringt außerdem Kompetenzen in Tracking, Regelungstechnik und QKD, Optikmontage, Elektronikintegration und Software sowie optomechanischem Design ein. Zudem stellt das IOF voraussichtlich eine der beiden Bodenstationen. Die zweite wird voraussichtlich vom DLR IKN in Oberpfaffenhofen gestellt. Damit wird eine Distanz von etwa 300 km überbrückt. Ziel ist, innerhalb eines Überfluges einen sicheren Schlüssel von 256 Bit Länge mit dem BBM92-Protokoll zu erzeugen. Diese Schlüssellänge kann als Masterkey in High-Security-Modulen der Finanzindustrie dienen oder in einer VPN-Verbindung zwischen zwei Behörden bis zu 80 GB Daten absichern.

Wie ein Spruch aus einem Glückskeks treffend sagte: »Soon you will be on top of the world«. Mit gemeinsamen Kräften machen wir diese Prophezeiung für das gesamte Institut und seine Partner wahr.

pointing setup, and tracking systems. In addition, the EPS must operate on the satellite without the possibility of direct intervention. All components are exposed to extreme loads during launch.

The complex system structure ("system of systems") requires an experienced consortium. Two Fraunhofer IOF spin-offs (Quantum Optics Jena, SPACEOPTIX) provide support in the field of QKD and telescope optics. The Centre for Telematics in Würzburg (ZfT) provides experience and equipment for demonstrator tests. Digos GmbH has experience with laser ranging, ground stations, and ground station operators.

Fraunhofer IOF is leading the collaboration and systems engineering while also contributing expertise in tracking, control system engineering, QKD, optics assembly, electronics integration, software, and optomechanical design. In addition, Fraunhofer IOF is expected to provide one of the two ground stations. The second is expected to be provided by DLR IKN in Oberpfaffenhofen. This will bridge a distance of approximately 300 km. The goal is to generate a secure key with a length of 256 bits using the BBM92 protocol within one overflight. This key length can serve as a master key in high-security modules in the financial industry or secure up to 80 GB of data in a VPN connection between two authorities.

As a fortune cookie said on New Year's Eve: "Soon you will be on top of the world." By joining forces, we will make this wish come true for this institute and its partners.



*Illustration eines Freistrahlnetzes für die Verteilung verschränkter Photonen. /  
Illustration of a metropolitan free-space quantum network.*

## Hin zu einsetzbaren Freistrah-Quantennetzwerken in Metropolenregionen / Towards practical metropolitan free-space quantum networks

In den letzten Jahren wurden zahlreiche revolutionäre Anwendungen von Quantennetzwerken identifiziert und kürzlich eine Roadmap für ein vollwertiges Quanteninternet vorgeschlagen /1/. An der Spitze dieser rasanten Entwicklung steht die Quantenschlüsselverteilung (QKD), worunter man die Erzeugung und Verteilung von geheimen, kryptographischen Quantenschlüsseln zwischen zwei oder mehr Endnutzern versteht. Die Sicherheit der Quantenschlüssel basiert auf den Gesetzen der Quantenmechanik. Während die satellitengestützte Technologie interstädtische und interkontinentale Verbindungen ermöglicht, eignen sich optische Fasern insbesondere für großstädtische Maßstäbe. Allerdings ist eine geeignete Faser-Infrastruktur nicht überall verfügbar. Eine Alternative stellen terrestrische Freistrah-Links dar, welche jedoch ihre eigenen Herausforderungen mit sich bringen, wie z. B. eine nicht triviale Ausrichtung des Links, atmosphärische Turbulenzen und Tageslicht-Rauschen.

Eine verschränkungs-basierte Architektur, bei welcher eine verschränkte Photonenquelle als Server agiert, welcher verschränkte Photonen in das Netzwerk einspeist, bietet einzigartige Vorteile. Der Verschränkungs-server muss nicht vertrauenswürdig sein, da die Sicherheit der Verbindung direkt durch Messung der Verschränkungsqualität überprüft werden kann. Des Weiteren ermöglichen verschränkungs-basierte Ansätze auf natürliche Weise die Skalierung zu

Over the past years, many revolutionizing applications of quantum networks have been identified, and a roadmap toward full-blown quantum internet has been recently proposed /1/. At the forefront of this rapid development lies quantum key distribution (QKD) which deals with the generation and distribution of secret cryptographic keys between two or more users, the security of which is based on the laws of quantum mechanics. While satellite technology promises to connect users over intercity and intercontinental distances, optical fibers offer a natural platform for metropolitan scales. However, suitable fiber infrastructure is not always available. A possible alternative is terrestrial free-space links, but these come with their own set of challenges, such as non-trivial link alignment, atmospheric turbulence, and daylight noise.

An entanglement-based architecture, where an entangled photon source acts as a server that streams entangled photons into the network, offers several unique advantages. The entanglement server does not need to be trusted, since the security can be directly verified by measuring the quality of entanglement at the end-users. Entanglement-based schemes also naturally allow for fully connected networks via multiplexing, where each pair of users in the network share a unique pair of output channels from the entangled photon source.



### Authors

Andrej Krzic  
Karin Burger  
Fabian Steinlechner

### Contact

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

vollständig vermaschten Netzen ohne vertrauenswürdige Netzwerkknoten zu benötigen. Dies wird durch sogenanntes Multiplexing erreicht, wobei jedes Nutzerpaar im Netzwerk ein eindeutiges Paar an Ausgangskanälen der verschränkten Photonenquelle miteinander teilt.

Am Fraunhofer IOF wurden die wichtigsten Bausteine für eine solche Architektur entwickelt: eine portable verschränkte Photonenpaarquelle mit hoher Verschränkungsgüte, effiziente und einsatzbereite Freistrah-Terminals, kompakte Quantenzustandsanalyse- und Detektionsmodule und ein spezielles Rauschfiltermodul, welches den Betrieb bei Tageslicht ermöglicht. Mit diesen Bausteinen wurde ein 1,7 km langer Freistrah-Link zwischen dem Fraunhofer IOF und den Stadtwerken Jena aufgebaut. Hier konnten wir erfolgreich geheime Schlüsseln mit Kilobit-Raten in der Nacht und am Tag zeigen /2/ – ein neuer Maßstab für QKD in realen Freistrahlinks.

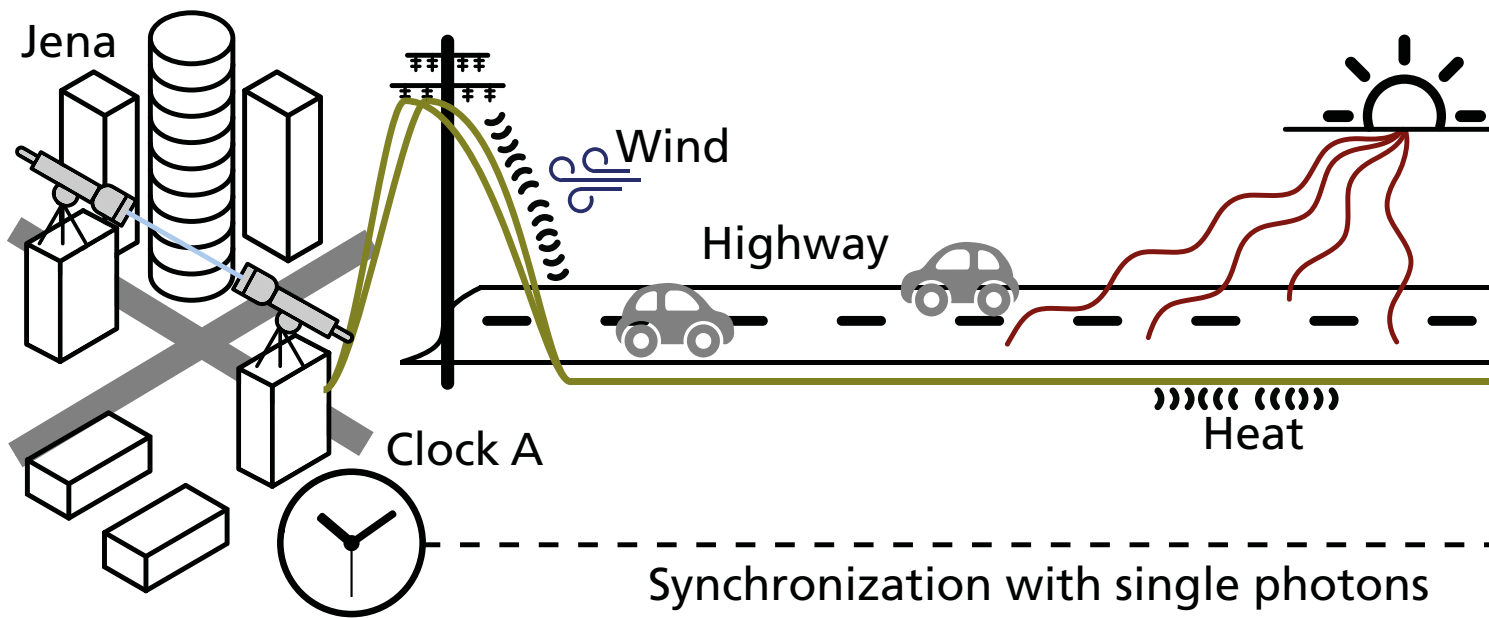
Diese Arbeiten sind Teil der QuNET Initiative, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Ziel, die Entwicklung der kritischen Quantenkommunikationstechnologie und -infrastruktur für Deutschland und Europa voranzutreiben.

At Fraunhofer IOF, we developed the main building blocks of such an architecture, including a portable entangled photon pair source with high quantum state fidelity, efficient and deployable free-space terminals, compact quantum state analysis and detection modules, and a dedicated noise filtering module that enables operation in daylight. Using the system as a whole, we established a 1.7 km free-space link between Fraunhofer IOF and Stadtwerke Jena and demonstrated the ability to generate kilobits of secret key per second during night and day /2/. These results set new standards for field-deployable free-space QKD systems.

These efforts are part of project QuNET, the large initiative funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), which aims to push the development of critical quantum communication technology and infrastructure for Germany and Europe.

### References / Literatur

- /1/ S. Wehner et al.: Quantum internet: A vision for the road ahead, *Science* 362, 6412 (2018).
- /2/ A. Kržič et al.: Metropolitan free-space quantum networks, arXiv:2205.12862v1 (2022).



[1] Synchronisierung von Uhren mit einzelnen Photonen in verschiedenen Anwendungsszenarien. Wir zeigen eine robuste Synchronisation für Langstrecken-Faserlinks oder turbulente Freistrahlkommunikation. / Synchronization of clocks with single photons in different application scenarios. We show robust synchronization for long-distance fiber or turbulent free-space links.

## Synchronisation von Uhren mit einzelnen Lichtteilchen

### Clock synchronization with single photons

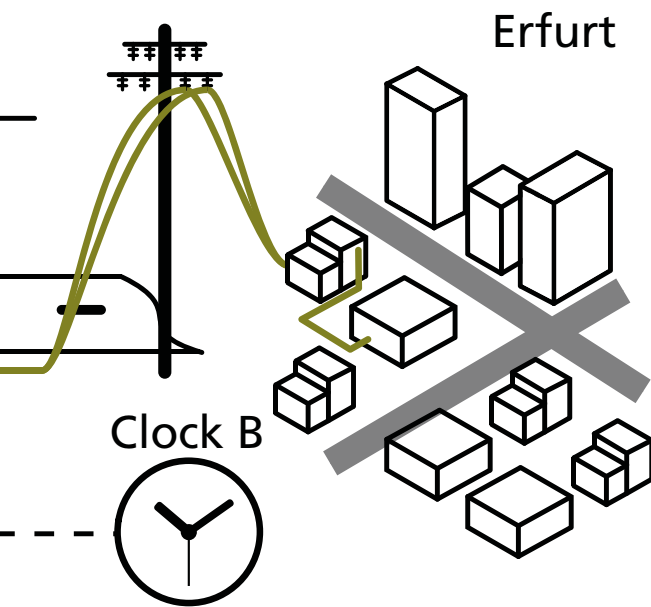
Die Synchronisierung von entfernten Uhren ist eine Schlüsselfunktion in Kommunikationsnetzen. Zu diesem Zweck wird für die Synchronisierung von Computern in Kommunikationsnetzen häufig das Network Time Protocol verwendet, das eine typische Stabilität in der Größenordnung von  $10^{-7}$  aufweist. Mit Hilfe optischer Zeitübertragungstechnologien, insbesondere optischer Frequenzkämme, kann diese Stabilität auf eine Größenordnung von  $10^{-19}$  verbessert werden. Derartige Stabilitätsniveaus sind für neu entstehende optische Quantenkommunikationsnetze von entscheidender Bedeutung und erfordern über lange Zeit zusätzliche externe Hardware wie Rubidium-Uhren, Synchronisationslaser oder das globale Satellitennavigationssystem.

Neuere Ansätze nutzen die Zeitinformation der einzelnen Photonen selbst zur Synchronisation, ohne zusätzliche Hardware oder spezielle Synchronisations-Muster im Quantenkommunikationskanal [1,2]. Die Ankunftszeitinformation jedes einzelnen Photons ermöglicht die Synchronisation. Im Rahmen der QuNET-Initiative haben wir effiziente Algorithmen entwickelt, die mit der Information der Ankunftszeit einzelner Photonen eine noch nie dagewesene Synchronisationsqualität erzielen. Hierbei konnten wir, mit einfachen Quarzuhren als lokale Zeitreferenz – die eine um mehrere Größenordnungen schlechtere Qualität aufweisen als atomare Referenzen aus der Literatur [3] – bemerkenswerte Zeitstabilitäten von 186 (238) ps bei einer Integrationszeit von 30 (100) Sekunden erzielen. Dies kommt den Werten mit

The synchronization of remote clocks is a key function in communication networks. To this end, the network time protocol is widely used for the synchronization of computers in communication networks, with typical stability of the order of  $10^{-7}$ . This can be further enhanced to the order of  $10^{-19}$  using optical timing transfer technologies, in particular optical frequency combs. Such levels of stability are crucial in emerging quantum optical communication networks and require external additional hardware, such as rubidium clocks, synchronization lasers, or the global navigation satellite system for a long time.

Recent approaches use the single-photon timing information itself for synchronization without adding hardware or dedicated synchronization strings in the quantum communication channel [1,2]. The arrival-time information of every single photon provides a reference signal for synchronization. In the context of the BMBF-funded QuNET initiative, we have developed efficient postprocessing algorithms that show unprecedented synchronization performance.

In particular, we show how remarkable timing stabilities of 186 (238) ps in a 30 (100)-second integration time can be achieved while using only simple quartz oscillators as a local time reference. Notably, these have several orders of magnitude worse stability than atomic references from the literature [3]. Remarkably, these results are close to



#### Authors

Christopher Spiess  
Fabian Steinlechner

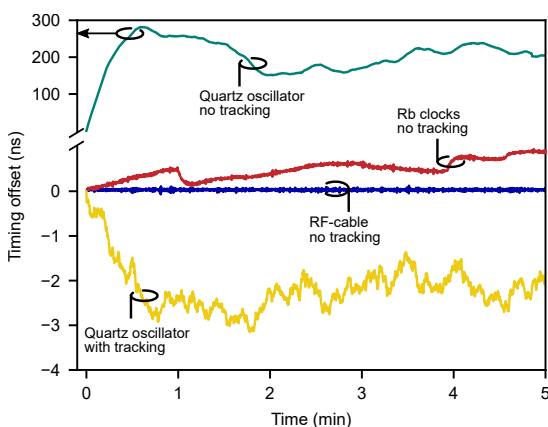
#### Contact

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

ultrastabilen Uhren nahe, die Zeitstabilitäten von 38,1 (88) ps bei einer Integrationszeit von 30 (100) Sekunden aufweisen /4,5/. Solche Methoden zur softwarebasierten Synchronisierung im Postprocessing können problemlos in moderne Quantenschlüsselverteilungssysteme implementiert werden. Sie lässt sich leicht in Kanäle mit stark variierenden (oder geringen) Link-Transmissionen integrieren, z. B. in der Freistrahl-/Satellitenkommunikation oder in Langstrecken-Glasfaserkanälen. Auf der Hardwareseite werden gut etablierte Rubidium-Uhren oder GPS-Referenzen überflüssig. Dies ebnet den Weg zu Quantennetzen mit verbesserter Synchronisationsleistung sowie zu völlig neuen Anwendungen, wie der sicheren Zeitübertragung.

the performance with ultra-stable clocks that show timing stabilities of 38.1 (88) ps in a 30 (100)-second integration time /4,5/.

This method for software-based synchronization in postprocessing can be implemented straightforwardly in state-of-the-art quantum key distribution (QKD) systems. It is easy to integrate on channels with strongly varying (or low) link transmissions, e.g., free-space/satellite communication or long-distance fiber channels. On the hardware side, well-established rubidium clocks or GPS references become redundant. It paves the way towards quantum networks with improved synchronization performance, as well as entirely new applications such as secure time transfer.



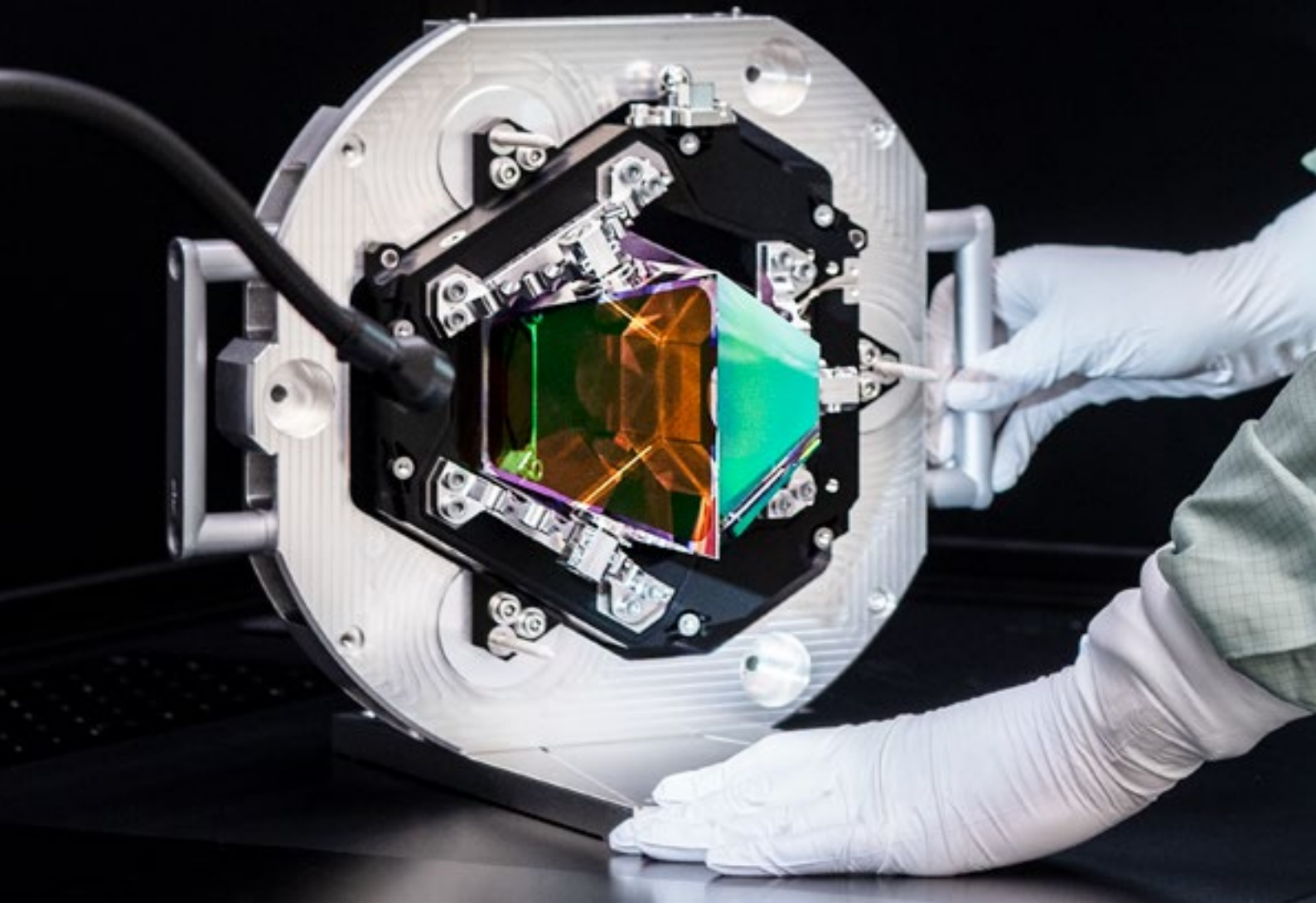
#### References / Literatur

- /1/ C. Wang et al.: Optics express, 29 (19), 29595–29603 (2021).
- /2/ E. Fitzke: PRX Quantum 3, 020341 (2022).
- /3/ C. Spiess et al.: arXiv:2108.13466, (2021).
- /4/ R. Quan: Optics express 30 (7), 10269–10279 (2022).
- /5/ J. Lee: Optics Express 30(11), 18530 (2022).

[2] Die Variation des Zeitversatzes ist ein Indikator für die Stabilität des Systems. Die Synchronisationsleistung erhöht sich drastisch durch die Anwendung von Frequenzverfolgungsalgorithmen zwischen den zu synchronisierenden Uhren. Wir können Stabilitäten erreichen, die denen hochstabiler Rubidium-Oszillatoren (Rb) nahe kommen. | The variation of the timing offset is indicator of the stability of the system. The performance increases drastically by applying frequency-tracking algorithms between the clocks to be synchronized. We can reach stabilities close to highly stable rubidium oscillators (Rb).

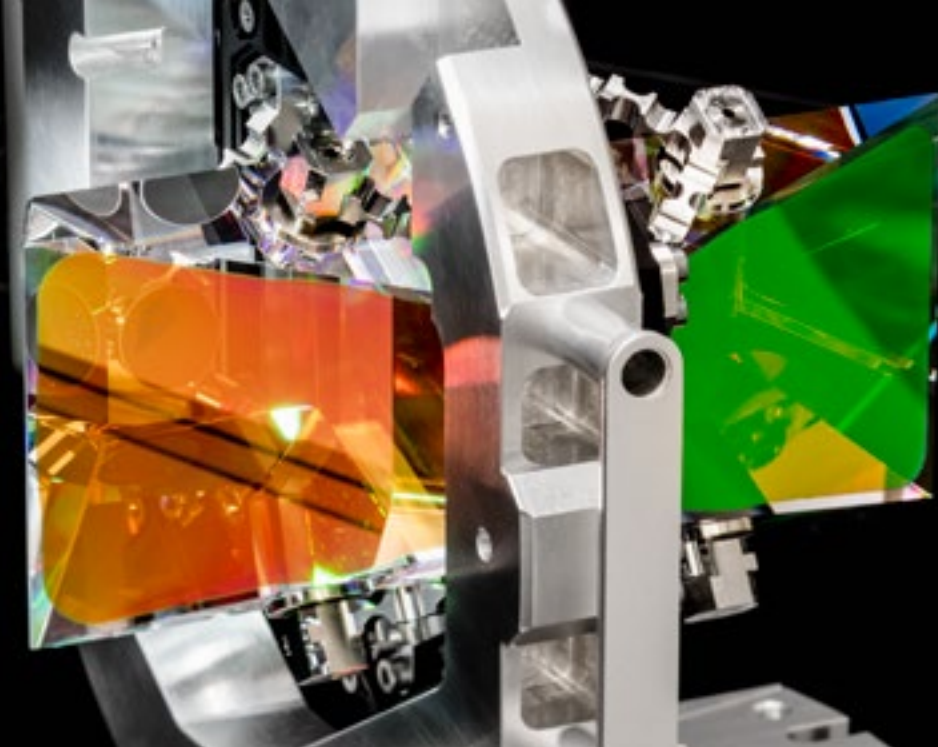
Mikro- und nanostrukturierte Optik  
Micro- and Nanostructured Optics

---









[1] Für den Einsatz im Weltraum qualifiziert: die optische Komponente (PG+P Disperser) für die Spektrometer des CO2M-Projekts. / Qualified for use in space: the optical component (PG+P Disperser) for the spectrometers of the CO2M project.

## CO2M im Kampf gegen den Klimawandel CO2M fights against climate change

Auf der Pariser Klimakonferenz 2015 wurde das Ziel ausgegeben, den globalen Temperaturanstieg durch den Treibhauseffekt zu verlangsamen und auf 1,5 Grad zu begrenzen, um die weltweiten Folgen des Klimawandels abzumildern. Für die Umsetzung der Klimaziele ist die Messung der verursachenden Treibhausgase ein wichtiger Baustein, um die Emissionen an den richtigen Stellen zu erfassen und den Erfolg von eingeleiteten Maßnahmen nachweisen zu können.

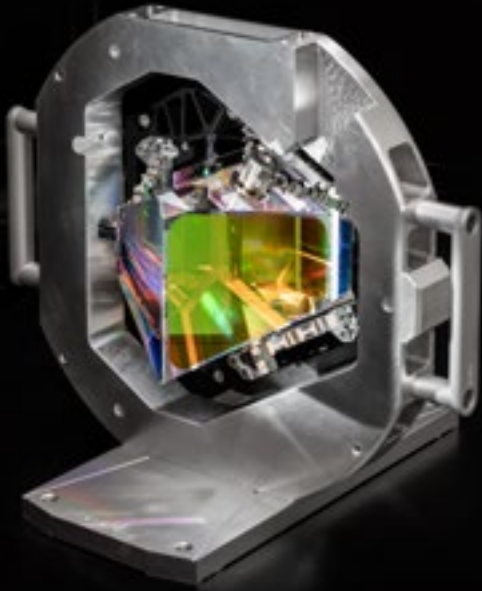
Das Fraunhofer IOF leistet im CO2M-Projekt einen wichtigen Beitrag zur Bewältigung dieser globalen Herausforderung. CO2M ist eine von sechs Copernicus Sentinel Expansion Missionen, die die ESA im Auftrag der EU entwickelt. Es werden zwei Erdbeobachtungs-Satelliten zur Messung von Treibhausgasen, vor allem CO<sub>2</sub>, aufgebaut.

Das Fraunhofer IOF entwickelt in Zusammenarbeit mit Payload Prime Thales Alenia Space und System Prime OHB die äußerst ambitionierten optischen Komponenten (sogenannte PG+P Disperser) für drei Kanäle des Spektrometers, den NIR-, SWIR1- und SWIR2-Spektralbereich. Die PG+P Baugruppen bestehen jeweils aus zwei Prismen und einem Gitter, welche im Direktbond-Verfahren verbunden sind. Die nanostrukturierten Gitter haben eine besonders hohe Effizienz von mehr als 90 % und einen geringen Polarisationsgrad von weniger als 10 %. Dies wird durch ein spezielles, am Fraunhofer IOF entwickeltes Gitterdesign erreicht, bei dem die Gittergräben mit einem hochbrechenden Material gefüllt werden. Die

At the Paris climate conference in 2015, the goal was set to slow down the global temperature increase caused by the greenhouse effect and to limit it to 1.5 degrees to mitigate the global consequences of climate change. For the implementation of the climate goals, the measurement of the greenhouse gases that cause them is an important component to record the emissions at the right points and to be able to prove the success of the measures taken.

In the CO2M project, Fraunhofer IOF is making an important contribution to overcoming this global challenge. CO2M is one of six Copernicus Sentinel Expansion Missions that ESA is developing on behalf of the EU. Two earth observation satellites will be set up to measure greenhouse gases, especially CO<sub>2</sub>.

In cooperation with Payload Prime Thales Alenia Space and System Prime OHB, Fraunhofer IOF is developing the extremely ambitious optical components ("PG+P disperser") for three channels of the spectrometer, the NIR, SWIR1, and SWIR2 spectral range. The PG+P assemblies each consist of two prisms and a grating, which are connected using the direct bonding process. The nanostructured gratings have a particularly high efficiency of more than 90 % and a low degree of polarization of less than 10 %. This is achieved by a special grating design developed at Fraunhofer IOF, in which the grating grooves are filled with a high-index material. The optical components are isostatically attached to a titanium interface plate and additively manufactured lightweight



### Authors

Thomas Höing  
Julia Kästner  
Martin Heusinger  
Peter Munzert  
Pascal Birckigt  
Andreas Kamm  
Falk Kemper

### Contact

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

optischen Komponenten sind isostatisch an einer Interfaceplatte aus Titan befestigt und additiv gefertigte Leichtbau-Gehäuse aus einer Aluminium-Legierung schirmen auftretendes Streulicht ab. Verschiedene Antireflex- und absorbierende Beschichtungen, sowie eine mit einem Laser aufgeraute lichtstreuende Fläche dienen ebenfalls der Minimierung von Streulicht, um das Signal-Rausch-Verhältnis des Spektrometers zu optimieren.

Bis auf die Rohprismen werden alle optischen und mechanischen Komponenten am IOF gefertigt und in ISO 5 Reinräumen assembliert. Die Optiken werden durch die Expertise und Innovationen von fünf Fachabteilungen und einem mehr als 50-köpfigen Team, das bereits seit über zwei Jahren an dem extrem ambitionierten und herausfordernden Projekt arbeitet, ermöglicht.

In der vorgelagerten Entwicklungs- und Qualifizierungsphase wurden in den vergangenen zwei Jahren bereits die gesamte Prozesskette, alle Einzelkomponenten, sowie derzeit noch laufend die Baugruppe selbst nach ECSS Norm für den Einsatz im Weltraum qualifiziert. Insgesamt werden in den kommenden Monaten neun PG+P Baugruppen als Flughardware aufgebaut, für zunächst zwei Satelliten, die voraussichtlich schon 2026 starten werden.

housings made of aluminum alloy shield stray light. Various anti-reflective and absorbing coatings, as well as a laser-roughened light-diffusing surface also serve to minimize stray light to optimize the spectrometer's signal-to-noise ratio.

Except for the raw prisms, all optical and mechanical components are manufactured at Fraunhofer IOF and assembled in ISO 5 clean rooms. The optics are made possible by the expertise and innovations of five specialized departments and a team of more than 50 people who have been working on the extremely ambitious and challenging project for over two years.

In the preceding development and qualification phase, the entire process chain, all individual components, and the assembly itself, which is still ongoing, have already been qualified for use in space according to the ECSS standard over the past two years. A total of nine PG+P assemblies will be set up as flight hardware in the coming months, initially for two satellites that are expected to be launched as early as 2026.

### Disclaimer / Haftungsausschluss

„Views and opinion expressed are however those of the author(s) only and the European Commission and/or ESA cannot be held responsible for use which may be made of the information contained therein.“



PROGRAMME OF THE  
EUROPEAN UNION



co-funded with





[1] Künstlerische Darstellung der Erzeugung der zweiten Harmonischen in einer Exposed Core Faser mit einer dreieckigen TMD-Kristall. Als „hero image“ in Nature Photonics November 2022 genutzt. / Artists impression of second harmonic generation in an Exposed Core fiber coated with a triangular TMD-crystal. Used as “hero image” in Nature Photonics November 2022 Issue.

## Zweite Harmonische in optischen Fasern mit 2D-Materialien

### Second harmonic from optical fibers coated with 2D-materials

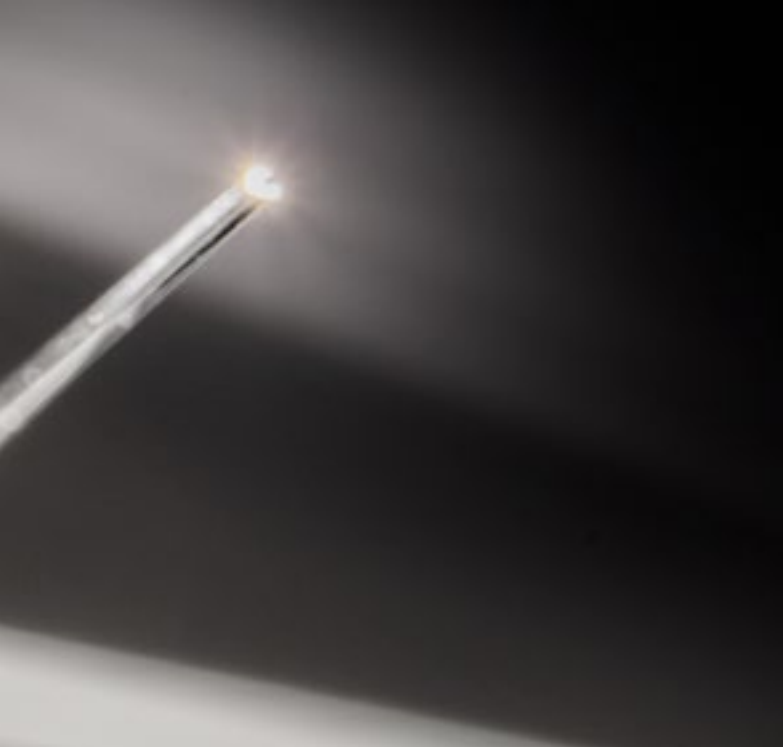
Optische Fasern sind wohl die vielseitigste Plattform für nichtlineare integrierte Photonik, mit nahezu unbegrenzten Wechselwirkungslängen und der Fähigkeit, die Dispersion anwendungsspezifisch anzupassen. Sie sind jedoch streng an Nichtlinearitäten dritter Ordnung gebunden, da sie aus amorphen Materialien bestehen. Daher können sie keine zweite Harmonische erzeugen und nicht für faserbasierte OPOs verwendet werden oder Photonen basierend auf spontaner parametrischer Abwärtskonversion verschränken.

In [1], haben wir gezeigt, dass wir optische Fasern mit nichtlinearen Atomlagenmaterialien funktionalisieren können, um diese Einschränkung zu überwinden. Bei den Atomlagenmaterialien handelt es sich um halbleitende Übergangsmetall-dichalkogenide (TMDs), die eine sehr starke Nichtlinearität zweiter Ordnung aufweisen, wenn sie als Monolagen, also als zweidimensionale Kristalle mit monoatomarer Dicke, eingesetzt werden. TMDs, von denen wir  $\text{MoS}_2$  und  $\text{WS}_2$  verwenden, sind sogenannte van-der-Waals-Materialien, die nur schwach mit ihrem Substrat wechselwirken und daher als Einkristalle auf fast jedem Substrat, einschließlich auf nicht-planaren, amorphen Fasern oder Silizium-Wellenleitern, gezüchtet werden können. Der Wachstumsprozess basiert auf einer skalierbaren chemischen Gasphasenabscheidungs-methode, die an der Friedrich-Schiller-Universität entwickelt wurde.

Optical fibers are one of the most versatile platforms for non-linear integrated photonics because of their long interaction lengths and the ability to tailor dispersion to the requirements of applications. However, they are strictly bound to third-order nonlinearities, because they are made from amorphous materials. Hence, they cannot create a second harmonic, nor can they be used for fiber-based OPOs or entangled photon sources.

In [1], we have shown that we can functionalize optical fibers with atom-scale nonlinear materials to overcome this limitation. The functionalizing media in question are semiconducting transition-metal dichalcogenides (TMDs), which have a very strong second-order nonlinearity if they are used as monolayers, i.e., as two-dimensional crystals with a thickness of less than one nanometer.

TMDs, of which we use  $\text{MoS}_2$  and  $\text{WS}_2$ , are van-der-Waals-Materials, which interact only weakly with their substrate and hence can be grown as monocrystals on almost any substrate, including non-planar, amorphous fibers and integrated silicon waveguides. The growth process is based on a scalable chemical-vapor-deposition method, developed at the Friedrich Schiller University. The fibers themselves are microstructured exposed-core fibers, i.e., they have a guided mode at the surface with a substantial evanescent field that



[2] Foto einer Sammlung von Exposed Core Fasern in einem SHG-Experiment. / Image of an assortment of Exposed Core fibers in an SHG experiment.

#### Authors

Quyét Ngo  
Antony George  
Markus Schmidt  
Heike Heidepriem-Ebendorff  
Falk Eilenberger

#### Contact

Dr. Falk Eilenberger  
Phone: +49 3641 807-403  
uwe.zeitner@iof.fraunhofer.de

Die Fasern selbst sind mikrostrukturierte Fasern mit freiliegendem Kern, d. h. sie haben eine geführte Mode an der Oberfläche mit einem evaneszenten Feld, das mit den TMD-Monoschichtkristallen interagiert. Sie wurden in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien und der University of Adelaide entwickelt.

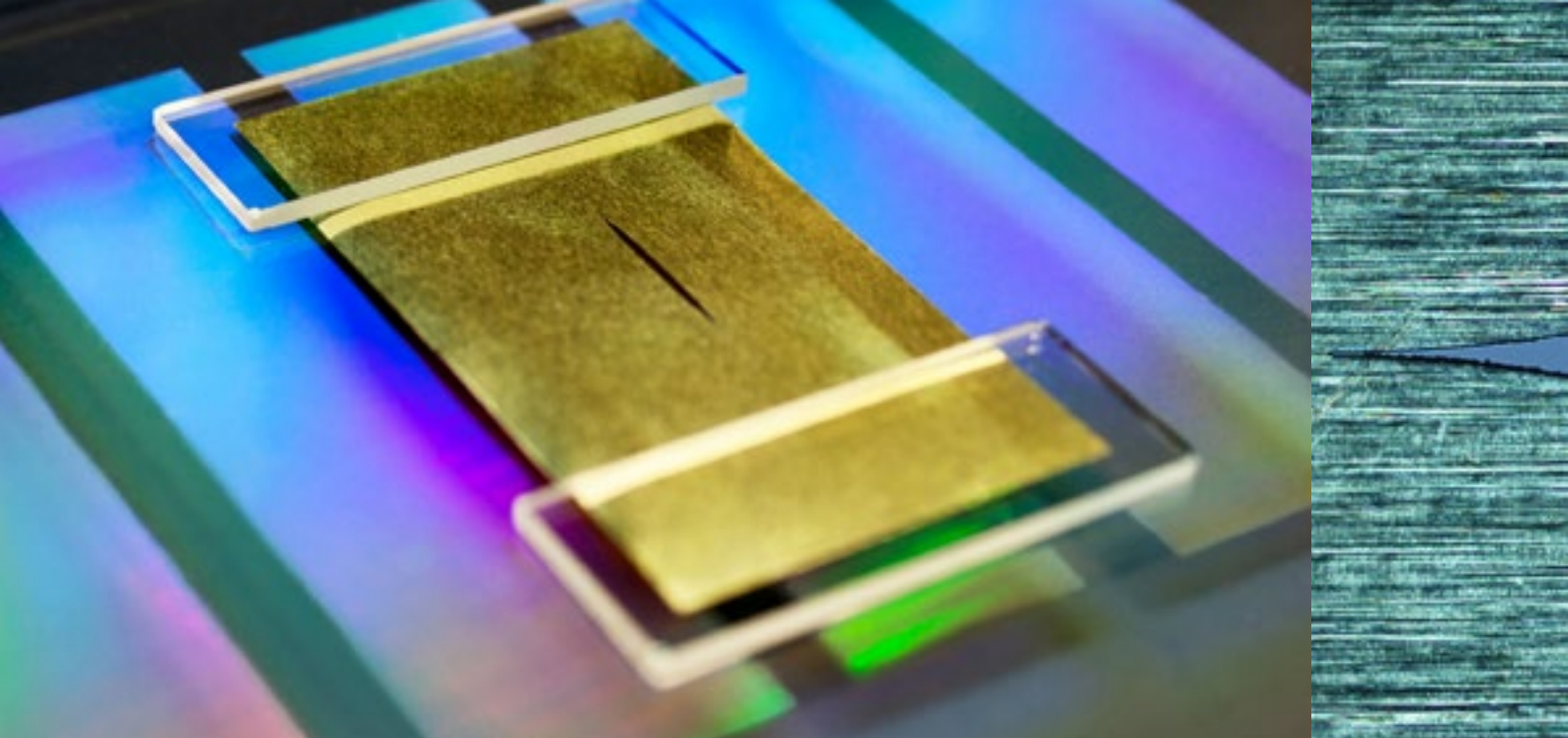
Wir haben gezeigt, dass wir mit den TMDs in geführten Wellenexperimenten interagieren können und haben Anwendungsfälle in der Exzitonphysik, Gassensorik und nichtlinearen Optik demonstriert. Dazu gehörte die Demonstration einer faserintegrierten Lichtquelle für die zweite Harmonische. In diesem Proof-of-Principle-Experiment konnten wir zeigen, dass TMD-funktionalisierte Fasern als Plattform für integrierte nichtlineare Optiken eingesetzt werden können. Nach einer gründlichen Analyse der nichtlinearen Dynamik kommen wir zu dem Schluss, dass faserbasierte Elemente mit  $\text{LiNbO}_3$ -Wellenleiter konkurrieren können, obgleich noch eine Reihe technischer Problemen zu lösen sind.

can interact with the TMD monolayer crystals. They have been developed in a collaboration with the Leibniz Institute of Photonics Technologies and the University of Adelaide.

We have shown that we can interact with the TMDs of the functionalized fibers in guided wave experiments, demonstrating exciton physics, gas sensing, and nonlinear optics. The arguably most successful demonstration has been a fiber-integrated light source for second harmonic light. In this proof of principle experiment, we have demonstrated TMD-functionalized fibers used as a platform for integrated nonlinear optics. After a thorough analysis of the nonlinear dynamics, we find that this system may lead to fiber-based nonlinear elements with interaction efficiencies that rival that of  $\text{LiNbO}_3$ -waveguide if technical issues with the fibers and the growth of 2D materials can be addressed.

#### References / Literatur

- /1/ G. Q. Ngo et al.: In-fibre second-harmonic generation with embedded two-dimensional materials, Nature Photonics 16.11, 769-776 (2022).



[1] Auf Phasenmaske platzierte Blende für Aperturformung. /  
Shaping aperture placed on phase mask.

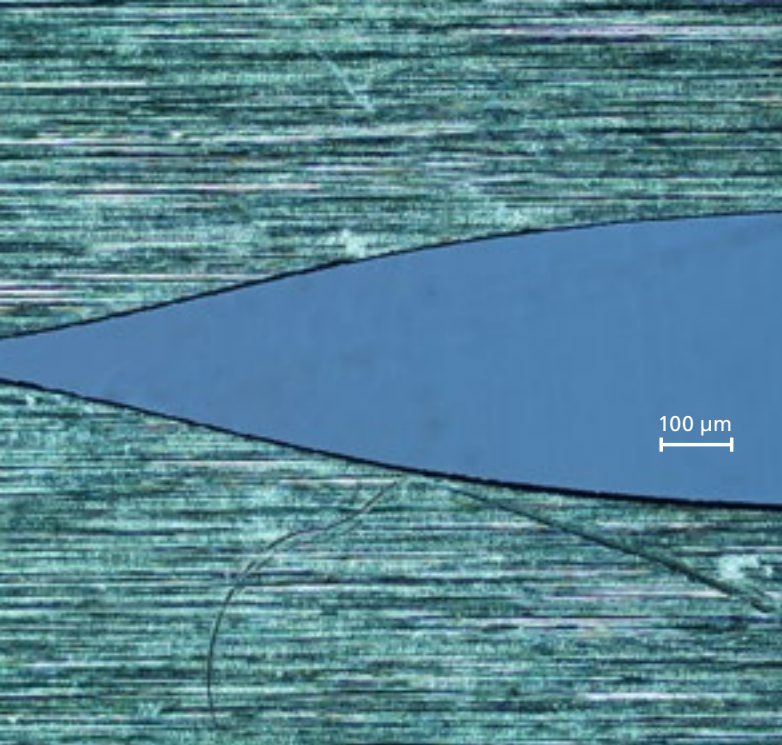
## Apodisierte Faser-Bragg-Gitter durch Aperturformung Apodized fiber bragg gratings by aperture shaping

Faser-Bragg-Gitter (FBG) sind unverzichtbare integriert-optische Komponenten für Anwendungen in der Sensorik, in Faserlasern und in der Signalverarbeitung, u. a. im Bereich der Quantenkommunikation. FBG bestehen aus einer periodischen Modulation der Brechzahl im Faserkern, die als faserintegrierter schmalbandiger Reflektor wirkt. Für alle Anwendungsbereiche ist die Form der spektralen Resonanz entscheidend. Diese wird durch die sogenannte Apodisation bestimmt, das Profil der Gitterstärke über die Länge des FBG.

Die Nutzung ultrakurzer Laserpulse erlaubt uns, definierte Brechzahlmodifikationen in unterschiedlichen Fasern durch Multiphotonabsorptionsprozesse zu erzeugen. Die Periodizität des FBG wird dabei mit Hilfe der Phasenmaskentechnik realisiert: die Phasenmaske, ein Beugungsgitter, erzeugt ein homogenes Interferenzmuster. Dieses wird mittels einer Zylinderlinse, die den Einschreibestrahle entlang der Faserachse fokussiert, in den Faserkern eingepreßt. Apodisation, also das Profil der Gitterstärke über die Länge des FBG, wird herkömmlicherweise durch eine Variation des Brechzahlprofils entlang der Faser eingestellt. Aufgrund des Gauß-förmigen Intensitätsprofils des Einschreibestrahls ist automatisch eine gewisse Apodisation der erzeugten FBG vorgegeben. Um dieses Profil anzupassen, kann die Faser entlang ihrer Achse mit verschiedenen Geschwindigkeiten oder auch Pulsenergien während des Einschreibeprozesses abgescannt werden. Hierbei ist jedoch die Variation durch das eigentliche Strahlprofil und -größe des Einschreibelasers limitiert. Alternativ kann die

Fiber Bragg gratings (FBGs) are vital components for integrated optics in sensing, fiber lasers, and signal processing, e. g., for applications in quantum communications. FBGs consist of a periodic modulation of the refractive index in the fiber core, which acts as a fiber-integrated narrowband reflector. For all application areas, the shape of the spectral response is essential. This is determined by the apodization, which is the profile of the grating strength over the length of the FBG.

We generate the refractive index modifications in the fiber core by multiphoton absorption of ultrashort laser pulses, which allows us to inscribe FBGs in different fibers. The so-called phase mask technique ensures the periodicity of the FBGs: the phase mask, a diffraction grating, produces a homogeneous interference pattern. This is imprinted into the fiber core by a cylindrical lens that focuses the inscription beam along the fiber axis. Apodization is commonly adjusted by varying the refractive index profile along the fiber. Due to the Gaussian intensity profile of the inscription beam, a certain apodization of the generated FBG is automatically predetermined. To adjust this profile, the fiber can be scanned along its axis with different velocities or even pulse energies during the inscription process. Here, however, the variation is limited by the actual beam profile and size of the inscription laser. Alternatively, apodization can be adjusted by varying the overlap of the refractive index modification with the fiber core. This is realized in the writing process by aperture shaping: a customized aperture limits the overlap of the inscription



[2] Mikroskopaufnahme der aperturformenden Blende. /  
Microscope image of shaping aperture.

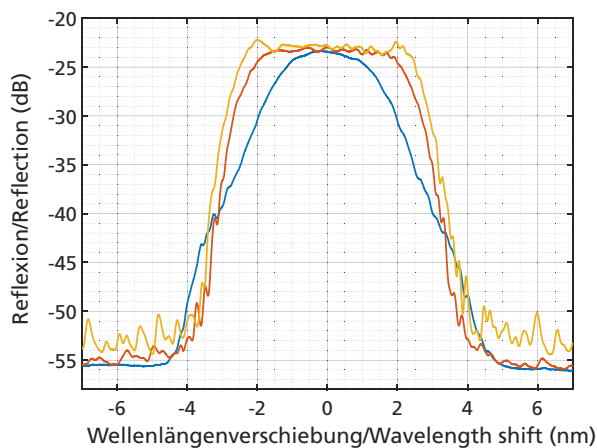
#### Authors

Ria G. Krämer  
Tobias Ullsperger  
Daniel Richter  
Stefan Nolte

#### Contact

Prof. Dr. Stefan Nolte  
Phone: +49 3641 807-403  
stefan.nolte@iof.fraunhofer.de

Apodisation durch Variation des Überlapps der Brechzahlmodifikation mit dem Faserkern angepasst werden. Dies wird im Schreibprozess durch Aperturformung realisiert: Hierbei begrenzt eine speziell angefertigte Blende den Überlapp des Einschreibestrahls mit dem Faserkern, sodass ein über die Faserlänge variierender Querschnitt der Brechzahlmodifikation mit hoher Reproduzierbarkeit entsteht. Diese Blenden werden aus 25  $\mu\text{m}$  dicker Messingfolie passgenau mittels Ultrakurzpulslaser ausgeschnitten (Abb. 2), und dann auf der Phasenmaske aufgelegt (Abb. 1). In Abbildung 3 sind exemplarisch Reflexionsspektren gezeigt, bei denen mittels Aperturformung verschiedene spektrale Reflektionsprofile hinsichtlich Form und Bandbreite realisiert wurden. Die Öffnung der Blende kann der jeweiligen Anforderung der Anwendung angepasst werden: von Rechteckprofilen, über (Super-) Gauß-Profilen hin zu z. B. extrem kurzen FBG von weniger als 100  $\mu\text{m}$  Länge.

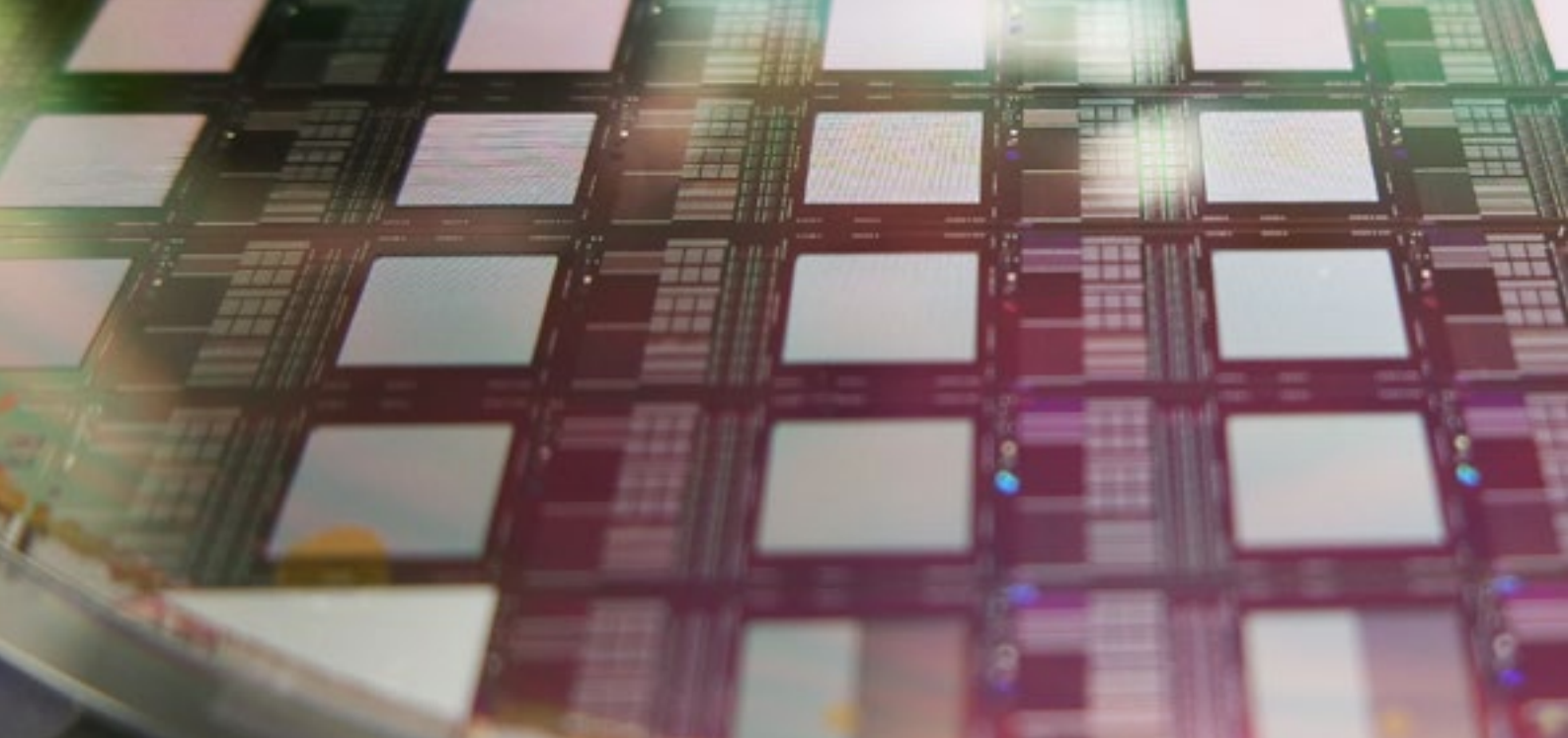


[3] Reflexionsspektrum aperturgeformter FBG.  
Reflection spectrum for aperture shaped FBG.

beam with the fiber core so that a varying cross-section of the refractive index modification along the fiber is created with high reproducibility. These apertures are cut out precisely from 25  $\mu\text{m}$  thick brass foil using an ultrashort pulse laser (Figure /2/) and then placed on the phase mask (Figure /1/). Figure /3/ shows exemplary reflection spectra in which different spectral reflection profiles concerning the shape and bandwidth were realized using aperture shaping. The shape of the aperture can be adapted to the respective requirements of the application: from rectangular profiles to (super) Gaussian profiles to, e.g., extremely short FBGs of less than 100  $\mu\text{m}$  in length.

#### References / Literatur

- /1/ R. G. Krämer, et al.: Tailored Apodization of Femtosecond Written Fiber Bragg Gratings by Aperture Shaping, in Optica Advanced Photonics Congress 2022, Technical Digest Series (Optica Publishing Group), paper BTu1A.5 (2022).



[1] Im Wafermaßstab selektiv-abgeformte Mikrolinsen-Anordnungen auf SPAD-Sensoren. /  
Shaping aperture placed on phase mask.

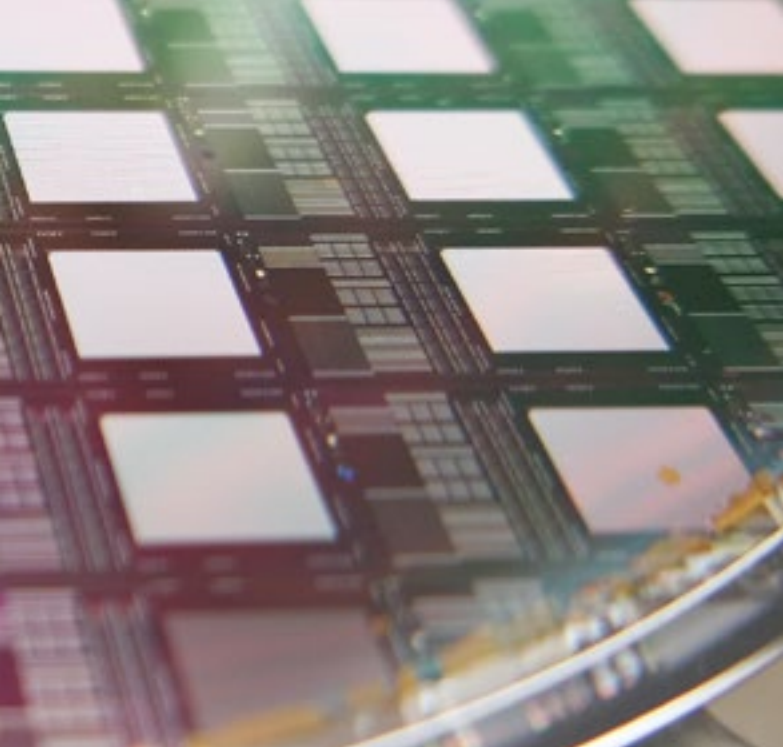
## Hochempfindliche SPAD-Array Sensoren mit Freiform-Mikrooptik / Highly sensitive SPAD arrays using freeform microoptics

SPAD-basierte Sensorik [1] besitzt hohes Potential bei der Detektion sehr geringer Strahlungsintensitäten bis hin zu einzelnen Photonen und kann in der CMOS-Technologie kostengünstig entwickelt werden. Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Zeitauflösung des Detektors, wie LiDAR [2], Quantenbildgebung und Spektroskopie, erfordern dabei eine komplexe Ausleseschaltung, die die Ankunftszeit einzelner Photonen bis in den Pikosekunden-Bereich genau bestimmen muss. Dies limitiert den fotosensitiven Flächenanteil des Sensors und damit dessen Empfindlichkeit. Durch den Einsatz von Mikrolinsen auf der Sensoroberfläche können Photonen auf die fotosensitiven Bereiche gelenkt werden, die anderenfalls neben den SPADs undetektiert auftreffen würden. So kann eine enorme Verbesserung der Empfindlichkeit des Detektors erzielt werden, ohne dass auf Funktionen oder Performance der Ausleseschaltung verzichtet werden muss oder die systemseitigen optischen Eigenschaften beeinflusst werden.

Im Fraunhofer IOF wurde hierzu ein Replikationsverfahren entwickelt, das es ermöglicht hochqualitative Mikrolinsen direkt auf die Wafer im Anschluss an die CMOS-Prozesse aufzubringen und die Kompatibilität zu nachfolgenden Verfahren wie Vereinzelung und elektrische Kontaktierung zu wahren (Abb. 1). Hierzu wurden speziell an das CMOS-Waferlayout ( $\varnothing$  200 mm, 8") angepasste Abformwerkzeuge

SPAD-based sensors [1] excel in the detection of extremely low radiation intensity down to single photons and can be realized by cost-effective CMOS technology. Applications with high demands on the temporal resolution of detectors, such as LiDAR [2], quantum imaging, or spectroscopy, require complex read-out electronics to identify photon arrival times down to the picosecond domain. The high degree of complexity of these circuits was dramatically limiting the sensor's photoactive area and consequently its sensitivity. Introducing lenslets onto the sensor surface, light can be deflected to photosensitive regions that otherwise would get lost hitting light-insensitive areas next to the SPADs. Thus, a tremendous improvement in sensitivity can be achieved while maintaining the functionality and the performance of the read-out circuitry and the sensor characteristics as part of the design of the optical system.

A replication technique has been developed at Fraunhofer IOF that allows molding high-quality microlenses directly onto the wafer substrate after the CMOS process chain while preserving compatibility to subsequent steps like die separation (dicing) or bonding (Fig. 1). For this, specific molding tools considering the SPAD-sensor wafer layout ( $\varnothing$  200 mm, 8") have been developed, that enable the selective exposure of UV-curable highly transparent polymer forming the microlens structure. Contrary, unexposed and thus uncured liquid polymer can be rinsed free of residues at the bonding and dicing areas.



### Authors

Robert Leitel  
Peter Dannberg  
Manuel Ligges<sup>1</sup>

### Contact

Dr. Robert Leitel  
(IOF, molding of microoptics)  
Phone: +49 3641 807-375  
robert.leitel@iof.fraunhofer.de

Dr. Manuel Ligges  
(IMS, SPAD array sensors),  
Phone: +49 203 3783-261  
manuel.ligges@ims.fraunhofer.de

<sup>1</sup> Fraunhofer IMS

geschaffen, die eine selektive Aushärtung des UV-härtbaren hochtransparenten Polymers für die Mikrolinsen ermöglichen. Im Bereich der Kontaktierungsflächen und Sägebahnen wird unausgehärtetes Material dagegen rückstandslos abgespült. Zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS wurde im Rahmen eines Eigenforschungsprojekts (SME) ein SPAD-basierter Sensor für ein LiDAR-System entwickelt, dessen Empfindlichkeit durch den Einsatz von an die primäre Abbildungsoptik angepasste Mikrolinsen um den Faktor 7 gesteigert werden konnte. Für die Berücksichtigung der spezifischen Anordnung der photosensitiven Flächen der SPAD-Sensor Pixel wurden Mikroformen mit einem Füllfaktor von 100 % (Abb. 2) designt und mit direkt-schreibender Grauton-Fotolithographie ebenfalls im Wafermaßstab erzeugt.

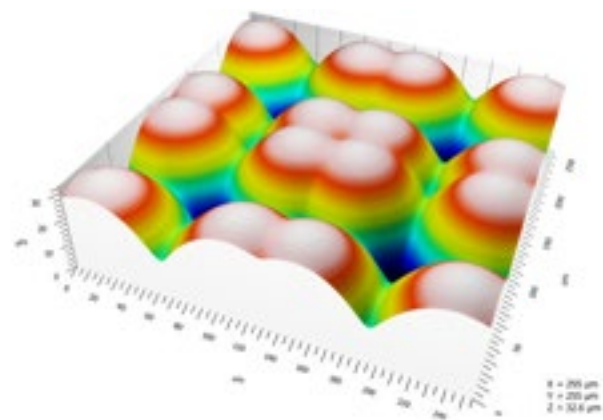
Neben der Steigerung des Füllfaktors lichtempfindlicher Flächen von Sensoren ist das entwickelte Replikationsverfahren ebenso für die Applikation von strahlformenden Mikrolinsen auf im Wafermaßstab hergestellten Lichtquellen wie VCSEL/3/-Arrays oder Mikro-LED-Anordnungen einsetzbar.

### Glossar / Glossary

- /1/ SPAD: Single-Photon Avalanche Diode
- /2/ LiDAR: Light Detection and Ranging
- /3/ VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

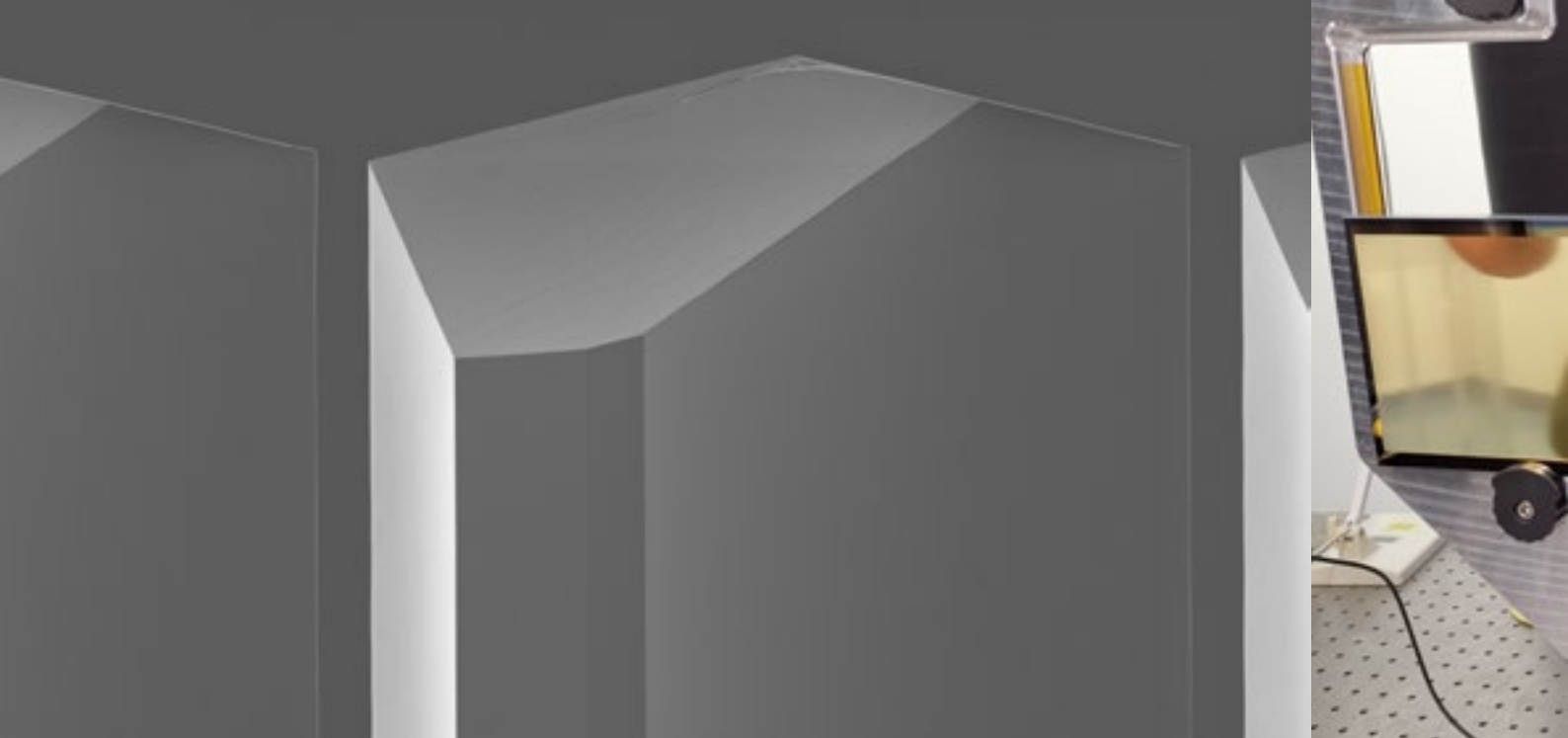
In collaboration with the Fraunhofer Institute for Microelectronic Circuits and Systems IMS, SPAD-based sensors have been developed for an automotive LiDAR system, whose sensitivity has been increased by a factor of 7 due to the implementation of tailored microlens arrays. Moreover, considering the specific arrangement of the photosensitive areas of the SPAD-sensor pixels, micro-freeform elements with a filling factor of almost 100 % have been designed (Fig. 2). The wafer-level mastering of the high-precision surface microstructures has been realized by direct-writing grayscale photolithography.

In addition to the increase in the filling factor of photosensitive areas of detectors, the selective molding process developed is suitable for beam-shaping lenslets onto light emitters such as VCSEL /3/ arrays or micro-LED arrangements, as well.



[2] Topographie einer an die Pixelgeometrie eines SPAD-Sensors angepassten Freiformoberfläche, hergestellt mit Grauton-Fotolithographie. / Topography of a freeform lens tailored to the specific pixel geometry of a SPAD sensor, realized by grayscale photolithography.





[1] Rasterelektronenmikroskopaufnahme der Gitterstruktur. / Scanning-electron-microscope image of the grating facet.

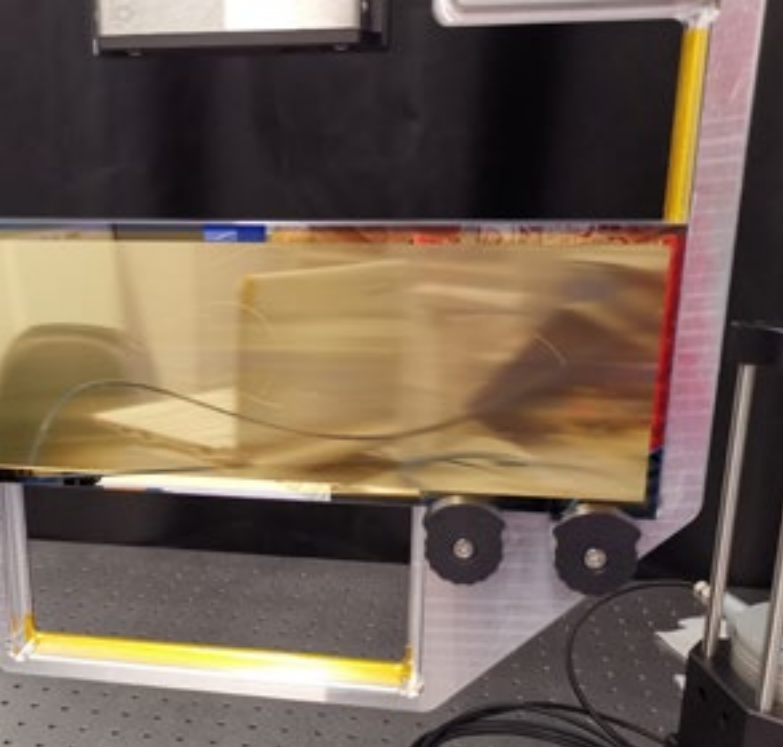
## Das Échelle-Gitter für den NIRPS Spektrograf The Échelle-grating for the NIRPS spectrograph

Das NIRPS-Instrument (Near Infra Red Planet Searcher) der Europäischen Südsternwarte (ESO) widmet sich der Suche und Charakterisierung von Exoplaneten mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode, die massearme Sterne vom M-Typ umkreisen. Ziel ist es insbesondere, erdähnliche Gesteinsplaneten in der habitablen Zone zu finden. Dafür wird die Veränderung der spektralen Rotverschiebung des Lichts dieser Sterne mit einem hochauflösenden Spektrographen im Wellenlängenbereich zwischen 970 - 1810 nm gemessen. Die wellenlängendispersive Kernkomponente des Spektrographen ist ein R4-Échelle-Gitter, das in einer hohen Beugungsordnung eingesetzt wird. Ursprünglich war das Instrument mit einem mechanisch geritzten und anschließend replizierten Gitter ausgestattet.

Das Fraunhofer IOF hat eine neue Technologie zur Herstellung von hochwertigen Échelle-Gittern entwickelt, die auf dem anisotropen Nassätzen von kristallinen Siliziumsubstraten basiert. In speziellen Ätzbädern werden die verschiedenen kristallographischen Ebenen mit deutlich unterschiedlichen Ätzgeschwindigkeiten abgetragen. Die Verwendung einer präzisen binären lithographisch strukturierten Ätzmaske ermöglicht die Herstellung von sägezahnförmigen Gitterlinien mit sehr glatten Oberflächen. Um die exakte Neigung der reflektierenden Gitterfacetten einzustellen, wird das Siliziumsubstrat unter einem definierten Winkel aus dem ein-kristallinen Rohmaterial herausgeschnitten. Für die Realisierung des neuen NIRPS-Gitters wurde die Ätzmaske mittels

The NIRPS-Instrument (Near Infra Red Planet Searcher) of the European Southern Observatory (ESO) is dedicated to the search and characterization of exo-planets orbiting low-mass M-type stars using the radial velocity method. Particularly, it aims to find earth-like rocky planets in the habitable zone. For that, it measures the variation of the spectral red-shift of these stars with a high-resolution spectrograph operating in the wavelength range between 97 and 1810 nm. The wavelength dispersive core component of the spectrograph is an R4-Échelle-grating used in a high diffraction order. Initially, the instrument was equipped with a mechanically ruled and replicated grating.

Fraunhofer IOF developed a new technology for the realization of high-quality Échelle-gratings based on anisotropic wet-etching of crystalline Silicon substrates. In specific etching baths, the different crystallographic planes are removed with substantially different etching speeds. Using a well-defined lithographically structured binary etching mask enables the preparation of triangularly shaped grating lines with very smooth surfaces. To adjust the actual tilt of the reflective grating facets, the silicon substrate was cut under a defined angle out of the single crystal raw material. For the realization of the novel NIRPS-grating the etching mask has been realized by electron beam lithography and the etching of the silicon substrate was done in a KOH solution. The resulting grating structure (Fig. 1) exhibits a high diffraction efficiency above 70 % across the whole spectral band and a low wave-front



[2] Foto des neu entwickelten NIRPS Échelle-Gitters. /  
Photograph of the novel full-size NIRPS Échelle-grating.

#### Authors

Susann Sadlowski  
Thomas Flügel-Paul  
Tino Benkenstein  
Peter Munzert  
Uwe Zeitner

#### Contact

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

Elektronenstrahlolithographie hergestellt und das Ätzen des Siliziumsubstrats erfolgte anschließend in einer KOH-Lösung. Die resultierende Gitterstruktur (Abb. 1) weist eine hohe Beugungseffizienz von über 70 % über das gesamte Spektralband auf und hat einen geringen Wellenfrontfehler von  $< 55$  nm RMS über die gesamte Apertur. Die gemessene PSF des Gitters in Littrow-Konfiguration ist der eines ebenen und unstrukturierten  $\lambda / 10$  Referenzspiegels nahezu identisch.

Das Verfahren ist seit langem aus der Herstellung von mikromechanischen Sensoren bekannt und wurde nun am Fraunhofer IOF auf die Realisierung von großflächigen Gittern übertragen. Das neue NIRPS-Gitter hat eine Größe von 284 mm x 78 mm (Abb. 2). Es wurde im Frühjahr 2022 ausgeliefert und im Sommer am 3,6-Meter-Teleskop der ESO in der Sternwarte La Silla installiert. Erste Messungen ergaben eine Verbesserung der erreichten Empfindlichkeit des NIRPS-Instruments um etwa einen Faktor 2 im Vergleich zu dem vorhergehenden geritzten und replizierten Gitter.

error of  $< 55$  nm RMS over the full aperture. The measured PSF of the grating in the Littrow configuration performs very close to those of a plane and unpatterned  $\lambda / 10$  reference mirror.

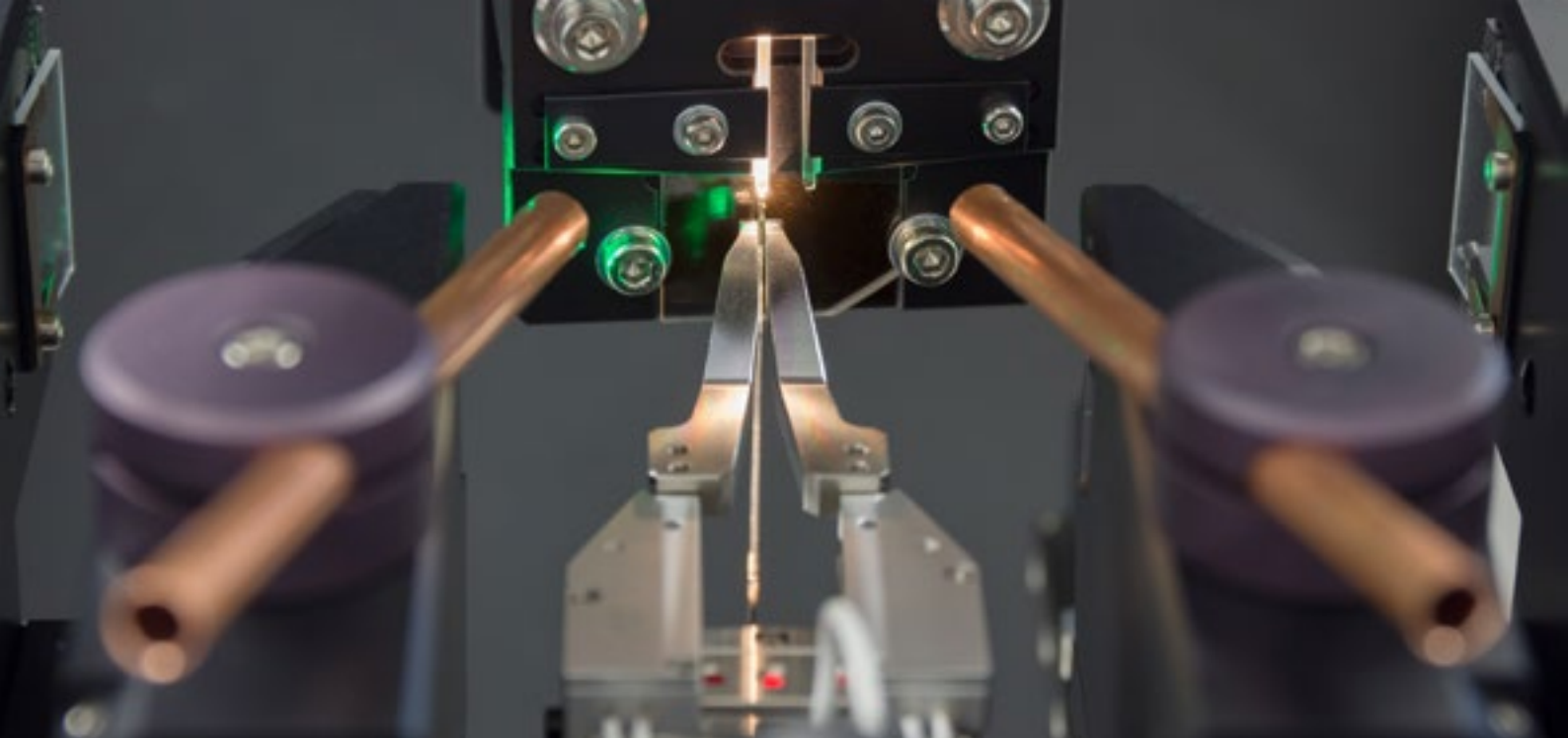
The process is long known from the fabrication of micro-mechanical sensor devices and is now being applied by the Fraunhofer IOF to the realization of large-area gratings. The new NIRPS grating has a size of 284 mm x 78 mm (Fig. 2). It was shipped in spring 2022 and has been installed in summer at the 3.6-meter ESO telescope at the La Silla Observatory. During the first measurements, it revealed an improvement of the achieved sensitivity of the NIRPS instrument by approximately a factor of 2 compared to the previously ruled and replicated grating.





Opto-mechatronische Komponenten und Systeme  
Opto-mechatrical Components and Systems

---

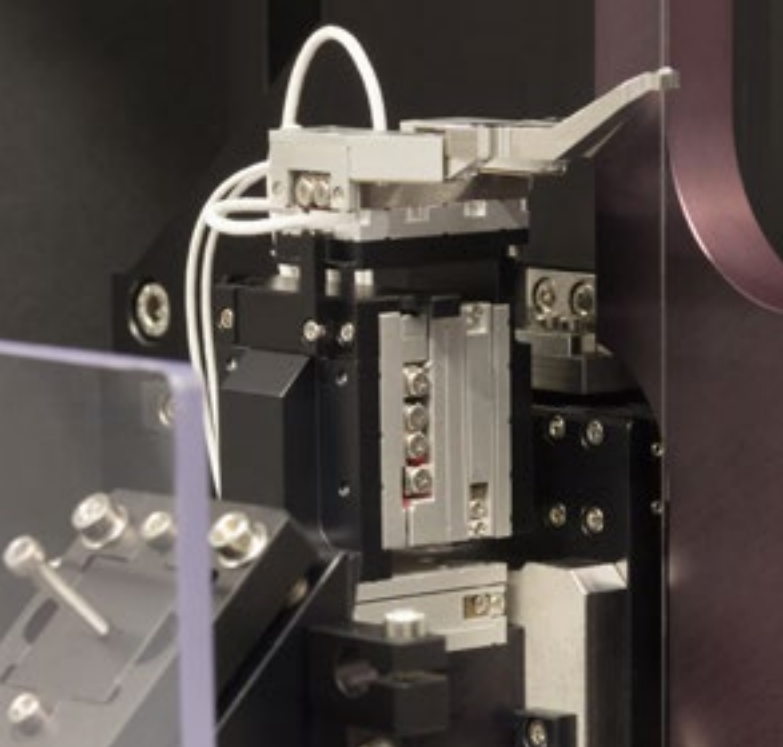


[1] Erfolgreicher Schweißtest einer  $\varnothing 400 \mu\text{m}$  Faser an einem  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  Quarzglas-Pin (anstelle eines Spiegels mit gebondetem Ohr). / Successful welding test of an  $\varnothing 400 \mu\text{m}$  fiber on a  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  fused silica pin (instead of a mirror with bonded ear).

## Entwicklung eines Gerätes für die Erforschung von Gravitationswellen / Development of a device for gravitational wave research

Die außerordentliche Empfindlichkeit der Gravitationswellen-Detektoren ist die wesentliche Voraussetzung für die Messung von Störungen der Raumzeit, die durch kosmische Ereignisse hervorgerufen werden. Einen starken Auftrieb erfuhr die weltweite Gravitationswellenforschung im September 2015 mit dem ersten Nachweis an den beiden US-amerikanischen LIGO-Observatorien in Livingston und Hanford (LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Fortschritte, insbesondere im Bereich der Detektor-Sensitivität, ermöglichen immer mehr Gravitationswellenereignisse im Universum aufzuspüren. Dazu trägt auch eine ausgeklügelte, mehrstufige Spiegelaufhängung im Interferometer bei, die thermisches und seismisches Rauschen minimiert. Das am Albert-Einstein-Institut (AEI) in Hannover im Aufbau befindliche 10 m Prototypen Fabry Perot Michelson-Interferometer ist deshalb in der letzten Stufe der dreifachen Spiegelaufhängung monolithisch ausgelegt. Auf einer Länge von 192 mm verbinden vier auf  $\varnothing 20 \mu\text{m}$  getaperte  $\varnothing 400 \mu\text{m}$  Fasern zwei Quarzglas-Spiegel über silikatisch gebondete Ohren an deren Seitenflächen (Abb. 3). Damit diese Aufhängungen hochpräzise sind, müssen alle vier Fasern unter Last gleich lang sein. Dazu werden die Fasern auf eine definierte Länge mittels  $\text{CO}_2$ -Laser geschnitten und anschließend mit dem gleichen  $\text{CO}_2$ -Laser aber geänderten Prozess zwischen den gebondeten Ohren an den Spiegelseitenflächen geschweißt. Sowohl für ein sicheres,

The extraordinary sensitivity of gravitational wave detectors is a significant requirement for the measurement of ripples in the fabric of spacetime called gravitational waves. A strong boost in the worldwide gravitational wave research was caused by the first direct detection of gravitational waves by both US-American LIGO observatories in Livingston and Hanford in September 2015 (LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Nowadays, advanced technology increases detector sensitivity and enables the detection of a variety of gravitational wave events. One of the key components are the mirrors, which are suspended as multi-stage pendulums to minimize seismic and thermal noise. A 10 m prototype Fabry-Perot Michelson interferometer at the Albert-Einstein-Institute (AEI) in Hanover is being commissioned and employs a monolithic design in the last stage of the triple mirror suspension. Two fused silica masses (penultimate mass, test mass) with silicate bonded ears on each side are welded with four  $\varnothing 400 \mu\text{m}$  fibers which are tapered on  $\varnothing 20 \mu\text{m}$  over a length of 192 mm (Fig. 3). For the mirror suspensions to be highly accurate, the loaded fibers need to be of equal length. For this purpose, the fibers are cut at a certain length using a  $\text{CO}_2$  laser, and subsequently with the same laser, but through a different process, they are welded between both mirrors at the bonded ears. For reliable, reproducible, and precise handling of the sensitive fibers as well as for the laser-based cleaving and welding, a comfortable



[2] Faser-Greifer-Modul zum Halten, Positionieren und Transportieren der getaperten Faserstücke. / Fiber-Gripper-Module for gripping, positioning, and safe moving of the tapered fiber pieces.

#### Authors

Steffen Böhme  
Tobias Koch  
Gerd Harnisch  
Uta Schmidt  
Thomas Hensel

#### Contact

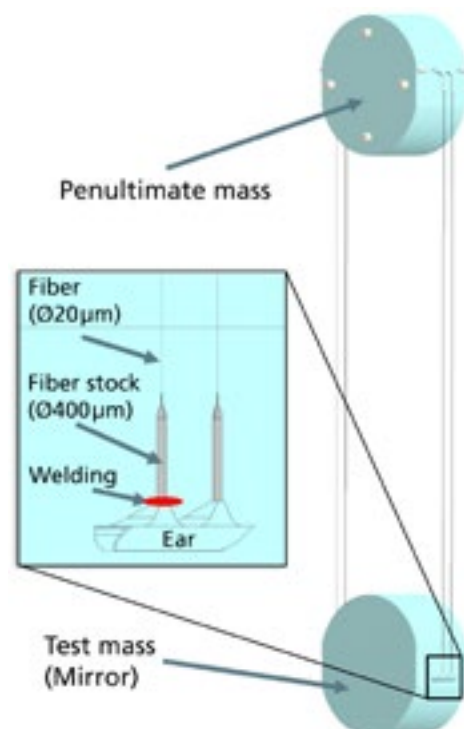
Dr. Erik Beckert  
Phone: +49 3641 807-338  
erik.beckert@iof.fraunhofer.de

reproduzierbares und präzises Handling der empfindlichen Fasern als auch für das laserbasierte Cleaven und Schweißen wurde am Fraunhofer IOF für das AEI ein Gerät entwickelt. Zum Erreichen der präzisen Positionierung und als Bindeglied zwischen dem Cleave- und Schweißprozess dient ein komplexes Faser-Greifer-Modul mit acht Piezo-Linearverstellern und integrierter Kraftmess-Sensorik (Abb. 2) sowie eine weitere motorische Achse mit 300 mm Bewegungsbereich. Justierung und Überwachung der Teilprozesse übernehmen sieben Kameras mit entsprechender Optik und Beleuchtung auf engstem Raum. Das Einschweißen der vier Fasern erfolgt nacheinander über einen teilautomatisierten Prozess. Dabei ist das Spiegelgewicht von 100 g zu beachten, welches zur signifikanten Dehnung der 20 µm dünnen Fasern führt. Diese Dehnung muss für alle vier Fasern so vorgehalten werden, dass der im Interferometer hängende Spiegel einen möglichst geringen Winkelfehler aufweist. Für den Schweißprozess wird der CO<sub>2</sub>-Laserstrahl an einen zweiten Bearbeitungsort im Gerät umgelenkt und zweigeteilt, damit ein symmetrisches und gleichzeitiges Aufheizen der Schweißstelle von zwei Seiten möglich ist (Abb. 1). Dabei muss sichergestellt sein, dass die auf jeder Spiegelseite nur wenige Millimeter auseinander liegenden beiden Schweißstellen völlig unabhängig prozessiert und beobachtet werden können.



[3] Spiegelaufhängung mit silikatisch gebondeten Ohren zum Anschweißen der vier getaperten Fasern. / Suspended mirror design with silicate bonded ears for welding of the four tapered fibers.

device has been developed for the AEI by Fraunhofer IOF. A complex Fiber-Gripper-Module with eight linear piezo stages, integrated force sensors (Fig. 2), and a motorized axis allowing a 300 mm travel range allows for precise positioning and serves as the key link between the cleaving and welding process. Adjustment and process monitoring are performed by seven cameras with adapted optics and illumination in the smallest of spaces. The fiber welding process is performed one by one via a semiautomatic sequence (Fig. 1). Thereby the mirror weight of 100 g must be considered, which leads to a significant elongation of the 20 µm thin fiber.



Technologies

50mm MRF Y

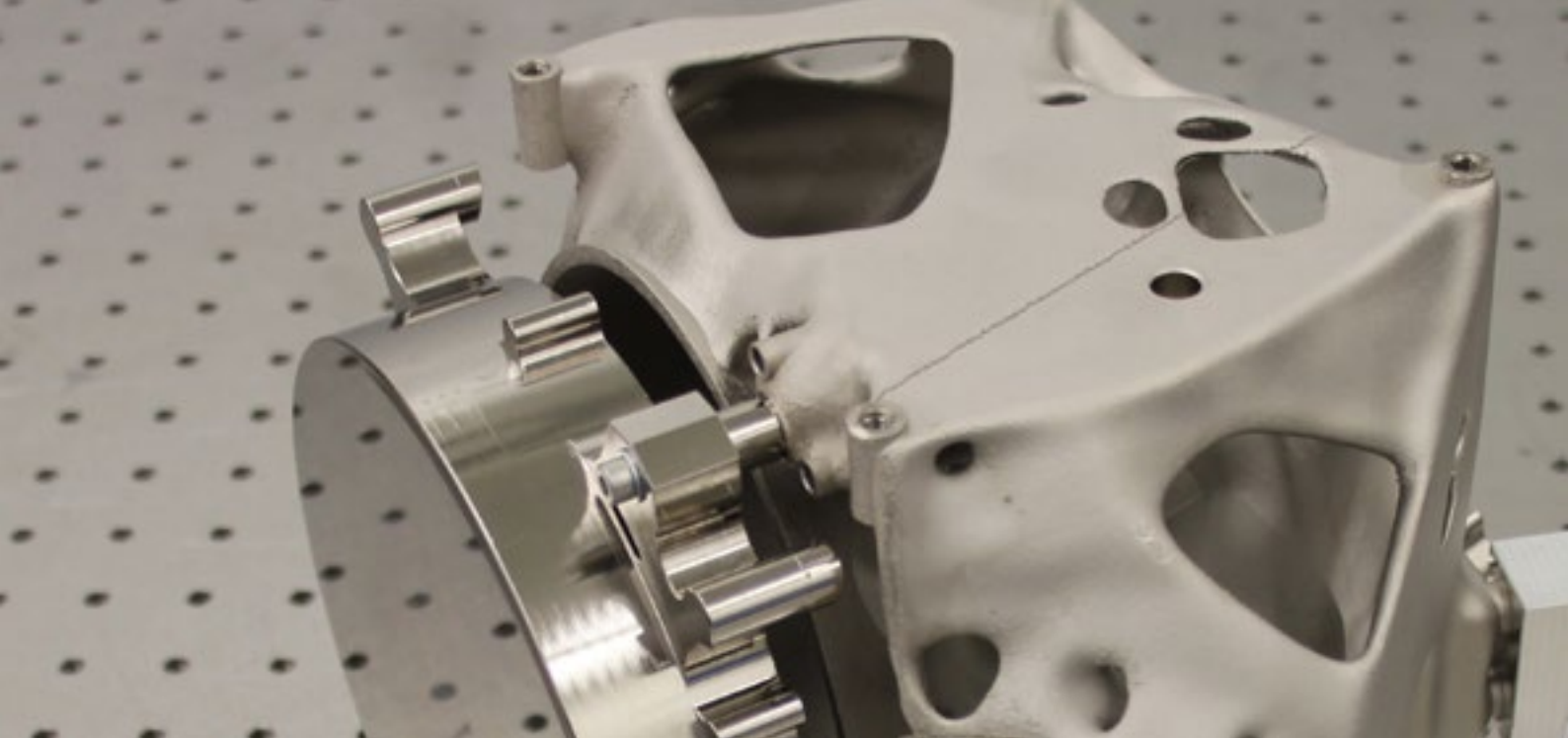
CA712  
CA706



Präzisionsoptische Komponenten und Systeme  
Precision Optical Components and Systems

---





[1] Vollintegrierter Systemdemonstrator. /  
Fully integrated system demonstrator.

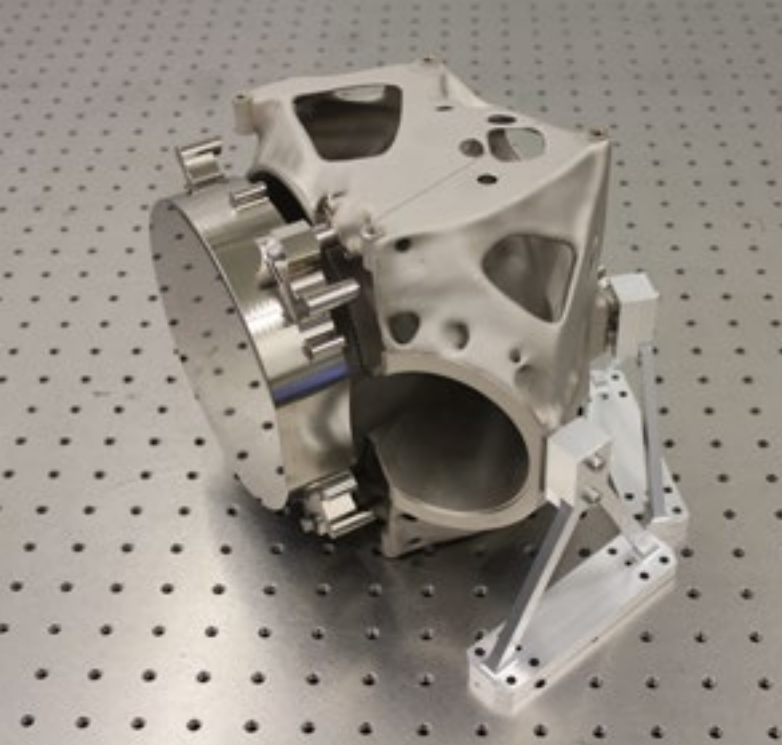
## Mittelfrequente Fehler auf metallischen Freiformoptiken Mid-spatial frequency errors on metallic freeform optics

Die Charakterisierung mittelfrequenter Fehler in ultra-präzise (UP) gefertigten Freiformoptiken aus Metall ist von großem Interesse. Freiformoptiken ermöglichen neben der Steigerung der optischen Leistungsfähigkeit die Reduzierung der notwendigen Flächen eines optischen Systems. Massebudget und Bauraum können dadurch reduziert werden, was vor allem für Weltraumanwendungen und den Automobilbereich interessant ist. Durch Herstellungsprozesse mit Subapertur-Werkzeugen entstehen auf den Optikflächen Abweichungen, die nach ihren Ortsfrequenzen in niederfrequente Form, mittelfrequente Welligkeit und hochfrequente Rauheit unterteilt werden. Langwellige Formfehler und kurzwellige Mikrorauheit können mit etablierten Fertigungsstrategien weitestgehend kompensiert werden. Welligkeiten stellen eine Herausforderung für die Oberflächenqualität dar. Durch Anpassung von Polier- und Formkorrekturprozessen können mittelfrequente Fehler für Anwendungen im nahen infraroten (NIR) und visuellen (VIS) Spektralbereich zuverlässig reduziert werden.

Dazu wurde am Fraunhofer IOF in Zusammenarbeit mit der Optikdesign-Gruppe am Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität ein freiformbasiertes Optik-Design entwickelt. Das System besteht aus zwei Spiegeln aus Aluminium 6061-T6 mit einer Nickelphosphor-Dickschicht. Im Fertigungsprozess wurden Aspekte zur Erzeugung mittelfrequenter Fehler und Maßnahmen zur Verbesserung dieser untersucht. Im Ergebnis wurde die etablierte Technologieplattform durch Polierprozesse mit hartem und weichem Werkzeug erweitert.

The characterization of mid-spatial frequency errors on ultra-precisely (UP) manufactured freeform metal optics is of great interest. In addition to an increase in optical performance, freeform optics allow the reduction of the necessary surfaces of an optical system. Thus, mass budget and design space can be reduced, which is particularly interesting for space and automotive applications. Manufacturing processes with sub-aperture tools cause deviations on the optical surfaces, which are categorized according to their spatial frequencies into low-frequency shape, mid-frequency waviness, and high-frequency roughness. Shape errors and micro-roughness can be largely compensated by established manufacturing strategies. Waviness represents a challenge to optical surface quality. By adapting polishing and shape correction processes, mid-spatial frequency errors can be reliably reduced for near-infrared (NIR) and visual (VIS) spectral range applications.

Therefore, a freeform-based optical design was developed at Fraunhofer IOF in collaboration with the optical design group of the Institute for Applied Optics at Friedrich Schiller University. The system consists of two mirrors made of aluminum 6061-T6 with a thick layer of nickel-phosphorus. During the manufacturing process, aspects of generating mid-spatial errors and methods to improve them were investigated. As a result, the established technology platform was extended by hard and soft polishing processes. Mid-spatial frequency errors of UP manufacturing could be reduced by the high removal rate of the large-area hard polishing tool.



### Authors

Johannes Frasch  
Johannes Hartung  
Stefan Risse

### Contact

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

Mittelfrequente Fehler der UP-Bearbeitung konnten durch den hohen, großflächigen Abtrag des harten Polierwerkzeugs reduziert werden.

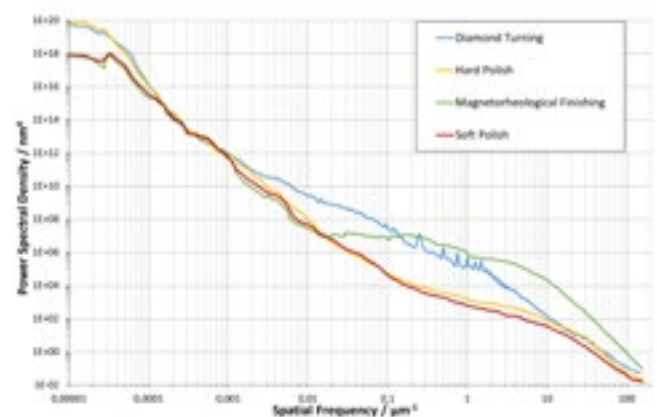
Die Ergebnisse jedes Prozessschritts wurden mit verschiedenen optischen Messgeräten erfasst. Somit konnten Abweichungen der Oberfläche zur Idealform in einem umfangreichen Ortsfrequenzbereich detektiert und in Form der spektralen Leistungsdichte (engl. Power-Spectral-Density, PSD) zusammenfassend dargestellt werden. Neben etablierten Messmethoden, wie Interferometrie, Weißlichtinterferometrie und Rasterkraftmikroskopie, wurde das Sub-Aperture-Stitching-Verfahren zur messtechnischen Charakterisierung von Freiformflächen untersucht. Die Systemintegration erfolgte durch die Aufnahme der Spiegel an einer additiv gefertigten Haltestruktur, deren Schnittstellen zur effizienten und exakten Justage UP-bearbeitet wurden.

Die Autoren danken insbesondere Sven Kiontke und Dr. Ulrike Fuchs von Asphericon GmbH, Paul Dumas von QED Technologies Inc., Prof. Christopher Evans von der University of North Carolina at Charlotte und Prof. Greg Forbes von Scisense Consulting Pty Ltd für ergebnisreiche Diskussionen und die erfolgreiche Zusammenarbeit. Wir danken dem BMBF für die Förderung des Projekts MidFree, Förderkennzeichen: 03INT508BA.

The results of each process step were recorded by various optical measuring devices. Thus, deviations from the surface to the ideal shape could be detected in a wide spatial frequency range and summarized by the power spectral density (PSD). In addition to established measurement methods such as interferometry, white light interferometry, and atomic force microscopy, the sub-aperture stitching method was investigated for the metrological characterization of freeform surfaces. System integration was achieved by mounting the mirrors on an additively manufactured housing structure, the interfaces of which were diamond-machined for efficient and accurate alignment.

The authors would like to thank Sven Kiontke and Dr. Ulrike Fuchs from Asphericon GmbH, Paul Dumas from QED Technologies Inc., Prof. Christopher Evans from the University of North Carolina at Charlotte, and Prof. Greg Forbes from Scisense Consulting Pty Ltd for sharing their insights and for the fruitful collaboration. We would also like to thank the BMBF for funding the MidFree project, funding code: 03INT508BA.

[2] PSD der Formkorrektur- und Polierprozesse des konvexen Freiformspiegels. / PSD of the shape correction and polishing processes of the convex freeform mirror.





[1] Prism-Grating-Assembly für Sentinel 5 (Flughardware). /  
Prism Grating Assembly for Sentinel 5 (flight hardware)

## Montagetechnologien für das hochauflösende Spektrometer der Sentinel 5-Mission Assembly Technologies for the High-Resolution Imaging Spectrometer of the Sentinel-5 Mission

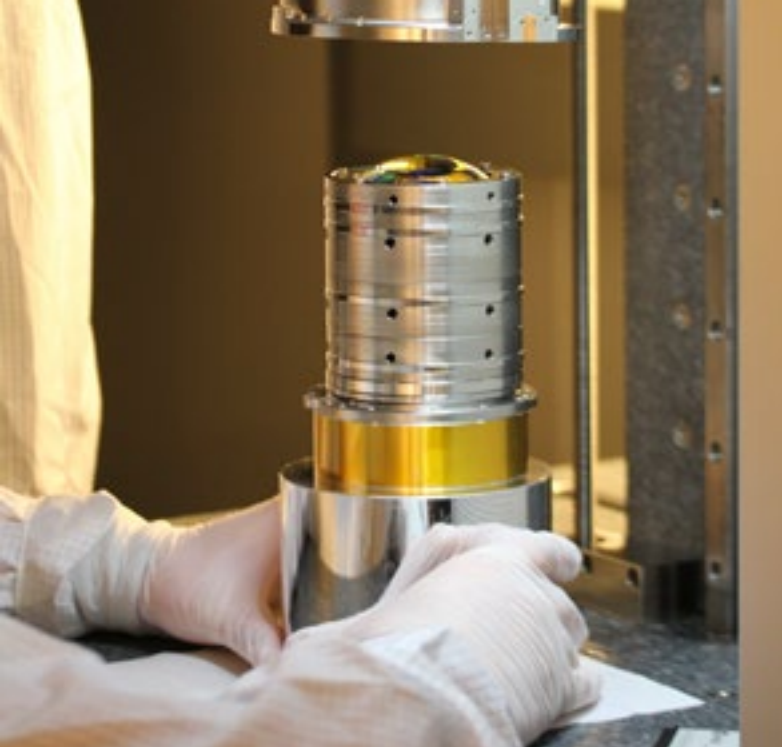
---

Optische Instrumente für die Beobachtung aus dem Weltall sind der Schlüssel zur Gewinnung von Informationen zu zentralen Fragestellungen unseres Lebens. Sie liefern Daten für den Umweltschutz, zur Klimaüberwachung, zur Einschätzung von Naturkatastrophen und für andere gesellschaftliche Aufgaben. Um immer detailliertere und umfassendere Analysen zu ermöglichen, müssen im Instrument Optikkomponenten langzeitstabil und positionsgenau justiert und assembliert werden. Die notwendigen Montagetechnologien nehmen eine maßgebliche Position bei der Realisierung von Erdbeobachtungssystemen mit hoher spektraler- und örtlicher Auflösung ein. Das Sentinel-5/UVNS (Ultraviolet Visible Near-Infrared Sounder) Instrument ist ein hochauflösendes Spektrometer, welches in sieben unterschiedlichen Spektralbändern die Erdatmosphäre auf Anreicherungen von Treibhausgasen und Feinstaub untersucht. Im Rahmen einer langjährigen Projektpartnerschaft mit der Jena-Optronik GmbH hat das Fraunhofer IOF Montagetechnologien für rotationssymmetrische gefasste Linsenbaugruppen sowie Fassungen und Montierungen von prismatischen Optiken entwickelt und für die Flugmodelle der Sentinel-5 Spektrometer realisiert. Bei der Integration der klassischen Linsenoptiken der Kameraeinheit der Sentinel-5 NIR-Spektrometer-Optik gelang es durch den Einsatz des Justier- bzw. Zentriertdrehverfahrens kleinste Dezentrierungs- und Luftabstandtoleranzen zu erreichen. Herzstück der Technologie ist

Optical instruments for observation from space are the key to gaining information on central issues in our lives. They provide data for environmental protection, climate monitoring, the assessment of natural disasters, and other social tasks. To enable increasingly detailed and comprehensive analyses, the optical components of the instrument must be adjusted and mounted in a position that is stable over the long term. Thus, the necessary construction technologies play a key role in the realization of Earth observation systems with high spectral and spatial resolution. The Sentinel-5/UVNS (Ultraviolet-Visible Near-Infrared Sounder) instrument is a high-resolution spectrometer that examines the Earth's atmosphere for accumulated greenhouse gases and particulate matter in seven different spectral bands.

As part of a long-term project partnership with Jena-Optronik GmbH, Fraunhofer IOF has developed assembly technologies for rotationally symmetrical lens assemblies and mounts for prismatic optics and implemented them for the flight model of the Sentinel-5 spectrometer.

When integrating the classic lens optics of the Sentinel-5 NIR spectrometer camera optics, it was possible to achieve the smallest decentering and air gap tolerances by using the alignment turning process. The main equipment for this



[2] Drop-In Montage des Sentinel-5 CAM-Linsenstapels. /  
Drop-In Assembly of the Sentinel-5 CAM Lens Stack.

#### Authors

Andreas Gebhardt  
Stefan Risse  
Sandra Müller  
Mathias Rohde  
Erik Schmidt

#### Contact

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

eine am IOF entwickelte Justierdrehmaschine. Die Technik erlaubt die Ausrichtung der Linse nach ihrer optischen Achse und die anschließende ultrapräzise Bearbeitung der Fassungsreferenzen im Bezug zur Optik. Die genaue messtechnische Überwachung von Fassungs-durchmesser, Ebenheiten, Parallelitäten sowie Scheitelhöhen und der Fassungszyylindergeometrie ermöglicht eine deterministische Drop-In Füllfassungsmontage /1/. Eine besondere Herausforderung bestand im Einsatz von Titan als Fassungs- und Tubusmaterial. Die prismatischen Optiken umfassen sogenannte ROM-Baugruppen (eng. Rectangular Optics Mount) zur Strahlformung und PGA-Baugruppen (eng. Prism-Grating-Assembly) zur Erhöhung der Dispersion. Während die prismatischen ROM-Baugruppen aus einer rechteckig zugeschnittenen Kollimationslinse und zwei Umlenkspiegeln aus optischen Gläsern bestehen, wird die PGA-Baugruppe aus einem Prisma und einem planaren optischen Gitter aus Kieselglas gebildet. Dabei erfolgte die exakte Strukturierung des Gitters mittels Elektronenstrahl-Lithographie. Alle Glaskomponenten wurden in Fassungen mit Festkörpergelenken aus Titan und Abstimmeelementen aus Invar montiert. Hierzu wurden Klebtechnologien entwickelt und auf die Lastfälle der Anwendung während des Raketenstartes und der Bedingungen im Weltraum angepasst. Die Baugruppen wurden durch die Jena-Optronik GmbH mechanisch und optisch getestet, zur Spektrometer-Optik der Sentinel-5-Satelliten montiert und abschließend charakterisiert. Die Ergebnisse der Flughardware erfüllen die optische Spezifikation und bilden damit die Grundlage für eine erfolgreiche Weltrauminstrumentierung und Sentinel-5-Mission.

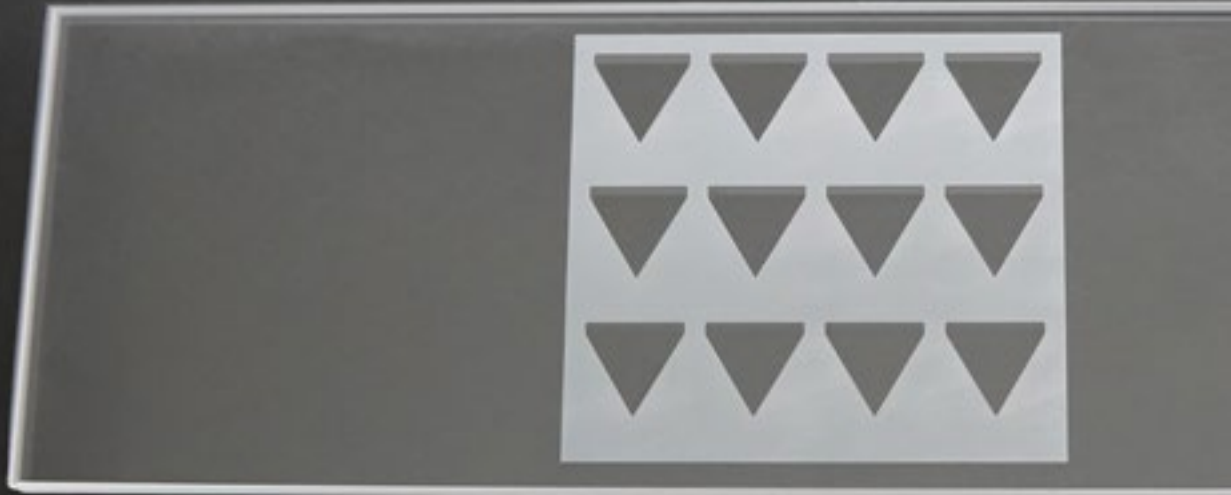
Wir danken der Jena-Optronik GmbH für die Zusammenarbeit. Einige der Forschungsarbeiten wurden im Copernicus-Programms durchgeführt. Dieser Artikel wurde mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union erstellt. Die hier geäußerten Ansichten sind nicht als offizielle Meinung der Europäischen Union und/oder der Europäischen Weltraumorganisation ESA anzusehen.

proprietary technology is an alignment turning machine developed at Fraunhofer IOF. The technique allows the adjustment of the lens according to its optical axis and the cutting of mechanical references related to the optics with extreme precision. The precise metrological monitoring of the housing diameter, flatness, parallelism, vertex heights, and tube cylinder geometry enables a deterministic drop-in assembly /1/. A particular challenge was the use of titanium as lens housing and tube material.

The prismatic optics include Rectangular Optics Mount (ROM) assemblies for beam shaping and Prism Grating Assemblies (PGA) to increase dispersion, whereas the prismatic ROM assemblies consist of a square-cut collimating lens and two deflection mirrors made of optical glass. The PGA assembly is formed by a prism and a planar fused silica optical grating. The grating was precisely structured using electron beam lithography. All glass components were mounted in the frame with solid-state titanium joints and invar tuning elements. For this purpose, adhesive technologies were tailored to the load cases of the rocket launch application and the conditions in space. The assemblies were mechanically and optically tested by Jena-Optronik GmbH, mounted to the spectrometer optics of the Sentinel-5 satellites, and finally characterized. The results of the flight hardware meet the optical specification and thus, form the basis for the successful space instrumentation of the Sentinel-5 mission.

#### References / Literatur

/1/ A. Gebhardt et al.: Int. J. Automation Technol., pp. 644-653, doi: 10.20965/ijat.2020.p0644.



[1] Nach der Chevron-Methode direkt gefügte Glaselemente aus B33 und D263 Glas. /  
Directly bonded elements made of B33 and D263 glass according to the chevron method.

## Direktes Bonden dreidimensionaler Glas-Strukturen Direct bonding of three-dimensional glass bodies

Fügeverbindungen ohne Zwischenschichten, die mithilfe des plasma-aktivierten Bondens realisiert werden, haben wesentliche Vorteile hinsichtlich chemischer Resistenz und Transmissionsverhalten in optischen und mikrofluidischen Anwendungen. Beim direkten Bonden verbinden sich die Oberflächenatome der zu fügenden Bauteile sehr fest. Dieser Umstand bedingt eine sehr geringe Oberflächenformabweichung (500 nm peak to valley) und sehr geringe Rauheit (0.5 nm root mean square im  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  Messfeld). Das erfolgreich abgeschlossene Projekt 3D-Glas hatte zum Ziel, grundlegende Zusammenhänge zum Einfluss der Oberflächenform und -rauheit, sowie das Fügeverhalten unterschiedlicher typischer Glasmaterialien für die Mikrofluidik zu erforschen, den Einfluss von Oberflächenkorrekturverfahren auf erzielbare Festigkeiten zu bestimmen, um schlussendlich dreidimensionale Bauteile zu realisieren.

Die Chevron-Methode (Abb. 1) wurde an den für Mikrofluidikanwendungen typischerweise verwendeten Glasmaterialien B33 und D263 (Schott) eingeführt, welche eine Bestimmung der Fügefestigkeiten mit sehr niedriger Messwertstreuung erlaubt. Beim Fügen von D263 konnten sehr hohe Festigkeiten im Vergleich zu B33 erzielt werden. Eine Versuchsreihe zum Einfluss der Temperatur der Wärmebehandlung zeigte, dass sich D263-Glas schon bei Temperaturen von  $150^\circ\text{C}$  bereits hohe Festigkeiten erreicht (Abb. 2). Klassische Methoden zur Oberflächenbearbeitung optischer Komponenten, wie Schleifen, Läppen oder Polieren, liefern sehr gute Ergebnisse bei einfachen Probengeometrien (wie z. B. Zylinder oder Platten). Für dreidimensionale

Joining connections without interlayers, realized by plasma-activated bonding, have substantial advantages concerning chemical resistance and transmission in optical and microfluidic applications. At the same time, strong bonds are formed when bonding glass materials. During direct bonding, the surface atoms are very firmly connected to the parts to be bonded. This requires a very low surface figure deviation (500 nm peak to valley) and low roughness (0.5 nm root mean square within  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  measurement area).

The successful project 3D-Glas focused on basic correlations of the influence of surface figure error and roughness, the joining of different glass materials for microfluidic applications, and the influence of surface correction methods on the bonding strength, to finally realize a three-dimensional part based on this knowledge.

The chevron method (Fig. 1) was introduced to compare the bonding strength of the glass materials B33 and D263 (Schott). This method typically shows very low statistical scattering. High bonding strengths are possible when bonding D263 already at low annealing temperatures of  $150^\circ\text{C}$ , which are still higher than for B33 (Fig. 2).

Classical methods for surface preparation, such as grinding, lapping, or polishing, achieve a very good surface quality for simple geometries (like cylinders or plates). For three-dimensional parts, classical surface preparation methods are



## Authors

Carolin Rothhardt

## Contact

Dr. Carolin Rothhardt  
Phone: +49 3641 807-304  
carolin.rothhardt  
@iof.fraunhofer.de

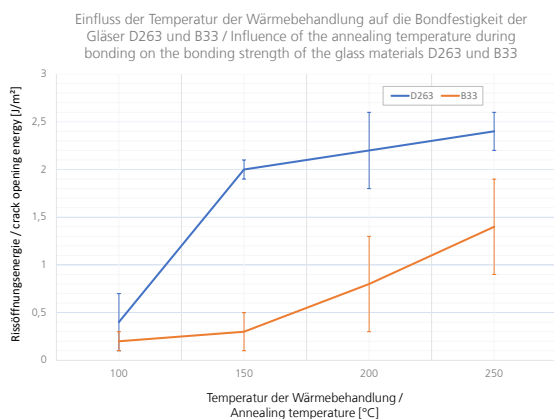
Bauteile ist eine klassische Oberflächenbearbeitung mit Kompromissen verbunden, wenn gleichzeitig Konstruktionsmaße eingehalten werden sollen (z. B. Winkeltrue von Prismen) und eine möglichst niedrige Oberflächenformabweichung erreicht werden soll. Moderne Formkorrekturverfahren wie magnetrheologisches Finishing (MRF) und Ionenstrahl-Formkorrektur (IBF) sind weniger von der Probengeometrie abhängig.

Zwei unterschiedliche MRF-Fluide wurden hinsichtlich dem Fügeverhalten untersucht. Dazu wurde die Oberflächenform von Kieselglassubstraten korrigiert, gefügt und anschließend die Festigkeit ermittelt. Beide Fluide konnten erfolgreich für das Fügen eingesetzt werden (Festigkeiten der gefügten Verbindung größer als 50 % der Festigkeit des massiven Materials). IBF konnte ebenfalls erfolgreich für das zwischenschichtfreie Fügen qualifiziert werden. Bei unterschiedlichen Ionenstrahl-Spannungen konnten hier ebenfalls hohe Festigkeitswerte erzielt werden. Diese Untersuchungen bilden die Grundlage um dreidimensionale Strukturen direkt zu bonden. Als erfolgreicher Abschluss wurde ein Gitter-Prisma-Demonstrator erfolgreich gebondet.

a compromise, when geometric tolerances (like high-precision angles in prisms) need to be realized at the same time with low surface figure deviation. Modern methods, such as magnet rheological finishing (MRF) and ion beam figuring (IBF), are less prone to the influence of part geometry.

Two different MRF fluids were tested for achievable bonding strength after surface correction. Therefore, the surface figure error of fused silica test substrates was reduced by MRF, and the samples were bonded and tested for bonding strength. Samples corrected with these fluids achieved bonding strength of at least 50 % of the bulk fused silica strength.

IBF also successfully qualified for interlayer-free bonding. For different beam voltages with the appropriate treatment, bonded samples achieved high bonding strength of 60 % of the bulk fused silica strength. These experiments are the foundation for successfully bonding three-dimensional parts. Therefore, a grating-prism demonstrator could be bonded successfully as the final result of the project.



[2] Einfluss der Temperatur der Wärmebehandlung auf die Bondfestigkeit der Gläser D263 und B33. / Influence of the annealing temperature during bonding on the bonding strength of the glass materials D263 und B33.

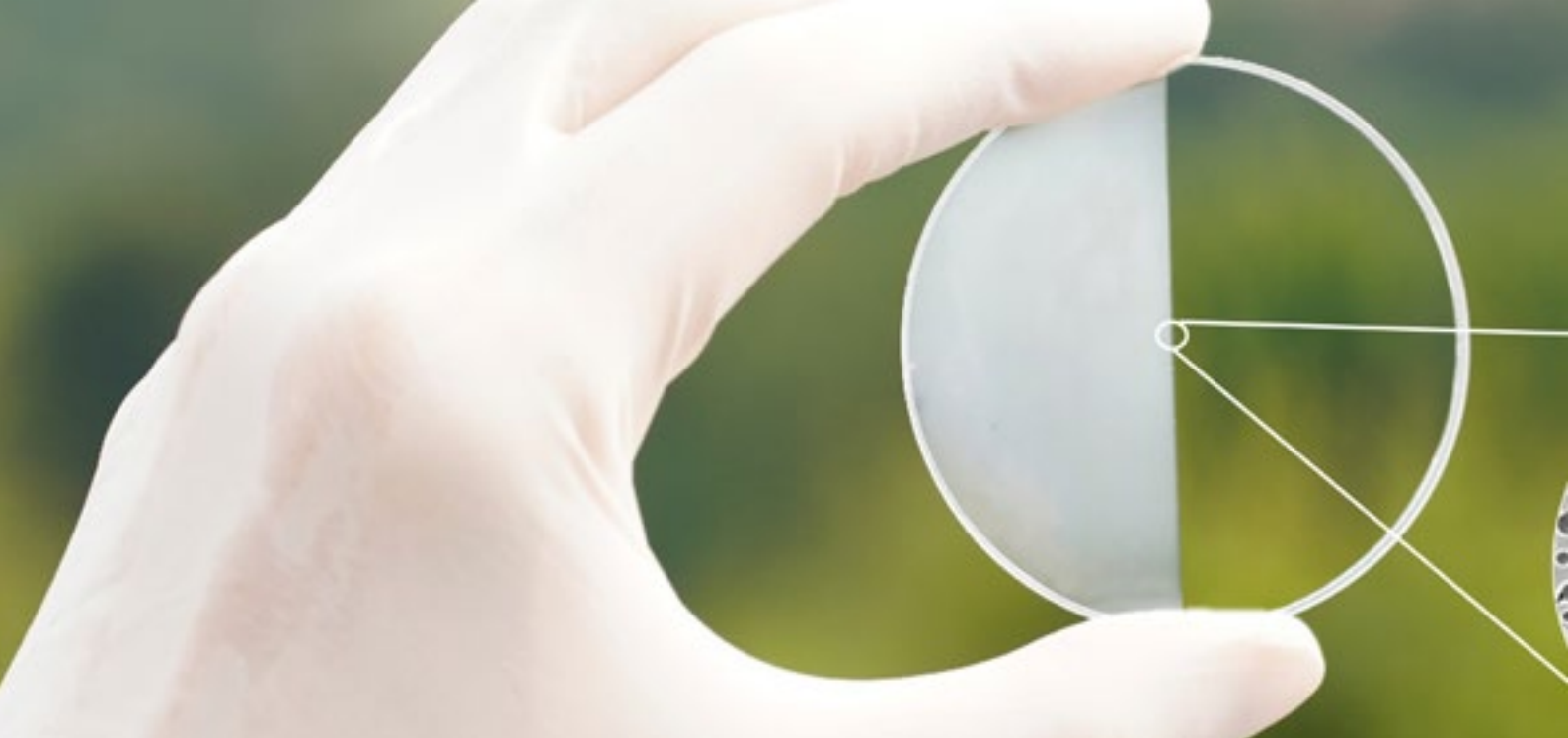




Funktionelle Oberflächen und Schichten  
Functional Surfaces and Coatings

---





[1] Kombiniertes Antifog-Antireflex-Schichtsystem. /  
Combined antifog-antireflective coating system.

## Kombinierte Antifog-Antireflex-Systeme für LiDAR Anwendungen / Combined antifog-antireflective system for LiDAR application

Die Verwendung von Laserstrahlen zur Abstandsmessung in LiDAR-Systemen ermöglicht es, dreidimensionale Informationen von der Umgebung zu erfassen. Dies macht sie besonders attraktiv für verschiedene Anwendungen. Das wohl bekannteste Beispiel sind LiDAR-Systeme für das autonome Fahren. Doch auch bei der Gelände- und Stadtekartierung kommen sie zum Einsatz. Hierbei werden die Systeme in Vermessungsflugzeugen verbaut, um die Erdoberfläche aus der Luft systematisch zu vermessen. Dabei kann Wasserdampf, aufgrund extremer Temperaturunterschiede zwischen der Umgebung und dem Messsystem, auf optischen Komponenten kondensieren, was zu einer Beschlagsbildung führt und die optische Funktion herabsetzt. Das Aufbringen eines transparenten Antifog (AF)-Lacks auf die kritische Oberfläche kann dies verhindern. Gleichzeitig soll sie aber auch entspiegelnd wirken, um die an den optischen Grenzflächen auftretenden Reflexionen zu minimieren und die Transmission zu erhöhen. Hierbei ist es erforderlich, dass die Wirkung des AF-Lacks nicht negativ durch eine homogene, undurchlässige Antireflex (AR)-Beschichtung beeinflusst wird. Die Entwicklung eines geeigneten Schichtsystems für eine solche Anwendung ist mit der am Fraunhofer IOF entwickelten AR-plas2 Technologie zur Herstellung von Nanostrukturen möglich. Mit dieser können Nanostrukturen mit effektiven Brechzahlen im Bereich von 1.4 bis 1.05 erzeugt und ein AR-System für den gewünschten Wellenlängenbereich im Nahinfrarot entwickelt werden.

LiDAR systems can capture three-dimensional information from the environment by using laser beams to measure distances. This makes them particularly attractive for various applications. Probably the best-known example is LiDAR systems for autonomous driving. However, they are also used for terrain and urban mapping. Here, the systems are built in a survey aircraft to systematically measure the earth's surface from the air. Extreme temperature differences at an altitude between the environment and the measuring system can cause water steam to condensate on optical components, resulting in fogging. This has a negative effect on optical performance. The application of an antifog (AF) coating on the critical surface can prevent this. At the same time, however, it should also have an anti-reflective (AR) function to minimize the reflections that occur at the optical interfaces and to increase transmission. Here the effect of the AF coating must not be negatively affected by a homogeneous, impermeable AR coating. The development of an appropriate coating system for such an application is achievable with the AR-plas2 technology for fabricating nanostructures developed at Fraunhofer IOF. This enables the generation of nanostructures with effective refractive indices in the range of 1.4 to 1.05 and the development of an AR system for the desired wavelength range in the near-infrared.



### Authors

Anne Gärtner  
Friedrich Rickelt  
Astrid Bingel  
Sabrina Wolleb  
Ulrike Schulz

### Contact

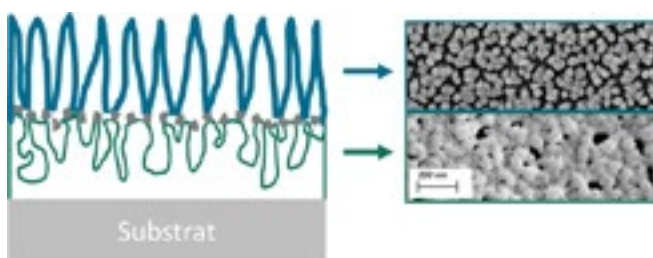
Dr. Ulrike Schulz  
Phone +49 3641 807-344  
ulrike.schulz@iof.fraunhofer.de

Der Prozess findet in einer Aufdampfanlage mit integrierter Plasmaquelle (APS) der Firma Bühler AG statt. Dabei werden zunächst Nanostrukturen mittels APS in den Lack geätzt. Anschließend wird eine zweite Struktur auf der ersten erzeugt, indem sich Nanostrukturen aus einem homogen abgeschiedenen organischen Schichtmaterial mithilfe der APS selbstorganisierend entwickeln. Im weiteren Prozessverlauf werden diese mit  $\text{SiO}_2$  überschichtet und die Organik anschließend durch geeignete Nachbehandlungsschritte entfernt. Dieses Verfahren wurde zum Patent angemeldet. Basierend darauf erfolgte im Rahmen eines Projektes mit Leica Geosystems die Entwicklung eines AF/AR-Systems für ein LiDAR-System zur Erdbeobachtung. Dabei wurde bei der Zielwellenlänge 1064 nm eine Restreflexion kleiner 0.1 % erreicht, ohne dabei die AF-Wirkung des Lacks zu beeinträchtigen /1/.

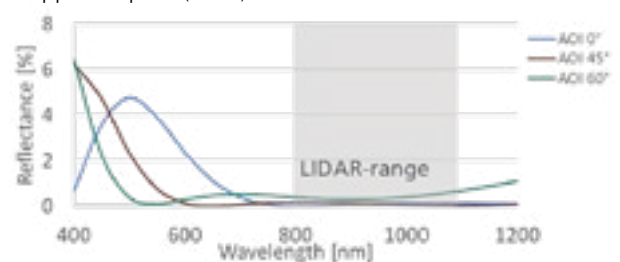
The process can be realized in a vapor deposition system with an integrated plasma source (APS) from Bühler AG. In this process, nanostructures are first etched into the AF coating by using the APS. Subsequently, a second nanostructure is created on top of the first one to form self-assembling nanostructures from a homogeneously deposited organic layered material with the support of the APS. In the further process, these structures are overcoated with  $\text{SiO}_2$  and the organic material can be removed by appropriate post-treatment steps. This process has been registered for patent. Based on this, an AF/AR system was developed for a LiDAR system for earth observation as part of a project with Leica Geosystems. A residual reflection of less than 0.1 % was achieved for the target wavelength of 1064 nm without affecting the AF function of the coating /1/.

### References / Literatur

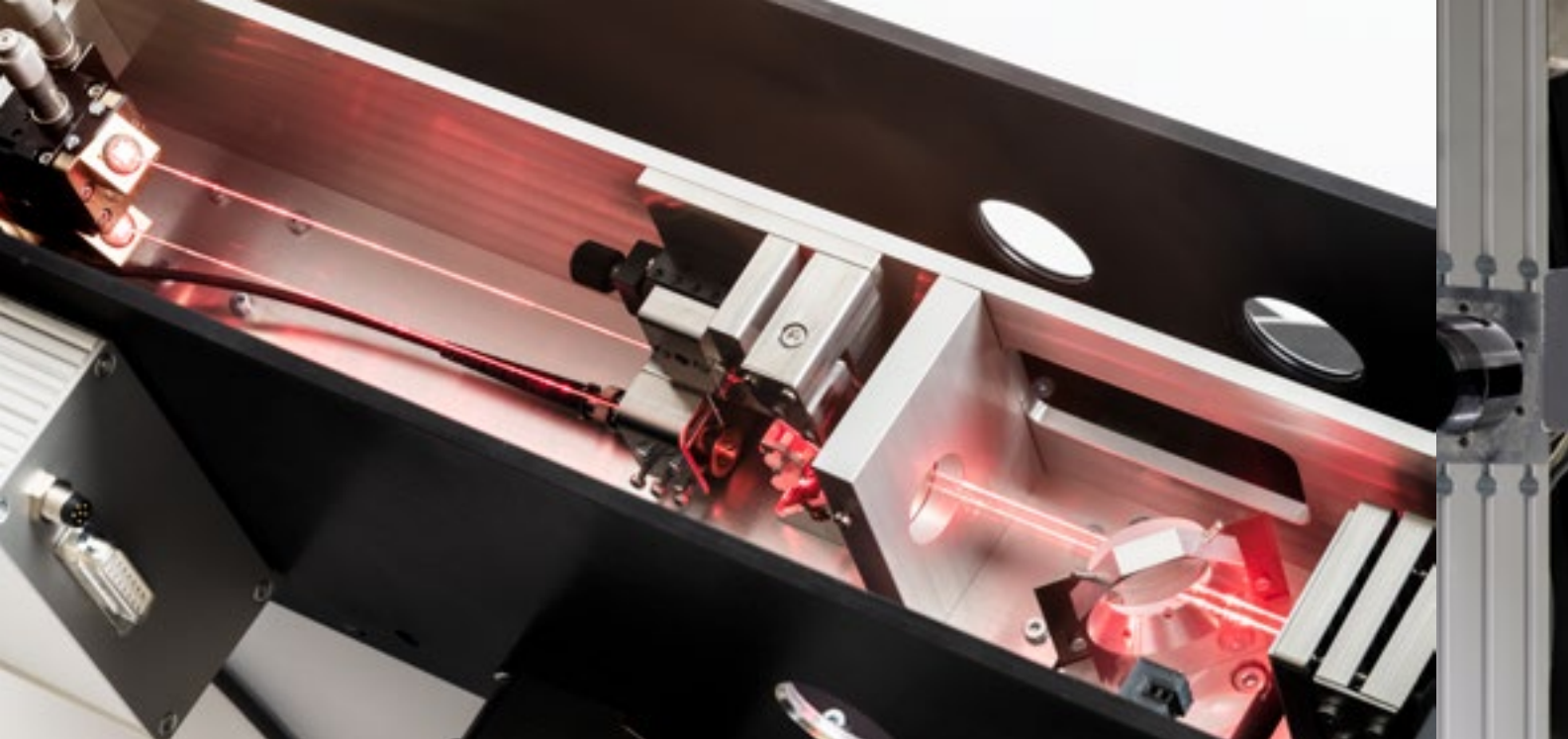
- /1/ A. Gärtner et al.: Combined antifogging and antireflective double nanostructured coatings for LiDAR applications, Applied Optics (2023).



[2] Schematische Darstellung einer Doppelstruktur (links), Mikroskopaufnahme der einzelnen Strukturen in Draufsicht (rechts). / Schematic representation of a double nanostructure (left), Microscope image of the single structures in top view (right).



[3] Berechnete Reflexionsspektren einer Doppelstruktur für verschiedene Lichteinfallswinkel (AOI). / Calculated reflectance spectra of a double structure for different angles of light incidences (AOI).



[1] Aufbau für direkte Absorptionsmessung (LID). /  
Setup for direct absorption measurement (LID).

## Zerstörungsfreie Prüfung von Oberflächenschädigungen Non-destructive testing of subsurface damage

Oberflächenschädigungen (SSD) – Mikrorisse, strukturelle Defekte und Verunreinigungen direkt unter einer optischen Oberfläche – werden fast zwangsläufig durch mechanische und chemische Einwirkungen bei Schleif- und Polierprozessen verursacht. SSD vermindert nicht nur die optische Leistung, sondern senkt auch die mechanische und laserinduzierte Zerstörschwelle (LIDT). Der Schlüssel zu niedrigen SSD-Werten liegt in der Optimierung von Abläufen und Bearbeitungszeiten, um SSD aus vorangegangenen Fertigungsschritten in den nachfolgenden Bearbeitungsprozessen zu entfernen. Dies erfordert jedoch detaillierte Kenntnisse über das Vorhandensein und die Menge an SSD – am besten durch zerstörungsfreie Messverfahren entlang der Prozesskette.

Imperfektionen und damit auch SSD verursachen optische Verluste, die eine zerstörungsfreie Charakterisierung des SSD-Gehalts mit Hilfe von hochempfindlichen Absorptions- und Streulichtmessungen ermöglichen. Daher wurden beide Verlustmechanismen auf ihre Fähigkeit zur zerstörungsfreien Bestimmung von SSD in verschiedenen optischen Kristallen und Gläsern, von Quarzglas bis Kalziumfluorid, getestet (Abb. 3). Zusätzlich zeigen interne LIDT-Messungen den signifikanten Einfluss von SSD auf die Laserschädigung. Diese Informationen sind für die Optimierung optischer Fertigungsschritte und Bearbeitungszeiten von entscheidender Bedeutung, um der perfekten optischen Oberfläche (geringe Rauheit und SSD) in der kürzest möglichen Bearbeitungszeit immer näher zu kommen.

Subsurface damage (SSD) – microcracks, structural defects, and impurities just below an optical surface – is almost unavoidably caused by mechanical and chemical impact during grinding and polishing processes. SSD not only reduces the optical performance but is also known to reduce the mechanical and laser-induced damage threshold (LIDT). A key to low SSD levels lies in optimizing sequences and processing times to remove SSD from previous manufacturing steps in the subsequent processing. This, however, requires detailed knowledge about the presence and amount of SSD, at best using non-destructive measurement procedures along the process chain.

Imperfections and thus also SSD cause optical losses, enabling the non-destructive characterization of SSD levels with the help of highly sensitive absorption and scattering measurements. Therefore, both loss mechanisms were tested for their ability to determine SSD non-destructively in various optical crystals and glasses ranging from fused silica to calcium fluoride (Fig. 3). Additionally, in-house LIDT measurements reveal the significant impact of SSD on laser damage. This information is essential when optimizing optical manufacturing steps and processing times to get closer and closer to the perfect optical surface (low roughness and SSD) in the shortest possible processing time.



[2] Aufbau zur Messung der winkelaufgelösten Streuung (ARS).  
Setup for measuring angle resolved scattering (ARS).

### Authors

Christian Mühlig  
Marcus Trost  
Anne-Sophie Munser

### Contact

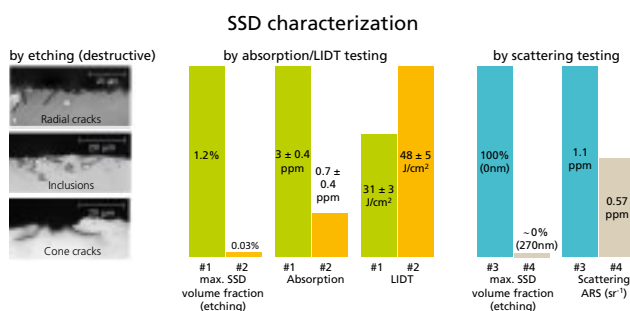
Dr. Sven Schröder  
Phone +49 3641 807-232  
sven.schroeder@iof.fraunhofer.de

Bei Streulichtmessungen liegt der Schlüssel darin, die SSD-bezogene Streuung von weiteren Unvollkommenheiten wie der Oberflächenrauheit, Verunreinigungen, Partikeln und Kratzern zu trennen. Daher wurde ein neuer Charakterisierungsansatz – Oberflächenbeleuchtung unter dem Brewster-Winkel – entwickelt /1/, bei dem die Lichtstreuung von der Oberfläche bei bestimmten Streuwinkeln im Vergleich zur SSD-bezogenen Streuung aus dem Inneren des Materials weitgehend unterdrückt wird. So können selbst < 100 nm große SSD-Schichten mit hohen Signalunterschieden in der Streuerverteilung erreicht werden.

Verunreinigungen im Inneren der Mikrorisse wie Polierrückstände und der Defekt selbst erhöhen die Absorption zwischen dem Bulkmaterial und der Oberfläche. Das Verfahren der laserinduzierten Ablenkung (LID) /2/ – ein photothermisches Prinzip in Verbindung mit einer zuverlässigen Absolutkalibrierung – ermöglicht die direkte Messung der Absorption bis in den ppm-Bereich. Die Verknüpfung eines neuen Messansatzes mit der umfassenden Kenntnis des Absorptionsverhaltens des Materials ermöglicht es, den SSD-Effekt von den Volumeneigenschaften zu trennen.

For light scattering measurements, the key lies in separating SSD-related scattering from further imperfections such as surface roughness, impurities, particles, and scratches. Therefore, a new characterization approach – surface illumination at the Brewster angle – was developed /1/ where light scattering from the surface is largely suppressed at specific scattering angles compared to SSD-related scattering from inside the material. Thus, even < 100 nm SSD layers can be accessed with high signal differences in the scattering distribution.

Impurities inside the microcracks such as polishing residuals and the defect itself increase the absorption between the bulk material and surface area. The laser-induced deflection (LID) technique /2/ – a photo-thermal principle coupled with reliable absolute calibration – grants access to directly measure absorption down to the ppm level. Linking a new measurement approach with extensive knowledge of the material's absorption behavior allows for separating the SSD from bulk properties.



[3] Charakterisierung von SSD-bezogenen Eigenschaften in Quarzglas. / Characterization of SSD related properties in fused silica.

### References / Literatur

- /1/ M. Trost et al.: Evaluation of subsurface damage by light scattering techniques, Appl. Opt. 52(26), 6579 (2013).  
/2/ Ch. Mühlig and S. Bublitz: Absolute Absorption Measurements in Optical Coatings by Laser Induced Deflection, Coatings 9, 473 (2019).  
/3/ A. Munser et al.: Non-destructive testing of subsurface damage for early indication of laser induced damage threshold in fused silica, Proc. SPIE 12300.



[1] Verschiedene Endoskope der Firma KARL STORZ mit AR-Beschichtung. / Various KARL STORZ endoscopes with AR coating. © KARL STORZ

## Ultrastabile Entspiegelung für medizintechnische Anwendungen / Ultra-stable anti-reflection coatings for medical applications

An viele medizintechnische Geräte mit bildgebender optischer Funktion (wie z. B. Endoskope) werden zunehmend Anforderungen bezüglich einer weiteren Verbesserung der Bildqualität gestellt. So soll die Lichttransmission des gesamten Aufbaus verbessert und Geisterbilder, die durch störende Reflexionen entstehen, möglichst vermieden werden. Antireflexbeschichtungen (kurz AR-Beschichtung), die Reflexionen an den Grenzflächen der einzelnen optischen Elemente verringern, sind geeignet, um die Lichttransmission zu erhöhen und somit eine maximale Lichtausbeute zu erreichen. Für Medizinprodukte wie Endoskope gibt es bisher jedoch keine zufriedenstellenden Lösungen für AR-Beschichtungen auf den stark beanspruchten Außenfenstern, da diese für den Einsatz im klinischen Umfeld besonders hohe mechanische und chemische Stabilitätsanforderungen erfüllen müssen. Neben einer hohen Kratzbeständigkeit müssen Beschichtungen auf Endoskopfenster besonders der Reinigung in chemisch aggressiven Medien sowie der Desinfektion und Dampfsterilisation standhalten.

In einem vom BMBF geförderten Verbundprojekt hat das Fraunhofer IOF zusammen mit Beschichtungsfirmen und einem Hersteller von Medizinprodukten die Entwicklung einer solchen stabilen AR-Beschichtung für die stark beanspruchten Außenflächen von z. B. Endoskoplinsen erfolgreich durchgeführt. In der ersten Hälfte der Projektlaufzeit konnten durch Beanspruchungstests an Einzelschichten, die aus verschiedenen

Many medical devices with optical imaging functions (such as endoscopes) are required to further improve image quality. For example, the light transmission of the entire setup should be improved and ghost images caused by disturbing reflections should be avoided as far as possible. Anti-reflective (AR) coatings, which reduce reflections at the interfaces of the individual optical elements, are suitable for increasing light transmission and thus achieving maximum light yield. For medical devices such as endoscopes, however, there have been no satisfactory solutions for AR coatings on the heavily stressed outer windows to date, as these have to meet particularly high mechanical and chemical stability requirements for use in clinical environments. In addition to high scratch resistance, coatings on endoscope windows must withstand cleaning in chemically aggressive media as well as disinfection and steam sterilization.

In a joint project funded by the BMBF, Fraunhofer IOF in partnership with coating companies and a manufacturer of medical devices successfully developed a stable AR coating for the highly stressed outer surfaces of, e. g., endoscope lenses. In the first half of the project, suitable material pairings for an interference layer antireflection coating were found through tests on single-layer coatings produced from different coating materials and using different deposition techniques. Thanks to an elaborate layer sequence and an adjustment of layer

### Authors

Peter Munzert  
Astrid Bingel  
Stefan Schwinde

### Contact

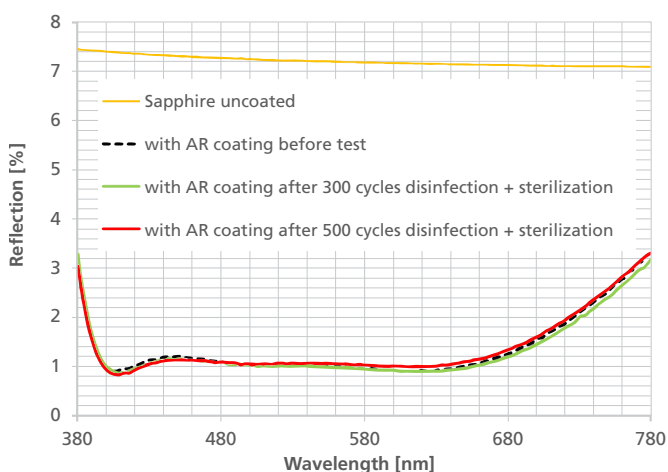
Dr. Peter Munzert  
Phone +49 3641 807-271  
peter.munzert@iof.fraunhofer.de

Schichtmaterialien und mittels verschiedener Abscheidemethoden hergestellt wurden, geeignete Materialpaarungen für eine Interferenzschicht-Entspiegelung gefunden werden. Dank geschickter Anpassungen von Schichtabfolge und Schichtdicken wurde aus diesen Materialien ein Mehrlagen-Coating hergestellt, das einerseits eine gute Entspiegelungswirkung im sichtbaren Spektralbereich aufweist, gleichzeitig aber auch die geforderte Stabilität gegenüber den medizintechnisch relevanten Belastungen zeigte. Reale Endoskopfenster, die als Demonstratorobjekte beschichtet wurden, überstanden 500 Desinfektions- und Sterilisationszyklen ohne Schaden.

Momentan wird von einem der Projektpartner die Möglichkeit eines Transfers der Projektergebnisse in die Serienfertigung von Endoskopen in Erwägung gezogen.

thicknesses, a multilayer coating was produced from these materials which not only exhibited a good antireflection effect in the visible spectral range but also showed the required stability against the medically relevant loads. Real endoscope windows, which were coated as demonstrator objects, survived 500 disinfection and sterilization cycles without damage.

At present, one of the project partners is considering the possibility of transferring the project results to a series production of endoscopes.



[2] Gemessene Reflexion einer Saphir Testscheibe mit AR-Coating vor und nach 300/500 Beanspruchungszyklen Desinfektion und Sterilisation (links), Testscheibe nach 500 Beanspruchungszyklen (rechts). / Reflection of a sapphire test sample coated with AR coating, measured before and after 300/500 disinfection and sterilization cycles (left), photo of the sapphire sample after 500 cycles (right).



[1] Rauheits- und Defektsensor für Freiformoberflächen mit Partikel-/Defektkarte (a) sowie Mikroskopbildern (b,c) eines Metallspiegels (120x70 mm<sup>2</sup>). / Roughness and defect sensor for freeform surfaces with particle/defect map (a) and microscopy images (b,c) of a metal mirror (120x70 mm<sup>2</sup>).

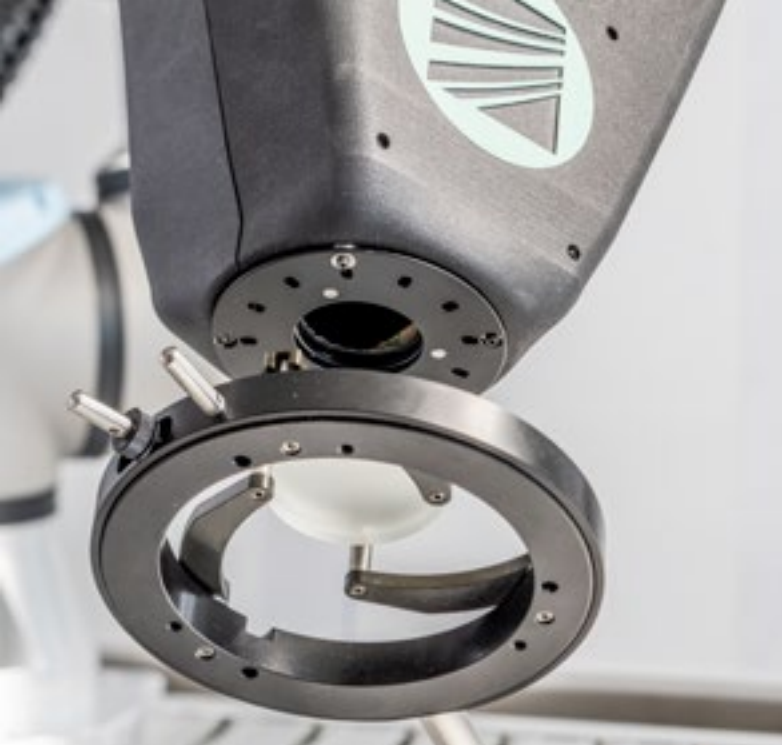
## Partikel- und Schichtwachstumsanalyse in der Optikfertigung / Particle and thin film growth inspection in optics fabrication

Neben ästhetischen Aspekten können Partikel und Verunreinigungen die Leistung optischer Systeme stark beeinflussen. Beispiele hierfür sind Leistungs- und Kontrastverluste durch Lichtstreuung oder die Verringerung von Laserstabilität und Schichthaftung. Während der zahlreichen Fertigungs- und Integrationsschritten bei der Realisierung optischer Systeme lassen sich Verunreinigungen allerdings nie zu 100 % vermeiden. Kritisch in diesem Zusammenhang sind Beschichtungsprozesse, da Partikel auf Substraten oder auch Partikel während des Beschichtungsvorganges durch die Beschichtung verstärkt werden können. Eine prozessbegleitende Charakterisierung von Partikeln, Defekten und Verunreinigungen ist daher von grundlegender Bedeutung für die Herstellung von High-End-Optiken. Eine Herausforderung stellt dabei die in-situ Integration und die oftmals großen und komplexen geformten Oberflächengeometrien dar.

Daher wurde ein Hybridsensor entwickelt, der die Charakterisierung von Lichtstreuung mit Mikroskopie kombiniert. Die schnell zugänglichen und hochempfindlichen Streulichtinformationen können zur Analyse der Oberflächenrauheit, von Defekten und Partikeln bis hin zu Partikelgrößen von  $\varnothing < 500$  nm genutzt werden. Die hohe Vibrationsunempfindlichkeit der Messtechnik erlaubt es, diese mit einem Roboter zu kombinieren und damit selbst große Freiformflächen zu charakterisieren (Abb. 1). In einem zweiten Schritt

In addition to aesthetic aspects, particles and contamination can quickly limit the performance of optical systems. Typical examples are the introduction of light scattering or the reduction of the laser stability and coating bond strength. During the numerous fabrication and integration steps involved in the realization of optical systems, contaminations are never completely avoidable. A very critical fabrication step is the coating process because particles on the substrate or those deposited during coating can be enhanced by the thin film. Particle characterization thus becomes fundamental in high-end optics fabrication. While this can be realized on small test samples, this becomes a challenge on large and complex-shaped surfaces in combination with an in-situ characterization as required during coating processes.

Therefore, a hybrid sensor that combines light scattering techniques with microscopy has been developed. The fast and highly sensitive scattering information is used to characterize the surface roughness, defects, and particles down to particle sizes of  $\varnothing < 500$  nm. The high vibration insensitivity also allows combining the technique with a robot to characterize freeform surfaces (Fig. 1). In a second step, a microscope is used to determine the shape of the particles at positions with high scattering signals. Thus, in addition to the contamination-induced scattering



### Authors

Tobias Herffurth  
Alexander Bergner  
Michael Scheler  
Stefan Schwinde  
Marcus Trost

### Contact

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

wird ein Lichtmikroskop verwendet, um die Form der Partikel an Positionen mit hohen Streusignalen zu bestimmen. Damit ist neben der kontaminationsinduzierten Streuverteilung auch die geometrische Defekt- und Partikelklassifizierung nach ISO14997/10110-7 zugänglich.

Im letzten Jahr wurde der Sensor in eine Magnetron-Sputter-Beschichtungsanlage integriert. Unter Aufrechterhaltung des Vakuums kann die Rauheitsentwicklung und das Partikelwachstum während der Abscheidung überwacht werden. Dies ist in Abbildung 2 für verschiedene Metallspiegel dargestellt. Auf diese Weise lässt sich der genaue Zeitpunkt bestimmen, zu dem die dünnen Metallschichten geschlossen sind und keine Pinholes aufweisen, gleichzeitig aber noch nicht so dick sind, dass rauheitserhöhende Wachstumsprozesse eingesetzt haben. Somit lassen sich extrem glatte Metallbeschichtungen herstellen. Der Sensor kann auch dazu verwendet werden, um verschiedene Reinigungsstrategien zur Reduzierung von Partikeln und Verunreinigungen zu kontrollieren.

Da der Streulichtansatz für nahezu alle optisch relevanten Fehler empfindlich ist, kann der Sensor auch in der gesamten Fertigungskette vom Polieren über die Reinigung bis zur Systemintegration prozessnah oder gar im Prozess eingesetzt werden.

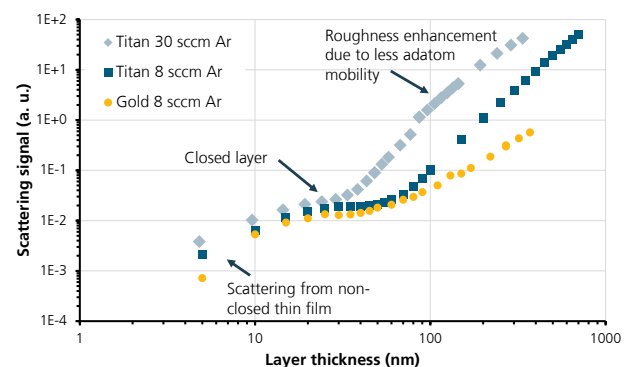
### Literatur / References

[1] T. Herffurth et al.: Light Scattering from Contamination and Defects - Measurement, Analysis, and Modelling, EPJ Web Conf. 266 03012 (2022).

distribution, a geometrical defect and particle classification according to ISO14997/10110-7 is also accessible.

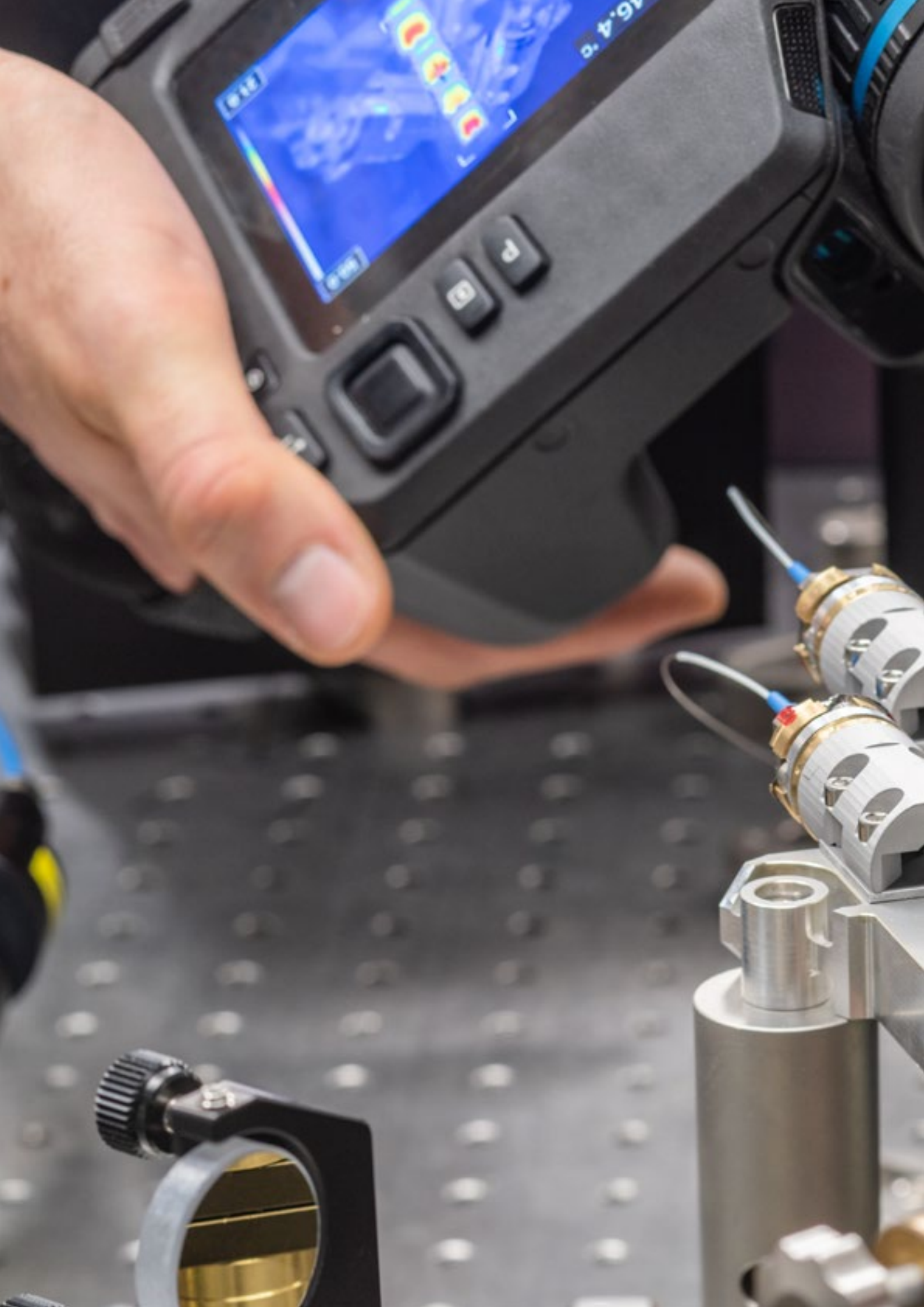
In the last year, the sensor was integrated into a magnetron sputtering coating system. While maintaining the vacuum, the roughness evolution and particle growth during deposition can be monitored as exemplified for different metal mirrors in figure 2. This enables the determination of the exact time at which the thin metal films are closed and do not exhibit coating pinholes while not being so thick that roughness-increasing processes have started. It can also be used to control the impact of particles and contaminations and thus different cleaning strategies.

Because light scattering is sensitive to most optically relevant imperfections, the sensor can also be applied in or close to process steps over the entire fabrication chain from polishing over cleaning to system integration.



[2] *In-situ Streulichtmessung während Metallbeschichtung. / In-situ light scattering measurements during thin film deposition.*







Laser- und Fasertechnologie  
Laser and Fiber Technology

---



[1] Links: Matthias Heinzig bei der Entwicklung eines Lasersystems zum Datenaustausch über große Entfernungen. Rechts: Temperaturkontrolle im Testbetrieb. / Left: Matthias Heinzig developing a laser system for long-distance data exchange. Right: Temperature control in test operation.

## Spektrale Kombinationseinheit für die satellitengestützte Laserkommunikation / Spectral combining unit for satellite-based laser communication

Die satellitengestützte Laserkommunikation ermöglicht eine stark gerichtete Übermittlung von Daten über große Distanzen. Dabei werden derzeit Kommunikationsnetze für die Übertragung sowohl von der Erde zu Satelliten als auch von Satelliten untereinander aufgebaut. Durch die Nutzung stark gebündelter Strahlen hoher Leistung ist sogar eine Verbindung zum Mond oder noch weiter entfernten Planeten denkbar. Um die Datenrate über die Grenzen der Modulation eines Lasers zu skalieren, sollen analog zur erdgebundenen faseroptischen Kommunikation spektrale Multiplexverfahren (WDM: wavelength division multiplexing) eingesetzt werden. Da damit die verschiedenen spektralen Informationskanäle in einem Strahl gebündelt werden, wird nur ein Sendeteleskop benötigt und reduziert damit zum einen den materiellen Aufwand sowie Gewicht und sorgt zum anderen dafür, dass die Übertragung nicht durch aufwendige Justage einzelner Sendesysteme gestört wird. Das Fraunhofer IOF entwickelt gemeinsam mit der ESA (European Space Agency) im Rahmen des ARTES 4.0 Programms eine Einheit zur spektralen Kombination von fünf Lasersystemen hoher Leistung von 20 W pro Kanal im Bereich von 1,5  $\mu\text{m}$  Wellenlänge – zielgerichtet für die spätere Anwendung unter Weltraumbedingungen (Abb. 3). Die Forschung und Entwicklung erstreckt sich bei diesem Projekt über die gesamte Prozesskette: von der Auswahl der Materialien über die Konstruktion aller Baugruppen bis hin zur Integration speziell gefertigter Komponenten. Die Herausforderungen

Satellite-based laser communication enables highly directional transmission of data over long distances. Communication networks are currently being set up for transmission both from the Earth to satellites and from satellites to each other. By using highly collimated beams of high power, it is even conceivable to connect to the Moon or even farther away planets. To scale the data rate beyond the limits of the modulation of a laser, spectral multiplexing techniques (WDM - wavelength division multiplexing) are to be used in analogy to terrestrial fiber-optic communication. Since the different spectral information channels are bundled in one beam, only one transmitting telescope is required, thus reducing material costs and weight on the one hand and ensuring that the transmission is not disturbed by complex adjustment of individual transmitting systems on the other. Together with the ESA (European Space Agency), Fraunhofer IOF is developing a unit for the spectral combination of five laser systems of high power (20 W per channel) in the range of 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength – targeted for later application under space conditions – within the ARTES 4.0 program. The research and development in this project cover the entire process chain, from the selection of materials to the design of all assemblies and the integration of specially manufactured components. The challenges lie in the high demands of spectral communication in terms of single channel bandwidth, spectral channel density as well as the high optical power to be controlled and the associated stress on the



### Authors

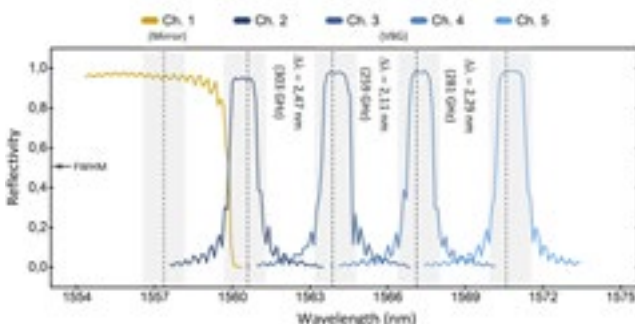
Matthias Heinzig  
Thomas Schreiber  
Till Walbaum

### Contact

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

liegen hierbei auf den hohen Anforderungen der spektralen Kommunikation hinsichtlich der Einzelkanalbandbreite, spektraler Kanaldichte sowie der zu kontrollierenden hohen optischen Leistung und der damit verbundenen Belastung der Materialien. Mittels der Volumen-Bragg-Gittertechnologie werden fünf Quellen unterschiedlicher Wellenlänge miteinander spektral kombiniert. Besonders herausfordernd hierbei ist der mit 1,3 nm sehr geringe spektrale Abstand der Kanäle zueinander. Im Gegensatz zu dichroitischen Schichten ermöglichen Volumen-Bragg-Gitter (VGB) eine hohe Reflektivität bei gleichzeitig sehr steilen spektralen Kanten mit einer Steilheit von  $< 400 \text{ pm} (90/10 \%)$ . Dementsprechend können mehrere Kanäle sehr dicht gepackt werden und erweitern die Bandbreite des kombinierten Strahls linear um die Anzahl der Kombinationen (Abb. 2). Ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist die hohe spektrale Flexibilität und Skalierbarkeit mit weiteren Kanälen – limitiert durch die kombinierte maximale Leistung. In Anbetracht des Einsatzgebiets wurde bei der Entwicklung des Systems eine hohe mechanische Steifigkeit bei geringstmöglichen Volumen und Gewicht angestrebt.

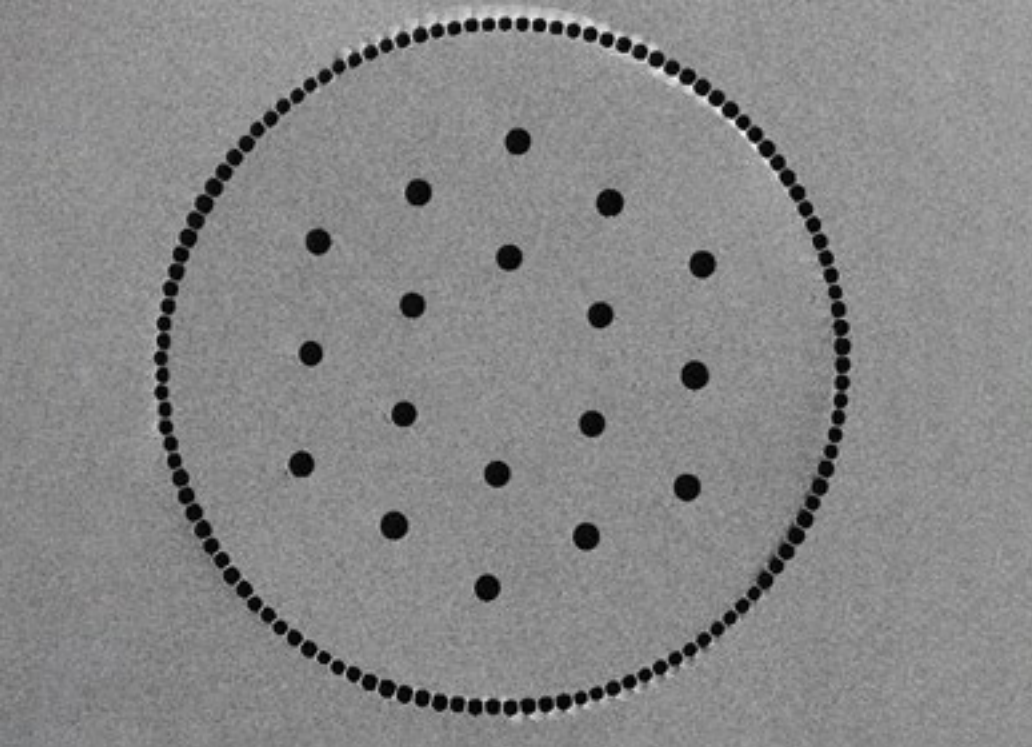
materials. Using volume Bragg grating technology, five sources of different wavelengths are spectrally combined. Particularly challenging here is the very small spectral spacing between the channels of 1.3 nm. In contrast to dichroic layers, volume Bragg gratings (VGB) allow high reflectivity while maintaining very steep spectral edges with a slope of  $< 400 \text{ pm} (90/10 \%)$ . Accordingly, multiple channels can be packed very tightly, extending the bandwidth of the combined beam linearly by the number of combinations (Fig. 2). A major advantage of this technology is the high spectral flexibility and scalability with additional channels – limited by the combined maximum power. Considering the field of application, the system was designed to achieve high mechanical stiffness with the lowest possible volume and weight.



[2] Spektren der Reflektivität der einzelnen VGB's (blau) und des Spiegels (gelb) für Kanal 1. / Spectra of the reflectivity of the individual VGBs (blue) and the mirror (yellow) for channel 1.



[3] CAD-Modell der spektralen Kombinationseinheit für fünf Kanäle fasergekoppelte Kanalquellen. / CAD model of spectral combination unit for five channels fiber coupled channel sources.



[1] Rastermikroskopaufnahme der in-house LPF inklusive Airclad (links). Foto des Faserziehprozesses (rechts). / Scanning micrograph of in-house LPF including airclad (left). Photo of fiber drawing process (right).

## Neue Erkenntnisse zu Modeninstabilitäten in polarisationserhaltenden und Large Pitch Fasern / New insights into mode instabilities in polarization-maintaining and large-pitch fibers.

Die Leistungskalierung von Faserlasern ist bis heute eine große Herausforderung. Eine wesentliche Limitierung stellt die thermisch induzierte transversale Modeninstabilität (TMI) dar. Diese führt zur zeitlich instabilen Degradation des Ausgangssignals. Seit der ersten Beobachtung dieses Effektes 2010 wurde das Phänomen intensiv untersucht. Herausfordernd dabei ist der Zugriff auf Testfasern und Charakterisierungstechniken, die systematische Untersuchung relevanter Parameter ermöglichen. Daher sind bis heute zunächst simpel erscheinende Parameterabhängigkeiten nicht abschließend geklärt. Im Fasertechnologiezentrum konnten die Expertisen der Fasertechnologie und Faserlaserentwicklung gebündelt werden, um die bisher ungeklärten Fragen nach der Abhängigkeit der TMI-Schwelle vom Modenfelddurchmesser und vom Polarisationszustand zu klären. Mit der Entwicklung einer polarisationserhaltenden Faser, die in einem Hochleistungsfaserverstärker polarisationsselektiv charakterisiert wurde, konnte erstmals demonstriert werden, dass die Stabilität des verstärkten Signals signifikant vom Polarisationswinkel des linear polarisierten Eingangssignals abhängt. Die Stabilität wird in Abbildung 1 durch die Standardabweichung des zeitlichen Leistungsentwicklung dargestellt. Bei einem Polarisationswinkel von  $0^\circ$  ist das Eingangssignal parallel zur ersten Hauptpolarisationsachse (slow-axis) polarisiert, bei  $90^\circ$  entsprechend parallel zu zweiten Hauptpolarisationsachse (fast-axis). Ein Minimum der TMI-Schwelle wurde

Power scaling of fiber lasers is still challenging today. A major limitation is the thermally induced transverse mode instability (TMI). This leads to temporally unstable degradation of the output signal. Since the first observation of this effect in 2010, the phenomenon has been intensively studied. Challenging here is the access to test fibers and characterization techniques that allow systematic investigation of relevant parameters.

Therefore, parameter dependencies that initially appear simple have not been conclusively clarified to date. In the Fiber Technology Center, the expertise of fiber technology and fiber laser development could be bundled to clarify the so far unresolved questions about the dependence of the TMI threshold on the mode field diameter and the polarization state. The development of a polarization-maintaining fiber, polarization-selectively characterized in a high-power fiber amplifier, demonstrated for the first time that the stability of the amplified signal depends significantly on the polarization angle of the linearly polarized input signal. The stability is represented in figure 1 by the standard deviation of the power evolution over time. At a polarization angle of  $0^\circ$ , the input signal is polarized parallel to the first main axis of polarization (slow-axis), and at  $90^\circ$  it is correspondingly polarized parallel to the second main axis of polarization (fast-axis). A minimum of the TMI threshold was found for  $0^\circ$  input polarization (increased standard deviation



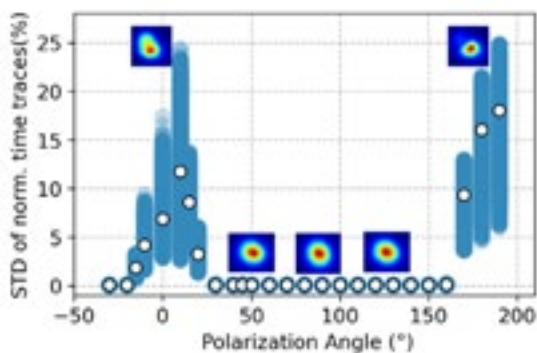
### Authors

Nicoletta Haarlammert  
Gonzalo Palma-Vega  
Denny Häßner  
Sobhy Kholaf  
Cesar Jauregui

### Contact

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

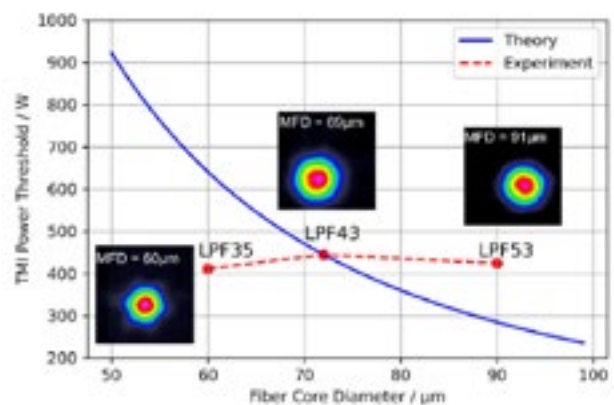
für 0°-Eingangspolarisation gefunden (erhöhte Standardabweichung in Abb. 1). Mit einer weiteren in-house Faserrealisierung – einer Large Pitch Faser (LPF) – konnte mit Demonstration von bis zu 450 W Ausgangsleistung bei exzellenter Strahlqualität und Modenfelddurchmessern von  $>90 \mu\text{m}$  ein neuer Hochleistungsrekord aufgestellt werden. Darüber hinaus stand mit dieser Faser in verschiedenen Durchmesser Ausführungen erstmals Testfasern mit variierenden Kerndurchmessern bei konstanten Führungsbedingungen zur Verfügung. Die Frage nach der Abhängigkeit der TMI-Schwelle vom Kerndurchmesser der Faser konnte damit anschließend wie folgt geklärt werden: Die Experimente zeigen, dass die TMI-Schwelle – anders als teilweise kontrovers diskutiert – nicht vom Kerndurchmesser der Faser abhängt (Abb. 2). Beide Erkenntnisse liefern einen wertvollen Erkenntnisgewinn für das Verständnis des Phänomens der transversalen Modeninstabilität. Darauf aufbauend können neue Konzepte zur Hochleistungskalierung von Faserlasern entwickelt werden.



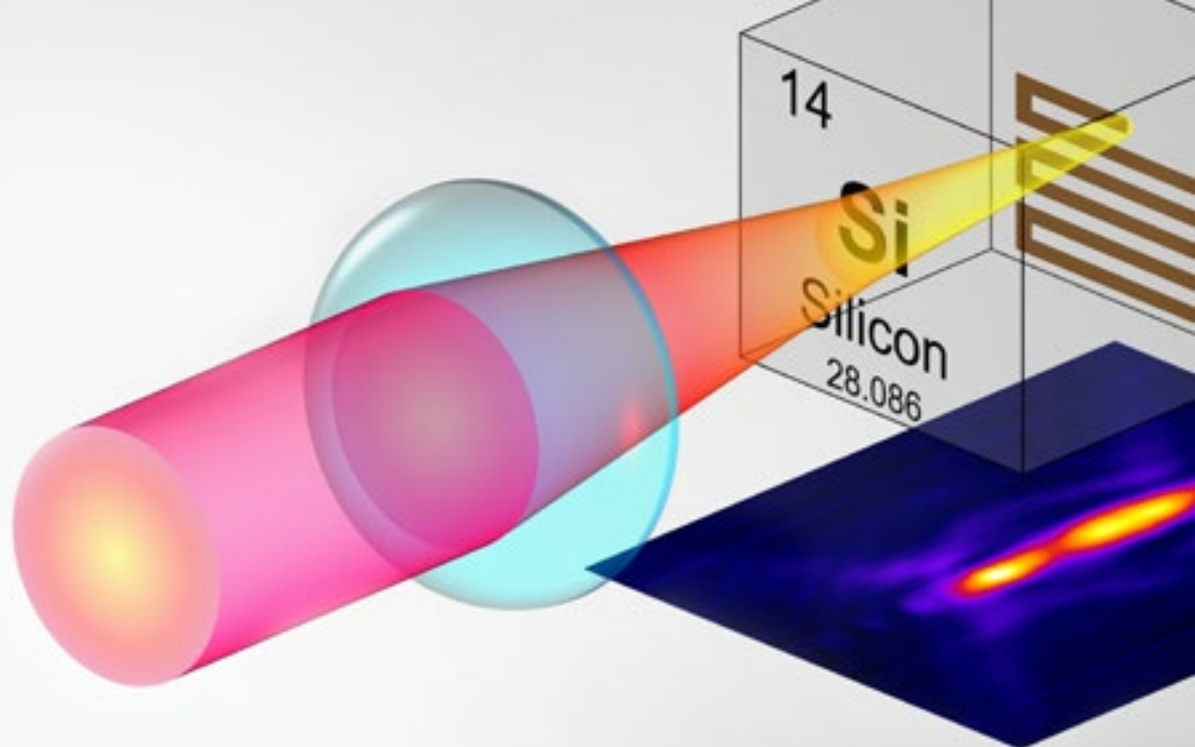
[2] Zeitliche Stabilität des Modenprofils eines Faserverstärkers in Abhängigkeit vom linearen Polarisationswinkels des Seedsignals. / Temporal stability of the mode profile of a fiber amplifier as a function of the linear polarization angle of the seed signal.

in fig. 1). With another in-house fiber realization - a large-pitch fiber (LPF) - a new high power record was set with a demonstration of up to 450 W output power with excellent beam quality and mode field diameters of  $>90 \mu\text{m}$ . In addition, this fiber in various diameter versions was the first to provide test fibers with varying core diameters under constant guiding conditions. The question of the dependence of the TMI threshold on the core diameter of the fiber could thus subsequently be clarified as follows: The experiments show that the TMI threshold does not depend on the core diameter of the fiber - contrary to what has been controversially discussed in some cases (Fig. 2).

Both findings provide valuable insight into the understanding of the phenomenon of transverse mode instability. Based on this, new concepts for high-power scaling of fiber lasers can be developed.



[3] TMI Grenzwert in Abhängigkeit vom Kerndurchmesser der in-house LPF. / TMI threshold as a function of the core diameter of the in-house LPF.



[1] Untersuchung der nichtlinearen Propagation von ultrakurzen Laserpulsen in Silizium für Anwendungen der Rückseitenbearbeitung. / Investigation of nonlinear propagation of ultrashort laser pulses in silicon for back surface processing applications.

## Rückseitenbearbeitung von Silizium mit Ultrakurzpulslasern Through-silicon ultrashort pulse laser processing

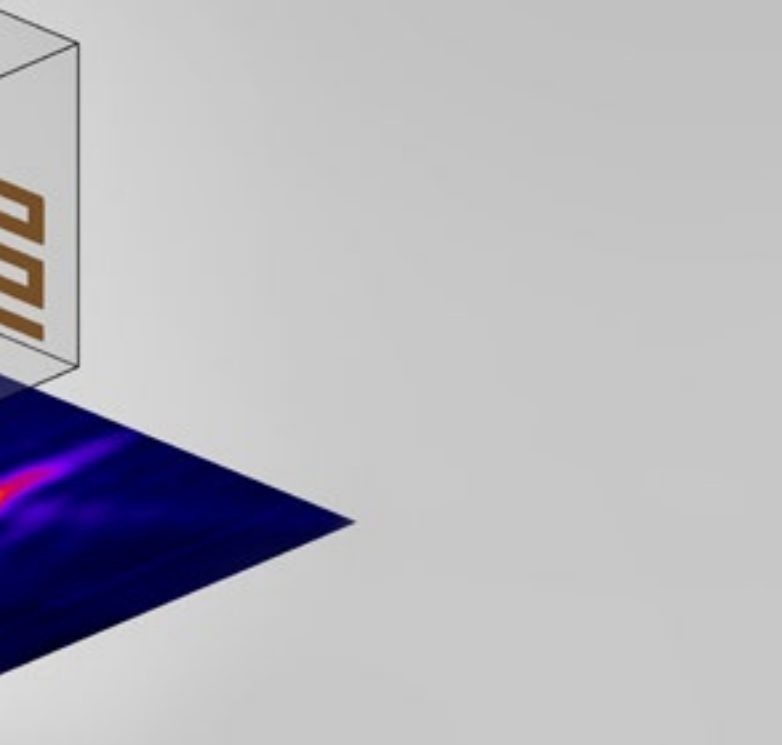
Silizium ist das Rückgrat der Halbleiterindustrie. Eine gezielte Volumen- oder Rückseitenstrukturierung mit ultrakurzen Laserpulsen, wie sie bei Gläsern in zahlreichen Anwendungen etabliert ist, scheitert in der Regel bei Silizium aufgrund der starken Nichtlinearitäten /1/. So stellen nichtlineare Ausbreitungseffekte eine extrem große Hürde dar, um die Energie insbesondere an der Rückseite in ausreichendem Maße zu deponieren. Um dies Problem zu lösen, haben wir zunächst die nichtlineare Propagation von ultrakurzen Infrarot-Laserpulsen in Silizium detailliert untersucht (Abb. 1). Darauf aufbauend konnten Bearbeitungstechniken entwickelt werden, die in unterschiedlichen Anwendungen innovative Applikationen ermöglichen.

Dies betrifft einerseits das Fügen von Silizium mit Metall. Dazu wurden infrarote Pulse mit 10 ps Dauer auf die Grenzfläche zwischen Silizium und dem Metall fokussiert, wodurch es zur lokalen Erwärmung und zum Verschweißen kommt (Abb. 2a, /2/). Das Verfahren konnte auf das Fügen von Silizium-Silizium erweitert werden, indem eine dünne metallische Schicht auf einer der beiden Proben abgeschieden wird (Abb. 2b, /3/). In beiden Untersuchungen wurden Scherfestigkeiten von >2 MPa gemessen. Diese Werte sind zu herkömmlichen Verbindungsmethoden konkurrenzfähig, wobei zudem chemische Reaktionen, Alterung und Ausgasung vermieden werden.

Silicon is the backbone of today's semiconductor industry. However, ultrafast laser bulk or back surface processing of silicon, as established for glasses for various applications, is problematic due to strong nonlinearities /1/. Nonlinear propagation effects represent a near-overwhelming challenge to deposit energy at the exit surface of silicon at sufficient levels for envisioning applications. To overcome this challenge, the nonlinear propagation of infrared ultrashort laser pulses in silicon has been investigated in detail (Fig. 1). Two innovative techniques showing considerable potential in various fields have been developed.

First, by relocating the energy deposition at the exit surface of silicon, silicon–metal ultrafast laser welding has been demonstrated with 10-ps IR pulses (Fig. 2a, /2/). This technique has also been adapted to silicon-silicon welding by depositing a metallic nanolayer at the surface of one of the samples (Fig. 2b, /3/). In both configurations, shear joining strengths >2 MPa have been measured, which are comparable to values obtained with traditional bonding methods. The major advantage of the developed adhesive-free laser welding technique is that chemical reactions, aging, and outgassing are avoided.

Second, by employing IR Bessel beams with 25 ps pulse duration, the back surface of crystalline silicon has been amorphized (Fig. 2c and 2e, /4/). This relatively long pulse



### Authors

Maxime Chambonneau  
Markus Blothe  
Stefan Nolte

### Contact

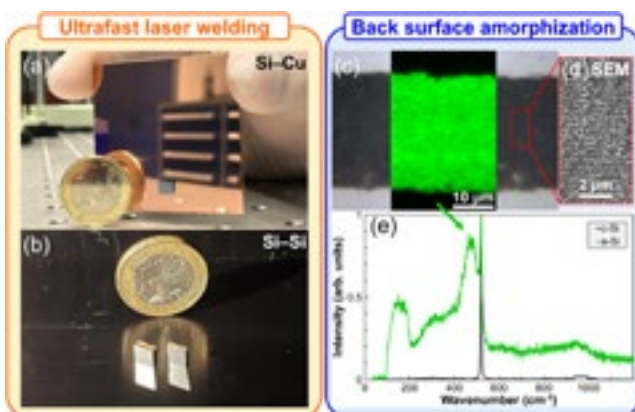
Prof. Dr. Stefan Nolte  
Phone: +49 3641 9-47820  
stefan.nolte@uni-jena.de

Als weitere Anwendung wurde durch den Einsatz von IR-Bessel-Strahlen mit 25 ps Pulsdauer die Rückseite von kristallinem Silizium amorphisiert (Abb. 2c und 2e, /4/). Die relativ lange Pulsdauer verringert dabei die Nichtlinearitäten drastisch, was es erlaubt, die Modifikationsschwelle zu überschreiten. Während solche Laseramorphisierung von Silizium bisher auf die Vorderseite beschränkt war, bietet dieser Ansatz neue Möglichkeiten für die gezielte Anpassung mikroelektronischer Bauelemente. Zusätzlich wurden im amorphisierten Bereich (Abb. 2d) periodische Nanostrukturen beobachtet, die zur Polarisationskontrolle von Licht genutzt werden können.

duration drastically diminishes the nonlinearities so that the modification threshold is overcome. While laser amorphization of silicon was so far restricted to the front surface, this demonstration offers new perspectives for tailoring the properties of in-built microelectronic devices. Additionally, periodic nanostructures have been observed in the amorphized area (Fig. 2d), which can advantageously be utilized for polarization control of light.

### References / Literatur

- /1/ M. Chambonneau et al.: In-Volume Laser Direct Writing of Silicon—Challenges and Opportunities, *Laser & Photonics Reviews*, 15, 2100140 (2021).
- /2/ M. Chambonneau et al.: Taming ultrafast laser filaments for optimized semiconductor-metal welding, *Laser & Photonics Reviews*, 15, 2000433 (2021).
- /3/ M. Chambonneau et al.: Ultrafast laser welding of silicon, *Advanced Photonics Research* 4, 2200300 (2023).
- /4/ M. Blothe et al.: Nanostructured back surface amorphization of silicon with picosecond laser pulses, *Applied Physics Letters* 121, 101602 (2022).



[2] Anwendungen der Rückseitenbearbeitung von Silizium mit ultrakurzen Laserpulsen. / Through-silicon ultrashort pulse laser processing applications.



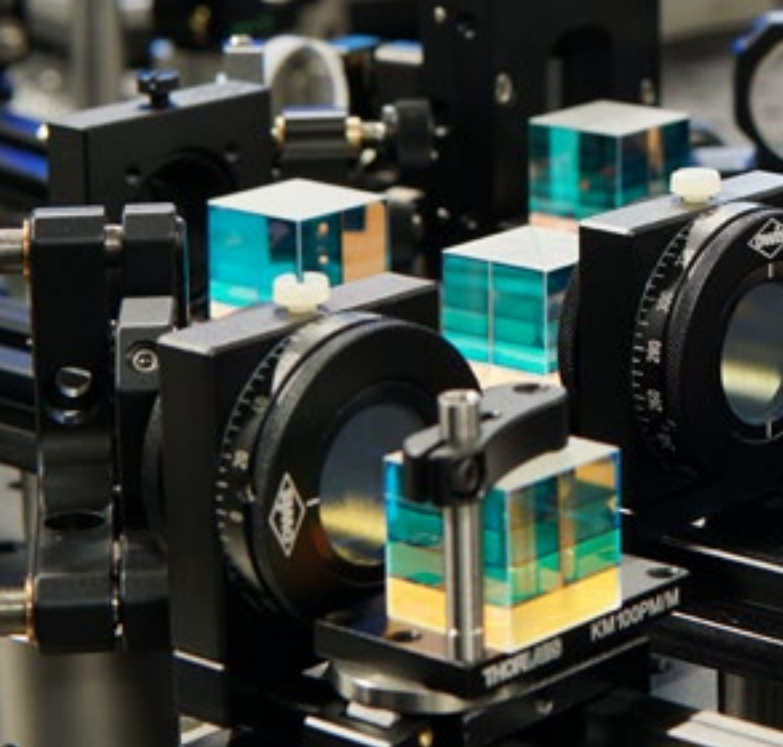


[1] Strahlauflteilung in vier Messkanäle, welche simultan von Photodioden und einer Hochgeschwindigkeitskamera detektiert werden. / Division-of-amplitude polarisation detection with four channels simultaneously measured by photodiodes and a high-speed camera.

## Ultraschnelles, abbildendes Polarimeter High-speed imaging polarimeter

Polarisationsmessungen sind notwendig für eine Vielzahl von Anwendungen, wie beispielsweise in der Bauteilanalyse, Mikroskopie oder Interferometrie. Es gibt nicht-abbildende und abbildende Polarimeter mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen hinsichtlich des Informationsgehalts, der Geschwindigkeit, Auflösung und Robustheit [1]. Für schnelle Messungen muss auf langsame, rotierende Elemente verzichtet und die Leistung auf mehrere Detektoren aufgeteilt werden [2]. Dann werden die erreichbaren Messgeschwindigkeiten in der Regel durch die verwendeten Photodetektoren bestimmt. Bislang waren ultraschnelle Polarisationsmessungen nicht-abbildenden Verfahren basierend auf schnellen Detektoren wie Photodioden vorbehalten, während abbildende Verfahren nur wenige hundert Bilder pro Sekunde erlaubten. Manche Anwendungen erfordern jedoch um Größenordnungen schnellere, räumlich-aufgelöste Polarisationsmessungen, wie beispielsweise die Untersuchung transversaler Modeninstabilitäten in Faserlasern. Dieser nichtlineare, thermo-optische Effekt resultiert in einem mit mehreren kHz fluktuierenden Ausgangsstrahl, der dadurch für viele Laserapplikationen ungeeignet wird. Grund hierfür sind dynamische Interferenzen der verschiedenen geführten Fasermodes. Für solche Anwendungen wurde am Fraunhofer IOF ein abbildendes Hochgeschwindigkeitspolarimeter realisiert. Das Polarimeter erlaubt eine vollständige Polarisationsanalyse im Sinne der simultanen Bestimmung aller vier Stokes Parameter. Dafür wird der zu charakterisierende Laserstrahl zunächst in vier Kanäle aufgeteilt, welche durch unterschiedliche polarisationsbeeinflussende Elemente propagieren und anschließend gleichzeitig detektiert werden [2]. Für die größtmögliche Flexibilität werden

Polarization measurements are necessary for a variety of applications, such as in component analysis, microscopy, and interferometry. There are non-imaging and imaging polarimeters with different strengths and weaknesses in terms of information content, speed, resolution, and robustness [1]. For fast polarization measurement, slow-rotating elements must be avoided, and a division-of-amplitude approach should be chosen instead [2]. In that case, the achievable measurement speeds are determined usually by the photodetectors used. Until now, ultrafast polarization measurements were exclusive to non-imaging methods based on fast detectors such as photodiodes, while imaging systems allowed only a few hundred frames per second. However, sometimes orders of magnitude faster spatially-resolved polarization measurements are required, such as for the study of transverse mode instabilities in fiber lasers. This nonlinear, thermo-optical effect results in an output beam that fluctuates at several kHz, making it unsuitable for many laser applications. The reason for this is the dynamic interference of different guided fiber modes. For such applications, an imaging high-speed polarimeter was realized at Fraunhofer IOF. This polarimeter allows a complete polarization analysis in the term of simultaneous determination of all four Stokes parameters. For this purpose, the laser beam is first divided into four channels, which propagate through different polarization-influencing elements and are subsequently detected simultaneously [2]. For the greatest possible flexibility, the beams are not only measured on four ultrafast photodiodes but also collectively imaged onto a high-speed camera. Fraunhofer IOF polarimeter thereby enables the measurement of spatially averaged polarization fluctuations in the MHz range as well as spatially



### Authors

Friedrich Möller  
Florian Grimm  
Till Walbaum  
Thomas Schreiber

### Contact

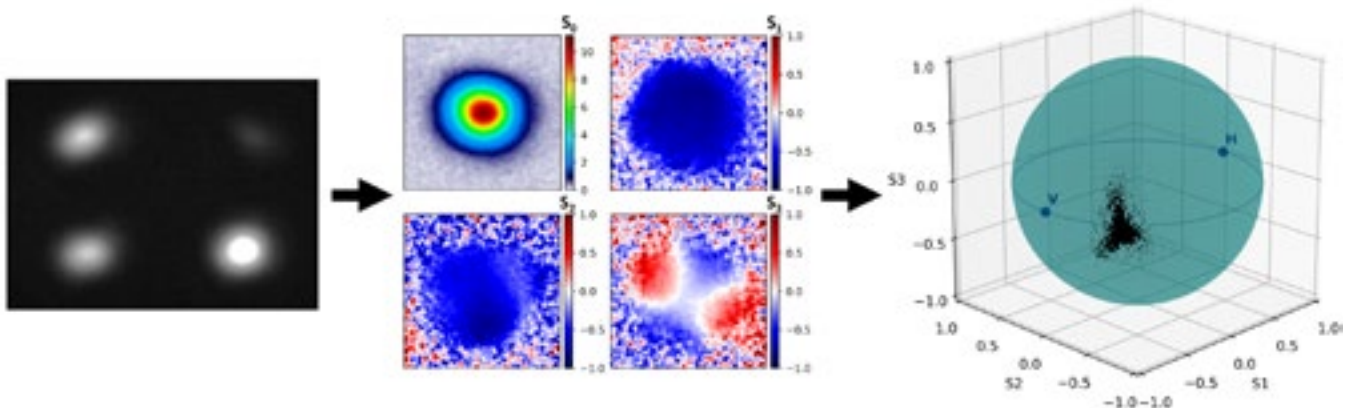
Dr. Till Walbaum  
Phone: +49 3641 807-705  
till.walbaum@iof.fraunhofer.de

die Teilstrahlen nicht nur auf vier ultraschnellen Photodioden vermessen, sondern ebenfalls gemeinsam auf einer Hochgeschwindigkeitskamera abgebildet. Mit dem IOF-Polarimeter sind dadurch sowohl die Messung räumlich gemittelter Polarisationschwankungen im MHz-Bereich, als auch abbildende Polarisationsdetektion im zweistelligen kHz-Bereich möglich. In einer nachträglichen, numerischen Auswertung können die Videos, Bild für Bild, durch einen Modenrekonstruktionsalgorithmus in ihre modalen Bestandteile zerlegt werden. Dadurch kann den angepassten Modenformen jeweils ein eigener Stokesvektor zugeordnet und deren Wechselwirkung auf sub-ms Zeitskalen untersucht werden. Die genaue Kenntnis oder gar aktive Kontrolle des Polarisationszustandes optischer Laserstrahlen ist ein fundamentaler Aspekt vielfältigster photonischer Anwendungen. Dank unseres neuartigen, ultraschnellen und abbildenden Polarimeters kann dieser so umfangreich wie nie zuvor in Rekordgeschwindigkeiten räumlich aufgelöst und für Faserlaser sogar modenaufgelöst charakterisiert werden.

resolved polarization detection in the two-digit kHz range. In a subsequent numerical evaluation, the recorded videos can be decomposed, frame by frame, into their modal components by a mode reconstruction algorithm. This allows the assignment of a separate Stokes vector to each of the fitted mode shapes and to investigate their interaction on sub-ms time scales. Accurate knowledge or even active control of the polarization state of optical laser beams is a fundamental aspect of many photonic applications. Thanks to our novel, ultrafast imaging polarimeter, it can be characterized spatially resolved - and for fiber lasers also mode-resolved - more extensively than ever before at record speeds.

### References / Literatur

- /1/ J. Scott Tyo et al.: Appl. Opt. 45, 5453-5469 (2006).
- /2/ R.M.A. Azzam, Optica Acta: International Journal of Optics, 29:5, 685-689 (1982).



[2] Vom Rohbild (links) zur Abbildung der vier Stokes-Parameter eines grundmodigen, nahezu linear polarisierten Laserstrahls (mitte) und deren intensitätsgewichtete Darstellung auf der Poincaré-Kugel (rechts). / From the raw image (left) to the Stokes-imaging of a singlemode, near linear polarized laser beam (middle) and an intensity-weighted representation on the Poincaré-sphere (right).





Bildgebung und Sensorik  
Imaging and Sensing

---



[1] Rekonstruiertes 3D-Modell eines Motorrads und zugehörige Trajektorie der Aufnahmebewegung. / Reconstructed 3D model of a motorcycle and associated trajectory of capturing motion.

## Mobiler 3D-Scanner für digitale Prozessketten Portable 3D sensor for digital process pipelines

Der Digitalisierung kann sich kaum ein Bereich des modernen Lebens mehr entziehen, aber eine erfolgreiche Umsetzung ist oft durch große Herausforderungen geprägt und von spezialisierten Lösungen abhängig. Das Fraunhofer IOF hat einen mobilen 3D-Scanner entwickelt, der Objekte unterschiedlichster Größe in die virtuelle Welt transferieren kann. Neben der Aufnahme von 3D-Topologien der Objekte werden auch die zugehörigen Farb- und Texturinformationen simultan erfasst und der 3D-Hülle ortsgenau hinzugefügt. Die batteriegestützte Stromversorgung und das geringe Gewicht von 1,3 kg erlauben den uneingeschränkten mobilen Einsatz des Systems und das große optische Messfeld von 1 m x 1 m verhilft zu einer Digitalisierung von Objekten mit mehreren Quadratmetern Oberfläche innerhalb von wenigen Minuten. Die 20 Megapixel RGB-Kamera erlaubt die Auflösung von Objektstrukturen, welche kleiner 1 mm sind. Zur Erreichung dieser Messergebnisse sind keine Vorbereitungen der Objekte oder die Anbringung von Markern notwendig.

Ein Alleinstellungsmerkmal des 3D-Scanners wird durch die Verwendung einer Tracking-Kamera erreicht. Die Kombination eines passiven Stereokameraaufbaus mit einer Inertial Measurement Unit (kurz IMU) erlaubt die Positionsbestimmung des 3D-Scanners innerhalb des Raums und bietet damit einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil bei der anschließenden Erstellung des 3D-Modells. Die Pipeline beginnt mit der Aufnahme der 2D-Bilddaten bis hin zum

Digitization has arrived in almost every area of modern life, requiring a wide variety of solutions depending on the digitization task at hand. Fraunhofer IOF has developed a mobile 3D scanner that can transfer objects of different sizes into the virtual world. In addition to capturing the 3D topologies of objects, the corresponding color and texture information is simultaneously captured and added to the 3D hull with spatial accuracy. The battery-supported power supply and the low weight of 1.3 kg enable unrestricted mobile use of the system and the large optical measuring field of 1 m x 1 m helps to digitize objects with several square meters of surface within a few minutes. The 20-megapixel RGB camera allows the resolution of object structures smaller than 1 mm. To achieve these measurement results, no preparation of the objects or application of markers is necessary.

A unique feature of the 3D scanner is the use of a tracking camera. The combination of a passive stereo camera setup with an Inertial Measurement Unit (IMU for short) enables the position of the 3D scanner within the room to be determined, thus offering a significant speed advantage in the subsequent creation of the 3D model. The pipeline starts with the acquisition of the 2D image data; 3D model generation is fully automated and requires no further user intervention. Furthermore, feedback is provided to the user by evaluating the motion parameters to achieve the highest possible image data quality and thus reconstruct an optimal



[2] 3D-Sensor mit aktivierten Ringlicht. /  
3D sensor with activated ringlight

#### Authors

Marc Preißler  
Dr. Christoph Munkelt  
Roland Ramm  
Kevin Srokos  
Dr. Peter Kühmstedt

#### Contact

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

3D-Modell ist vollständig automatisiert und erfordert keine weiteren Nutzereingriffe. Weiterhin wird dem Benutzer durch die Auswertung der Bewegungsparameter ein Feedback übermittelt, um eine möglichst hohe Bilddatenqualität zu erreichen und damit ein optimales 3D-Modell zu rekonstruieren. Das hierfür genutzte Human-Machine-Interface (HMI) des 3D-Scanners wird durch ein 5,5" Touchdisplay abgebildet, welches neben der Steuerung des Sensors auch Livebilddaten anzeigen kann.

Die Anwendungsgebiete des vom Fraunhofer IOF entwickelten 3D-Scanners sind vielfältig: Für industrielle Einsatzzwecke können verschiedene Qualitätsattribute, z. B. bei Wareneingangs- und Warenausgangsprüfungen, dokumentiert werden. Kulturgüter für Museen können digitalisiert werden und somit der Nachwelt in einem optimalen Zustand hinterlassen werden. Aber auch andere Objekte können aus der realen Welt in verschiedenste Anwendungen der Augmented oder Virtual Reality Welt überführt werden.

3D model. The human-machine interface (HMI) of the 3D scanner used for this purpose is represented by a 5.5" touch display, which can display live image data in addition to controlling the sensor.

The areas of application of the 3D scanner developed by Fraunhofer IOF are manifold: For industrial purposes, various quality attributes can be documented, e.g., during incoming and outgoing inspections. Cultural objects for museums can be digitized and thus passed into posterity in optimal condition. Additionally, other objects can be transferred from the real world into various applications of the augmented or virtual reality world.



[1] »goROBOT3D« in einer beispielhaften Anwendungsszene zur automatisierten Handhabung von transparenten Kunststoff-Würfeln. / "goROBOT3D" in an exemplary bin-picking scenario with plastic cubes that are difficult to measure.

## Raumlageerkennung transparenter Objekte für das automatisierte Handling / Detection of position and orientation of transparent objects for automatic handling

Die Oberflächenform nicht-kooperativer, d. h. transparenter, reflektierender oder schwarzer Objekte kann mit herkömmlichen optischen 3D-Sensoren, die im sichtbaren Spektralbereich (VIS) operieren, nur unzureichend oder gar nicht bestimmt werden. Ein neues Messsystem der Arbeitsgruppe 3D-Sensorik des Fraunhofer IOF, das den Ansatz »Scanning from Heating« verwendet, erlaubt erstmals die zuverlässige berührungslose Erfassung sowohl der Geometrie als auch der Lage von unkooperativen Objekten. In Kombination mit einem Industrieroboter können derartige Messobjekte automatisch und sicher gegriffen werden.

Bei dem von ihnen entwickelten Messprinzip erwärmen die Forschenden mithilfe eines 30-Watt-CO<sub>2</sub>-Lasers die Objekt-oberfläche lokal um wenige Kelvin, was für die Mehrzahl der Anwendungen unkritisch ist. Die daraufhin abgestrahlte Wärme wird mit zwei Thermografiekameras gemessen, deren Empfindlichkeit im langwelligen Infrarot bei einer Wellenlänge zwischen 7,5 und 12 Mikrometern liegt, sodass sonst störendes Umgebungslicht keine Rolle spielt. Die verwendete CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung wird in einen schmalen Streifen geformt und sequenziell über die Objekt-oberfläche gescannt. Innerhalb von drei Sekunden wird auf diese Weise eine Fläche von 250 × 200 mm<sup>2</sup> erfasst.

Detecting the surface shape of non-cooperative, i.e., transparent, shiny, or black objects is unreliable or even impossible by using conventional optical 3D sensors working in the visual spectral range. A novel measurement system, which has been developed by the Imaging and Sensing Department of Fraunhofer IOF and is based on the "scanning from heating" approach, allows for reliable detection of the position and orientation of uncooperative objects for the first time. In combination with an industrial robot, such objects can be gripped automatically and safely.

In their new measurement principle, the researchers use a 30-W CO<sub>2</sub> laser to heat locally the object surface by a few Kelvins, which is not critical for most applications. The object reemits the introduced heat, which is captured by two thermal cameras whose sensitivity is in the long-wave infrared at a wavelength between 7.5 and 12 micrometers, so that ambient light has no influence. The laser radiation is formed into a thin fringe and sequentially scanned over the measurement field of 250 × 200 mm<sup>2</sup> within three seconds. After capturing the complete scene, a 3D point cloud is reconstructed. In the following step, tangible surfaces for the robot can be derived from this 3D model to grab the object. While the robot arm is depositing the object at the final location, the next acquisition has already been started, so the total cycle time is reduced to a minimum.



[2] »goROBOT3D« zur Raumlageerkennung transparenter Objekte für das automatisierte Handling. /  
"goROBOT3D" to detect the position and orientation of transparent objects for automatic handling.

#### Authors

Henri Speck  
Martin Landmann  
Stefan Heist  
Peter Kühmstedt  
Gunther Notni

#### Contact

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

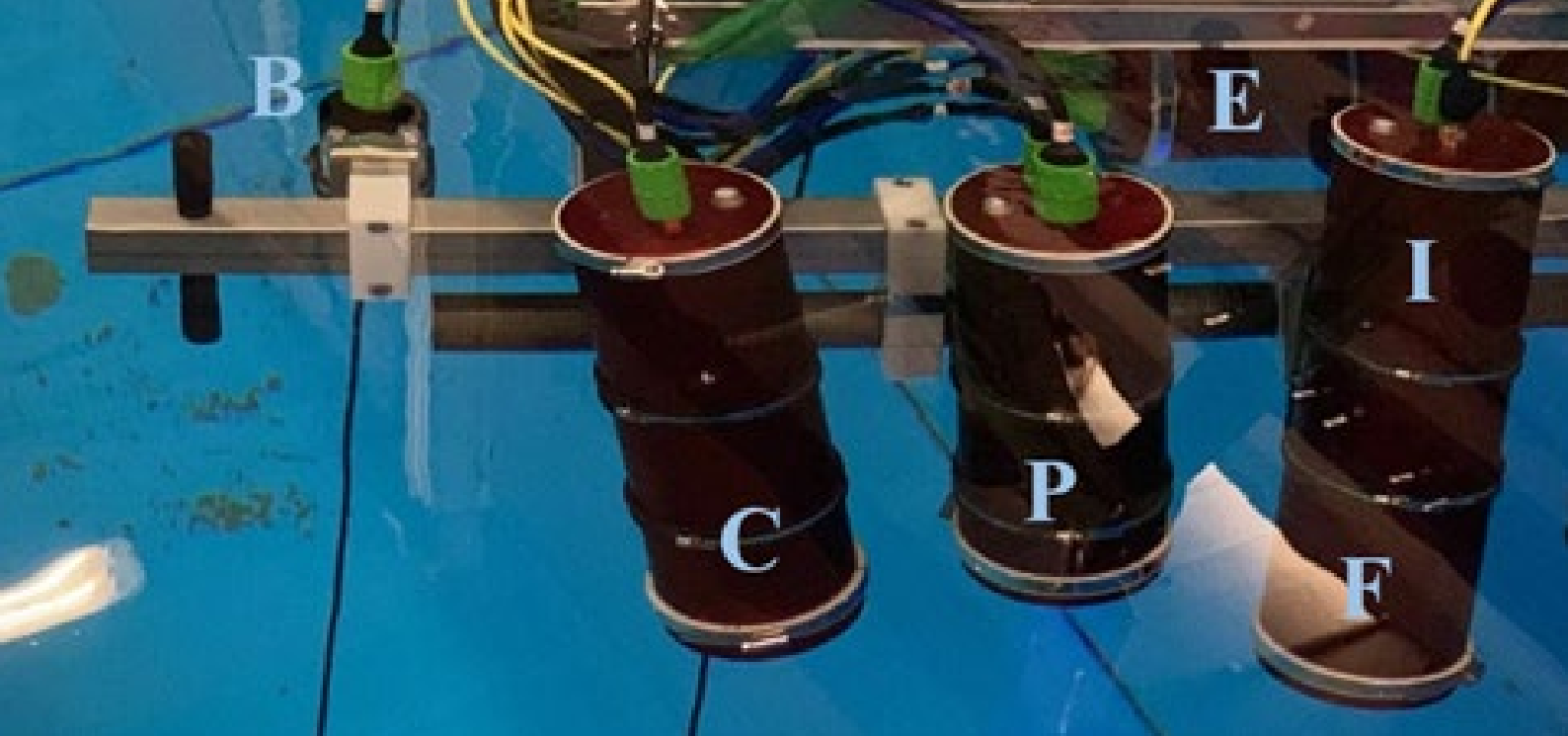
Nachdem die Aufnahme der gesamten Szene beendet ist, wird eine 3D-Punktwolke rekonstruiert. Aus dieser Punktwolke lassen sich in einem folgenden Schritt greifbare Flächen für den Roboter ableiten, die das Handling des Objekts ermöglichen. Während der Roboterarm das Objekt am Zielort ablegt, wird bereits die nächste Aufnahme gestartet, sodass die Zeit für den Gesamtprozess möglichst gering bleibt. In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Ilmenau wurde der Greifprozess für transparente Kunststoff-Würfel entwickelt. Durch eine Weiterentwicklung mit dem Ansatz des modellfreien Greifens kann das Messsystem inzwischen auch völlig unbekannte Strukturen erkennen und greifen. Der modellfreie Ansatz beruht auf einer Technik des maschinellen Lernens. Dabei wird ein künstliches neuronales Netz eingesetzt, welches Merkmale für lokale Bereiche des Tiefenbilds einer Szene extrahiert und anschließend die Erfolgswahrscheinlichkeit der Griffe an diesen Stellen bestimmt.

Das System mit der Bezeichnung »goROBOT3D« wurde als Demonstrator aufgebaut und auf verschiedenen Messen präsentiert. In weiteren Forschungsarbeiten sollen Kameras mit einer Bildrate von 1.000 fps zum Einsatz kommen, die eine Beschleunigung des Messverfahrens um eine Größenordnung versprechen. Mit der Integration von schnellen Wärmekameras für die Erfassung von 3D-Oberflächen löst das System ein langjähriges Problem der industriellen Bildverarbeitung und bietet verschiedene Anwendungsmöglichkeiten, wie beispielsweise die Entnahme transparenter Schüttgutteile aus einer Kiste.

In cooperation with the Ilmenau University of Technology, a gripping process for transparent plastic cubes was developed. By integrating a model-free gripping approach, the measurement system can now also recognize and grip completely unknown structures. The model-free approach is based on a machine-learning algorithm. It uses an artificial neural network that extracts features of local areas in the depth image of a scene and determines the probability of successful gripping at that location.

The measurement system, called "goROBOT3D", has been built as a demonstrator and presented at different trade fairs. In further research, cameras with a frame rate of 1,000 fps are to be used, which promises to accelerate the measurement process by an order of magnitude. By integrating high-speed thermal cameras for the detection of 3D surfaces, the system solves a long-standing problem in machine vision and offers a wide variety of applications, e. g., bin-picking of transparent bulk items from a box.





[1] Das Unterwasser-3D-Sensorsystem bestehend aus Messkameras (C), Blitzlichtern (B), Projektionseinheit (P), Elektronik-Steuerbox (E), Farbkamera (F) und IMU (I). / Underwater sensor system consisting of two measuring cameras (C), flashlights (B), projection unit (P), electronic control box (E), color camera (F), and IMU (I).

## Unterwasser-3D-Inspektion Underwater 3D inspection

Am Fraunhofer IOF wurde zusammen mit Partnern aus der Wirtschaft (SeaRenegy Offshore Holding GmbH and Cie. KG, Oktopus GmbH, 3++ GmbH) und der Universität Würzburg im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projekts ein neuartiges 3D-Unterwasser-Sensorsystem (für Inspektionsaufgaben) entwickelt. Das System ist für die Inspektion von Unterwasserstrukturen wie Öl- oder Gaspipelines, Fundamente von Windkraftanlagen oder anderen Strukturen für den Tiefseeinsatz konzipiert. Das System ist zur Montage an ein ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug (ROV) gedacht und kann bis zu 60 3D-Datensätze pro Sekunde liefern und zu einem 3D-Modell des Messobjektes verarbeiten. Dabei kann das ROV mit Geschwindigkeiten von bis zu 1 m/s operieren. Die Messentfernung vom Sensor bis zum Messobjekt beträgt  $2.0 \pm 0.5$  m, das Bildfeld ist etwa  $1 \text{ m}^2$  groß. Das System soll in Tiefen bis zu 1000 m operieren können.

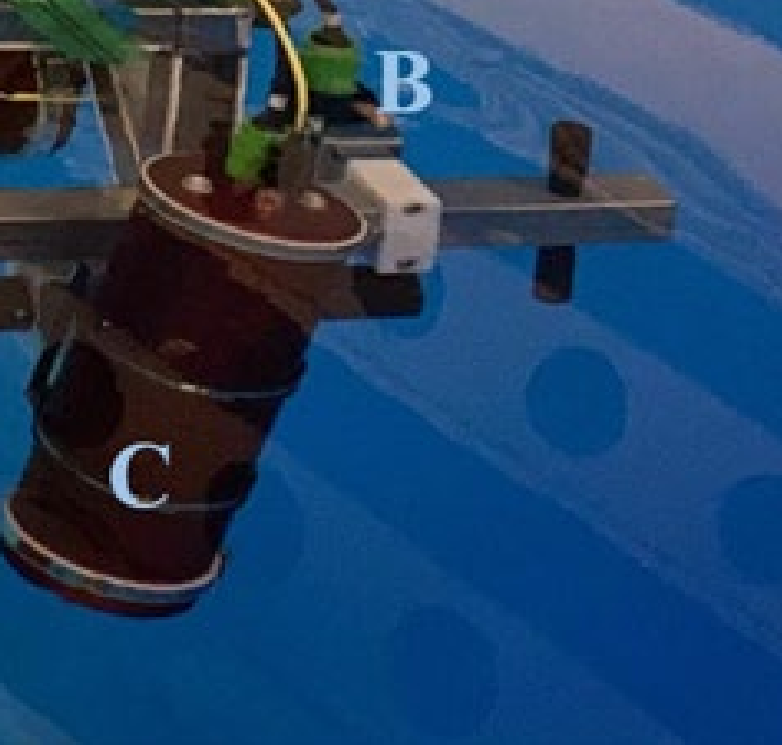
Kernstück des 3D-Sensorsystems ist ein streifenprojektions-basierter 3D-Scanner bestehend aus zwei monochromen Messkameras und einer Projektionseinheit, die aperiodische Sinusmuster auf das Messobjekt projiziert. Weiterhin gehören eine Farbkamera, eine Inertialeinheit, zwei Blitzlichter und eine Elektronikbox zur Steuerung zu den Komponenten des Systems (Abb. 1).

Das System wurde kalibriert und in verschiedenen Wasserbecken und bei einem Ostseeinsatz getestet. Dabei konnten gegenüber Konkurrenzsystemen basierend auf Lasertechnik oder passiver Fotogrammetrie sowohl 3D-Messergebnisse

Together with the enterprises SeaRenegy Offshore Holding GmbH and Cie. KG, Oktopus GmbH, 3++ GmbH, and University Würzburg, who are involved in a research project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, a novel 3D sensor system for underwater inspection applications was developed at Fraunhofer IOF. Application scenarios are deep sea inspections of underwater structures, such as oil or gas pipelines, and offshore windmill fundaments. The sensor system should be mounted in a Remotely Operated Vehicle (ROV) and captures up to 60 3D scans per second in motion with velocities up to 1 m/s. Consecutive scans are merged into a 3D model of the measured object. The standard distance between the sensor and the measurement object is  $2.0 \pm 0.5$  m, and the field of view is approximately  $1 \text{ m}^2$ . The system can be applied at depths until 1000 m.

The main part of the 3D sensor system is an optical 3D stereo scanner based on structured illumination, consisting of two monochrome measurement cameras and a projection unit producing aperiodic sinusoidal fringe patterns. Additionally, two flashlights, a color camera, an inertial unit, and an electronic control unit also belong to the sensor system (Fig. 1).

The system was calibrated and tested in water basins offshore in the Baltic Sea. The main advantage over existing scanning systems based on laser technique or



#### Authors

Christian Bräuer-Burchardt  
Christoph Munkelt  
Matthias Heinze  
Ingo Gebhart  
Peter Kühmstedt

#### Contact

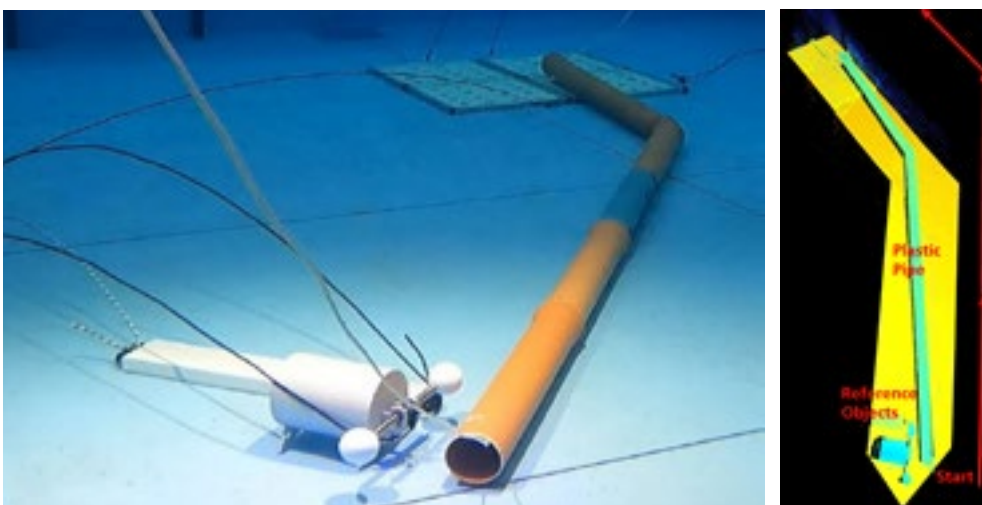
Dr. Peter Kühmstedt  
Phone +49 3641 807-230  
peter.kuehmstedt@  
iof.fraunhofer.de

mit herausragender Genauigkeit erzielt als auch eine schnelle Datenaufnahme in Bewegung erreicht werden. Dies konnte u. a. durch eine exakte geometrische Analyse des Strahlverlaufs unter den Bedingungen der mehrfachen Lichtbrechung und ein neues Verfahren zur Kalibrierung des Sensorsystems erzielt werden. Weiterhin wurde ein neues Verfahren zur Bewegungskompensation entwickelt, welches Störungen durch den sich während der Bildaufnahmezeit ändernden Bildinhalt korrigiert.

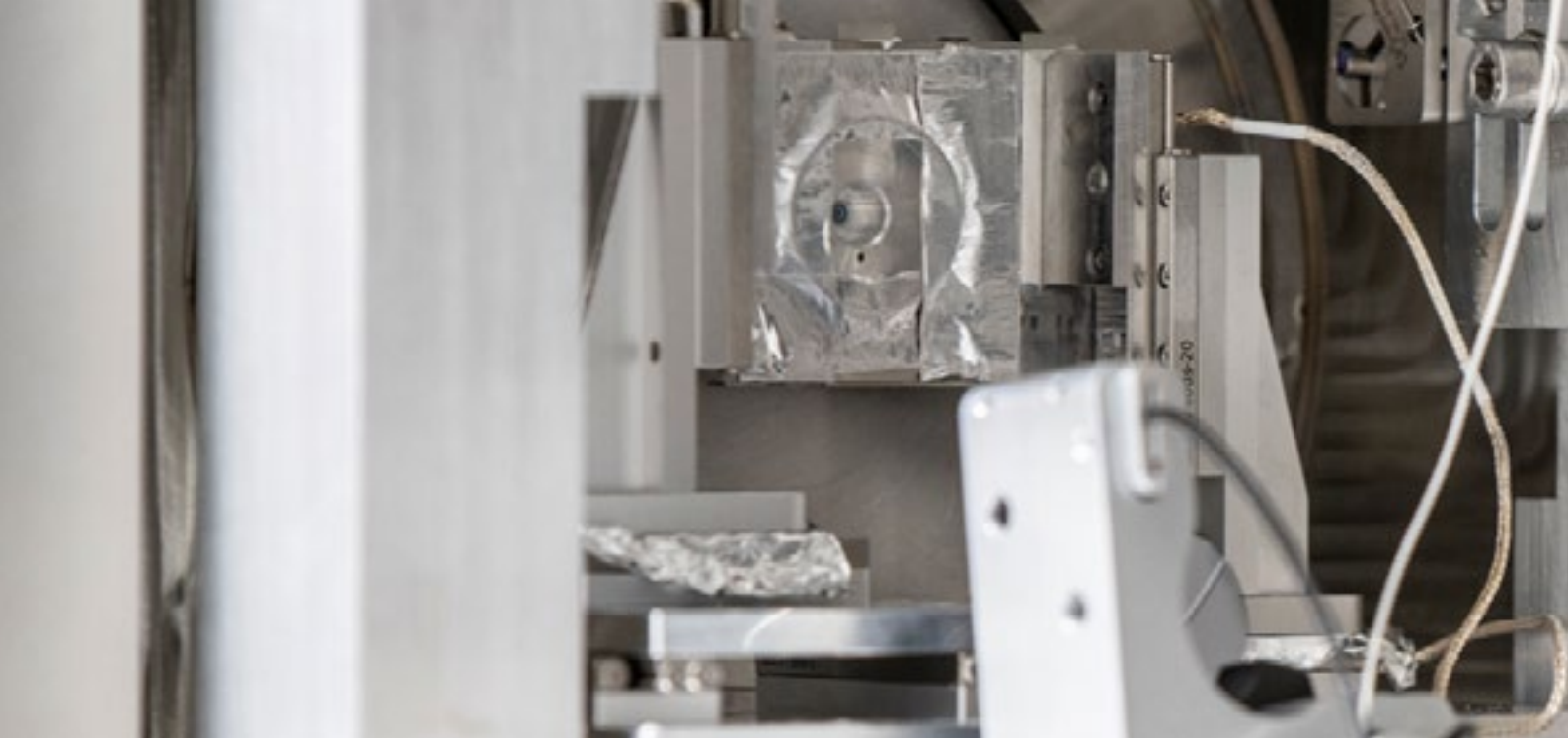
Messungen spezieller Testkörper wie ein Ebenheitsnormal und ein 500 mm Kugelstab zeigten, dass Genauigkeiten vergleichbar mit Messungen entsprechender Scanner in Luft erreicht werden können. Messungen bei einer Sensorgeschwindigkeit von 0.7 m/s wurden zur Erfassung verschiedener Testmesskörper durchgeführt, z. B. eines ca. 7 m langen Rohrstückes (Abb. 2).

photogrammetry is the combination of fast scanning with high measurement accuracy. This was achieved by geometrical analysis of the vision rays through different media and the development of a corresponding calibration and 3D calculation methodology. Additionally, a motion compensation algorithm was developed and implemented to prevent image disturbances due to sensor movement.

Measurements of a certain specimen such as a plane normal and a 500 mm ball bar with slow sensor velocity (0.2 m/s) showed an extremely high accuracy even at different distances to the sensor, comparable to measurements in air. Measurements in faster motion were performed at a sensor velocity of 0.7 m/s. Figure 2 shows the reconstruction result of a pipe with a length of approximately 7 m.



[2] Messung Rohrabschnitt: Messszene (links) und erzeugte 3D Punktwolke eingefärbt nach der Höhe (rechts). | Measurement pipe section and specimen: measurement objects (left) and false color 3D point cloud representation (right).



[1] Aufbau für die linsenlose EUV-Bildgebung. /  
Lensless EUV microscopy setup.

## Material-spezifische EUV Bildgebung auf der Nanoskala Contact-free determination of the tidal volume

Mikroskopie im extremen Ultraviolett (EUV) bietet im Vergleich zu konventionellen Verfahren viele Vorteile. Neben einer hohen räumlichen Auflösung aufgrund der kurzen Wellenlänge, ermöglicht EUV Strahlung einen exzellenten Materialkontrast aufgrund der vielen charakteristischen Absorptionskanten in diesem Spektralbereich. Zusätzlich gibt es verschiedene Transparenzfenster, welche große Eindringtiefen im Mikrometerbereich und damit durchdringende Bildgebung erlauben.

Heutzutage ermöglicht die Kombination neuer linsenloser Bildgebungsverfahren, die auf kohärenter Beleuchtung und Phasenrekonstruktions-Algorithmen basieren, mit kompakten und leistungsfähigen EUV-Strahlquellen im Laborformat quantitative Bildgebung jenseits der Limits konventioneller Mikroskope. Insbesondere hat die Entwicklung von Ultrakurzpulslasern mit sehr hohen Durchschnittsleistungen neue Wege zur Realisierung kompakter kohärenter Sekundärstrahlquellen eröffnet. Die treibenden Lasersysteme aber auch die Sekundärstrahlquellen und deren Anwendungen stehen im Fokus des Fraunhofer Cluster of Excellence (CAPS). So konnten am Fraunhofer IOF eine EUV-Strahlquelle mit bisher unerreichter Brillanz realisiert werden /1/. Diese Strahlquelle steht nun im CAPS Applikationslabor am IOF für Anwendungen zur Verfügung. Speziell für die hochauflösende EUV-Bildgebung wurde ein linsenloses EUV-Mikroskop entwickelt, mit welchem Proben bei einer Wellenlänge von 13.5 nm mittels Ptychographie, einem besonders leistungsfähigen, scannenden linsenlosen Bildgebungsverfahren, untersucht werden können /2/. Unter

Extreme ultraviolet (EUV) microscopy offers many advantages compared to conventional imaging techniques. Next to a high spatial resolution, due to the short wavelength, EUV radiation enables excellent material contrast, since practically all elements exhibit characteristic absorption edges in the EUV. Additionally, plenty of materials offer transparency windows in the EUV, which allow penetration depths in the micrometer range and thus the investigation of thick samples.

At the same time, lensless imaging techniques that are based on coherent illumination and phase reconstruction algorithms have seen tremendous progress. As a result, imaging in the EUV range has provided new possibilities. In combination with compact powerful coherent EUV sources, these techniques allow quantitative imaging beyond the capabilities of conventional microscopes. Particularly, the recent advances in ultrafast fiber laser technology that have been achieved within the Fraunhofer Cluster of Excellence (CAPS) at Fraunhofer IOF allow for the generation of secondary radiation in the EUV with unprecedented brilliance on a tabletop /1/. These unique sources are available now in the CAPS application lab at the Fraunhofer IOF and open new avenues in tabletop imaging.

Taking advantage of these possibilities, a lab-scale lensless EUV microscope was realized operating at 13.5 nm wavelength /2/. By combining an interferometrically stabilized setup, structured illumination, and novel phase-retrieval methods, a record resolution of 16 nm was demonstrated /2/.



#### Authors

Wilhelm Eschen  
Chang Liu  
Michel Krause<sup>1</sup>  
Jens Limpert  
Jan Rothhardt

#### Contact

Dr. Jan Rothhardt  
Phone +49 3641 9-47818  
jan.rothhardt@iof.fraunhofer.de

<sup>1</sup> Fraunhofer IMWS

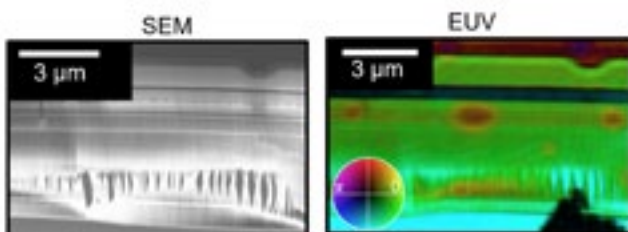
Verwendung eines interferometrisch stabilisierten Aufbaus, strukturierter Beleuchtung und neuer numerischer Phasenrekonstruktions-Methoden konnte eine Rekordauflösung von 16 nm demonstriert werden /2/.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IMWS gelang erstmals EUV-Bildgebung an einer realen Probe aus der Mikroelektronik (Abb. 2). Im Gegensatz zu Elektronenmikroskop-Bildern zeigen die EUV-Bilder einen besonders hohen Kontrast in Amplitude und Phase. Aus diesen Bilddaten ist zusätzlich sogar eine Identifikation der Materialzusammensetzung möglich. Dabei konnten typische Materialien wie Aluminium, Siliziumoxid und Siliziumnitrid eindeutig identifiziert werden. Das entwickelte EUV-Mikroskop und die zugehörigen Analysemethoden lassen sich auf ein breites Spektrum von Proben aus verschiedensten Bereichen der Wissenschaft und Technik anwenden, die gemeinsam mit weiteren Partner im Rahmen von CAPS erschlossen werden. So konnten kürzlich subzelluläre Strukturen von Pilzen und Bakterien identifiziert und ihre chemische Zusammensetzung hochaufgelöst analysiert werden /3/.

The unique capabilities of this instrument have been demonstrated at a real-world semiconductor sample in collaboration with the Fraunhofer IMWS (Fig. 2). In contrast to electron microscope measurements, the recorded EUV images provide higher and quantitative amplitude- and phase-contrast, which additionally allows for the analysis of the material composition. Typical materials such as aluminum and silicon oxide have been successfully identified /2/. The developed EUV microscope and the related analysis methods can be directly applied to a wide range of samples from a broad range of fields. For example, the identification of sub-cellular features of fungus germlings and bacteria was recently achieved, including the analysis of their nanoscale chemical composition /3/.

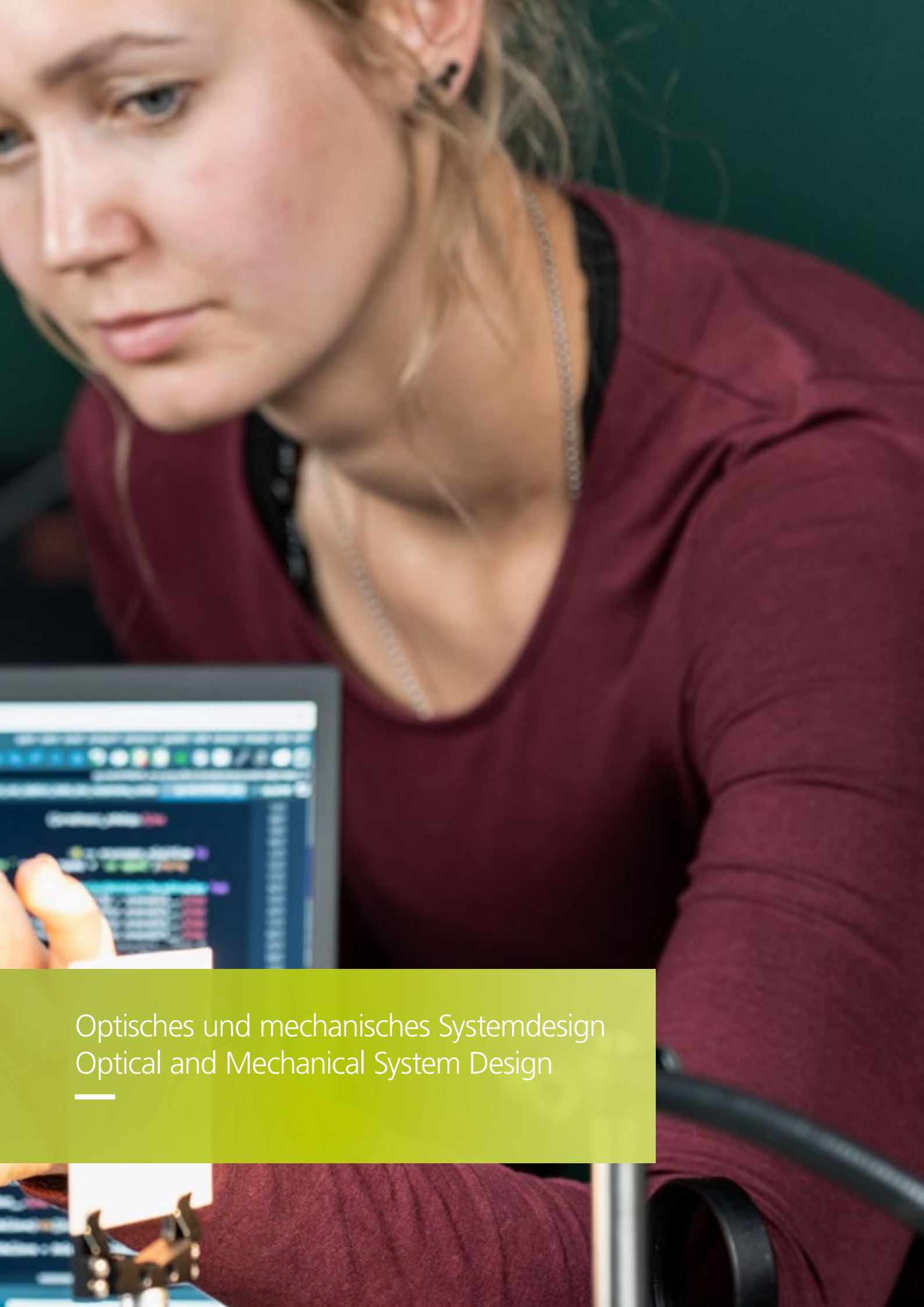
#### References / Literatur

- /1/ R. Klas et al.: Photonix 2, 1–8 (2021).
- /2/ W. Eschen et al.; Light Sci. Appl. 11, 117 (2022).
- /3/ C. Liu et al.: arXiv:2211.04135.



[2] Komplexe EUV-Transmission einer dünnen Lamelle eines integrierten Schaltkreises und zum Vergleich ein Elektronenmikroskop-Bild (SEM). / Complex EUV transmission image of a thin lamella from an integrated circuit and an electron microscope image (SEM) for comparison.





Optisches und mechanisches Systemdesign  
Optical and Mechanical System Design

---



[1] Explosionsartige Darstellung der Einzelkomponenten. /  
Exploded view of ultra-compact multi-modal camera.

## Ultra-kompakte multimodale Kamera Ultra-compact multi-modal camera

Der Einsatz berührungsloser Inspektionssysteme nimmt im industriellen Umfeld stetig zu. Dabei werden zunehmend multimodale Kamerasysteme nachgefragt, welche gleichzeitig die klassische 2D Bildinformation, aber auch 3D, spektrale oder Polarisationsinformationen in Echtzeit erfassen können. Solche Kamerasysteme sollen unter anderem eine ereignisbasierte Überwachung und vorausschauende Wartung in der Industrie 4.0 zukünftig ermöglichen. Ziel dieses Projekts ist es, ein Monitoring von Prozessen in der Fertigung und von Objekten bei der Wareneingangs- und Warenausgangskontrolle zu gewährleisten, wie z.B. der Elementkontrolle in der Mikromontage. Klassische Lösungen basieren auf einer Vielzahl von Sensoren (großer Bauraum notwendig) mit anschließender Datenfusion, welche eine gute Synchronisierung und viel Rechenleistung voraussetzen. Aktuelle Trends gehen zu Snapshot-fähigen und miniaturisierten Systemen.

Wir haben eine ultrakompakte multimodale Kamera auf Basis eines Multiapertur-Abbildungssystems mit spektralen Bandpassfiltern und einem polarisations-empfindlichen Bildsensor (Sony IMX250 MZR) realisiert /1/. Dieser Ansatz baut auf unserer multispektralen Snapshotkamera /2/ auf und ist mit zusätzlichen Features erweitert. Das System mit neun Kanälen deckt einen Spektralbereich vom visuellen bis zum nahen Infrarotbereich von 400 nm bis 870 nm ab. Das Multikanal-Abbildungssystem besteht aus einem doppelseitigen Mikrolinsen-Array mit rückseitigen konvexen Mikrolinsen, welche kanalspezifisch im Krümmungsradius angepasst sind, um den

The impact of remote sensing inspection systems is rapidly growing in industry. There is an increasing demand for multi-modal camera systems that can simultaneously capture classic 2D image information as well as 3D, spectral, or polarization information in real-time. In the future, such camera systems should enable event-based monitoring and predictive maintenance in Industry 4.0. This project aims to ensure the monitoring of processes in manufacturing and objects in incoming and outgoing goods inspection, such as element inspection in micro-assembly. Classical solutions are based on many sensors (large installation space required) with subsequent data fusion, which require good synchronization and a lot of computing power. Current trends are towards snapshot-enabled and miniaturized systems.

We have realized an ultra-compact multi-modal camera based on a multi-aperture imaging system with spectral bandpass filters and a polarization-sensitive image sensor (Sony IMX250 MZR) /1/. This approach is based on our multi-spectral snapshot camera /2/ and is enhanced with additional features. The nine-channel system covers a spectral range from 400 nm to 870 nm. The multichannel imaging system consists of a double-sided micro-lens array with rear convex micro-lenses that are channel-specific in the radius of curvature to correct for axial chromatic focus error. In addition, the lens apertures combined with the spectral bandwidths of the individual bandpass filters are optimized channel-by-channel to achieve homogeneous sensitivity across the spectral range.



### Authors

Martin Hubold  
Norbert Danz  
Robert Brüning

### Contact

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

axialen chromatischen Fokusfehler zu korrigieren. Zusätzlich sind die Öffnungsverhältnisse in Kombination mit den spektralen Bandbreiten der einzelnen Bandpassfilter kanalweise optimiert, um eine homogene Empfindlichkeit über den Spektralbereich zu erzielen. Jeder Einzelkanal bildet ein volles diagonales Gesichtsfeld von  $45^\circ$  mit einer Rohauflösung von  $760 \times 640$  Pixeln ab, woraus eine finale Auflösung von  $380 \times 320$  Superpixeln ( $2 \times 2$  Polarisationspixel = 1 Superpixel) folgt. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, mit einer Vorsatzlinse die tiefenabhängigen Disparitäten zwischen den einzelnen Kanälen für kurze Objektstände zu minimieren und damit ein Bildauflösungsverlust zu vermeiden.

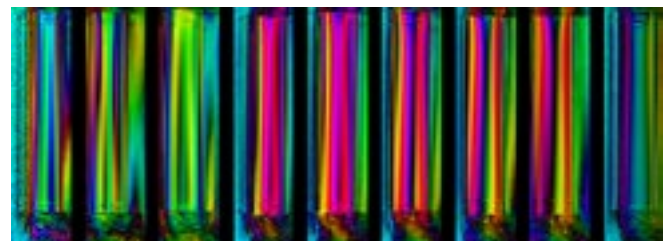
Die erfolgreiche Umsetzung der kompakten multimodalen Kamera wurde anschließend an spritzgegossenen Polymer substraten getestet, welche in der biomedizinischen, mikrofluidischen Analyse Anwendung finden sollen. Unterschiede in der wellenlängen- und polarisationsabhängige Transmission konnten sowohl zwischen unterschiedlichen Chargen als auch innerhalb eines Batches beobachtet werden und können damit z. B. in der Qualitätskontrolle eingesetzt werden.

### Literatur / References

- /1/ M. Hubold et al.: Concept, manufacturing and challenges of ultra-compact snapshot multi-spectral multi-aperture imaging systems, EPJ Web of Conferences 266, 03013 (2022).
- /2/ M. Hubold et al.: Multi-aperture system approach for snapshot multispectral imaging applications, Opt. Express 29, 7361–7378 (2021).

Each single channel images a full diagonal field of view of  $45^\circ$  with a raw resolution of  $760 \times 640$  pixels, resulting in a final resolution of  $380 \times 320$  superpixels ( $2 \times 2$  polarization pixels = 1 superpixel). Furthermore, it is possible to minimize the depth-dependent disparities between the individual channels for short object distances by using an attachment lens, thus avoiding a loss of image resolution.

The successful implementation of the compact multi-modal camera was then tested on injection molded polymer substrates, which are expected to find application in biomedical microfluidic analysis. Different wavelength and polarization-dependent transmission could be observed between different batches as well as within a batch and can thus be used, e. g., in quality control.



[2] Messung des Polarisationswinkels an einem spritzgegossenem Polymersubstrat bei unterschiedlichen Wellenlängen in Transmission. / Angle of polarization measurement of an injection molded polymer substrate at different wavelengths in transmission.





[1] Fotos des Labordemonstrators in einem Anwendungsszenario. /  
Photos of the laboratory demonstrator in an application simulation.

## Miniaturisierte holografische Bodenprojektion Miniaturized holographic road projection

Autonome Fahrzeuge, ein wichtiger Bestandteil der Mobilität der Zukunft, müssen gegebenenfalls mit ihrer Umgebung kommunizieren, um nahe Fußgänger oder Radfahrer zu informieren. Dies betrifft deren Erkennung durch das Fahrzeug, potenzielle Gefahren, oder auch die Absicht eines Autos, die Straße zum Überqueren oder Abbiegen freizugeben. Eine Möglichkeit zur Darstellung derartiger Informationen ist die Projektion von Piktogrammen o. ä. auf die Straße. Dabei muss die Helligkeit der Projektion ausreichen, um auf einer hellen, von der Sonne beschienenen Straße erkennbar zu sein. Das kann nicht mit kleinen, LED-basierten Systemen erreicht werden.

Im aktuellen Projekt sollen Symbole auf einer Fläche von ca. 30 cm x 100 cm, die nur etwa 30 cm vom Fahrzeug entfernt ist, dargestellt werden. Mehrere am Fahrzeug montierte Projektoren ermöglichen dann eine rundum-Darstellung.

Die Montage der Systeme wird im Schweller des Automobils erfolgen, so dass die Projektion einen Öffnungswinkel von  $\pm 45^\circ$  haben muss. Um die geforderte Helligkeit zu erreichen, wird eine holografische Bildgenerierung mit einem sogenannten SLM (spatial light modulator, Holoeye Photonics, Berlin, Germany) genutzt. Dessen Projektionsbereich ist aufgrund der Pixelgröße und der verwendeten Wellenlänge von 525 nm auf etwa  $\pm 3.5^\circ$  begrenzt. Deshalb wurden zwei Ansätze kombiniert, um den Öffnungswinkel der Projektion zu vergrößern und die Helligkeit maximieren. Erstens wird

Autonomous cars, which are going to play an essential role in future mobility, might need to communicate with their surroundings. Such communication can inform nearby pedestrians and cyclists about being recognized by the car, about potential dangers, or about the car's intention to give way to others, e. g., for turning or crossing a street. One option to implement such signage is to project symbols or pictograms onto the road around the vehicle. In this case, the projection's illuminance must be large enough to compete with that of a bright, sun-lit road, which cannot be achieved by small, LED-based projection systems.

The present development targets to project a 30 cm x 100 cm large image separated approximately 30 cm from the car. Mounting several projectors around the car will enable signage all around the vehicle.

As the projection system will be mounted inside the car's door sill, a large angular aperture in the  $\pm 45^\circ$  range needs to be projected. To reach the brightness requirements, a holographic image generation using a spatial light modulator ("SLM", Holoeye Photonics, Berlin, Germany) is utilized. The projection angle is limited to  $\pm 3.5^\circ$  at an operation wavelength of 525 nm due to the SLM's pixel size. Therefore, two approaches have been combined to increase the angular projection range as well as the brightness: First, the SLM is fed by four collimated laser sources, each illuminating a quarter of the SLM. Second, each of the four channels projects only a quarter segment of



### Authors

Peter Schreiber  
Leo M. Wilhelm  
Bernd Höfer  
Norbert Danz

### Contact

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

der SLM mit vier Laserquellen beleuchtet, die jeweils nur ein Viertel der SLM-Fläche beleuchten. Zweitens projiziert jeder dieser vier Kanäle nur ein Viertel des gesamten Bildes. Der Öffnungswinkel jedes Kanals wird dabei durch mikrooptische Teleskope vergrößert und die Projektionsrichtung durch ein Array von Mikroprismen eingestellt.

Die Bildgenerierung am SLM muss eine asymmetrische Keystone-Korrektur und auch den korrekten Bildanschluss der vier Teilbilder gewährleisten. Dafür wird die von der Projektorposition abhängige Verzeichnung vermessen, um die Bilder vorab entsprechend zu korrigieren. Diese Bilddaten dienen zur Berechnung der notwendigen Phasenverteilung am SLM mit einem iterativen Fourier-Algorithmus. Zusätzlich wird eine genaue Justage von Fokussierung und Bildüberlapp durch die Gerätesoftware ermöglicht.

### Danksagung / Förderung

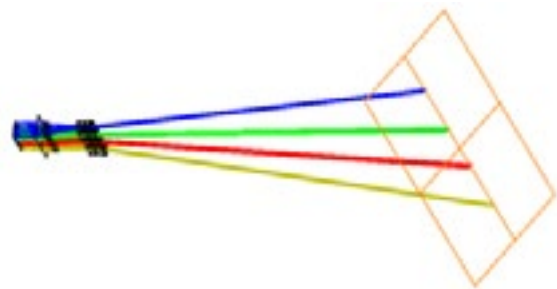
Das Projekt MaMeK wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (BMBF FKZ 03ZZ0449G).

the overall image, supported by a micro-optical telescope array for projection range enlargement and a channel-by-channel deflection by a micro-prism array.

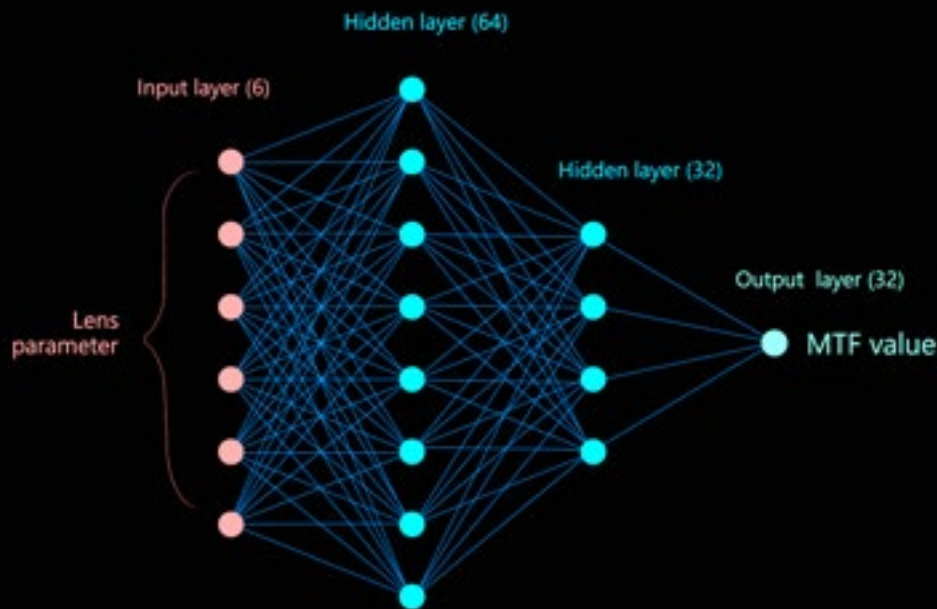
The image generated by the SLM needs to provide asymmetric keystone correction of the projection as well as the stitching of the four images. This is ensured by measuring the projector's location-dependent distortion, which is used for generating predistorted images. From these images, the phase distribution of the SLM is calculated using an iterative Fourier transform algorithm. Fine-tuning of focus and stitching is adjusted by the projector software.

### Acknowledgment / Funding

The authors are grateful for funding of the MaMeK project by the Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF FKZ 03ZZ0449G).



[2] Schema des optischen Systems, das den SLM vereinfacht in Transmission zeigt. / Scheme of the optical system with the SLM shown in transmission for convenience.



[1] Linien- und 3D-Doppelball-Projektion mit 40° FOV MLA. /  
Line and double sphere with 40° FOV 40.

## Abschätzung der optischen Performance durch neuronale Netze / Neuronal network for optical performance estimation

Die potenzielle Leistungsfähigkeit von optischen Systemen kann bereits im Designprozess über die Simulation der Modulation Transfer Funktion (MTF) quantifiziert und bewertet werden. Dabei gibt diese Funktion an, mit welchem Kontrast einzelne Strukturen durch das optische System aufgelöst werden können und ist ein Maß für die Güte des Systems. Da für die Berechnung der MTF wellenoptische Eigenschaften der Beugung berücksichtigt werden müssen, ist dies jedoch mit einem großen Zeit- und Rechenaufwand verbunden. Eine große Anzahl solcher Berechnungen sind jedoch während der Toleranzrechnung notwendig, um Fertigungsgenauigkeiten gegenüber Ertrag bei der Optikmontage zu optimieren.

Zur Beschleunigung der Systemsimulation wurde daher am Fraunhofer IOF ein Neuronales Netzwerk entwickelt, welches die MTF für ein gegebenes System bei variablen Geometrie- und Materialparametern der Optikkomponenten bestimmen kann. Nach erfolgter Anlernphase des Neuronalen Netzwerks konnte die MTF-Bestimmung für Toleranzsimulationen um das 3,6 millionenfache beschleunigt werden. Dies ermöglicht die Auswertung von z. B. Monte-Carlo-Simulationen auf Basis deutlich größerer Datenmengen und kann somit die Genauigkeit von Ertrags-Abschätzungen deutlich steigern.

Als Neuronales Netz kam dabei ein vierlagiges Multi-Layer Perceptron (MLP) zur Anwendung, welches besonders gut

The potential performance of optical systems can already be quantified and evaluated in the design process by simulating the modulation transfer function (MTF). This function indicates the contrast with which individual structures can be resolved by the optical system and is thus a measure of the quality of the system. Since wave-optical properties of the diffraction must be considered for the calculation of the MTF, however, this is associated with a large amount of time and computational effort. However, a large number of such calculations are necessary during the system tolerancing to match manufacturing accuracies versus the yield of the optics assembly.

Therefore, to accelerate the system simulation, a neural network was developed at Fraunhofer IOF that can determine the MTF for a given system with variable geometry and material parameters of the optical components. After the learning phase of the neural network, MTF determination for tolerance simulations could be accelerated by a factor of 3.6 million. This enables the evaluation of, e. g., Monte Carlo simulations based on significantly larger data sets and can thus significantly increase the accuracy of yield estimations.

The neural network used was a four-layer multi-layer perceptron (MLP), which is particularly well suited for approximating nonlinear functional relationships. The MLP was trained with data sets simulated conventionally in OpticStudio. The training



[2] Simulierte Linse mit Fertigungstoleranzen. /  
Micro-optics wafer for lightfield display.

#### Authors

Uwe Lippmann  
Michael Vorhoek  
Robert Brüning

#### Contact

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

für die Näherung nichtlinearer funktioneller Zusammenhänge geeignet ist. Angelernt wurde das MLP mit konventionell in OpticStudio simulierten Datensätzen. Die Trainingsdaten waren dabei gleichmäßig über einen zuvor mittels Sensitivitätsanalyse bestimmten Toleranzbereich verteilt. Hierdurch lassen sich nach dem Anlernen auch eingeschränkte Toleranzintervalle oder spezifische Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Toleranzen zuverlässig durch das MLP berücksichtigen.

Zur Evaluierung der Netzwerkperformance wurden zusätzlich zehntausend Vergleichssysteme unabhängig mittels OpticStudio und dem MLP bestimmt. Dabei ergab sich eine relative Abweichung von 0,5 % zwischen klassischer Simulation und Abschätzung mittels MLP.

Zukünftig sollte das Netzwerk um weitere Bewertungskriterien neben der MTF, sowie um die Möglichkeit, Kompensatoren wie variable Luftabstände zu bestimmen, erweitert werden.

data were equally distributed over a tolerance range previously determined by sensitivity analysis. This means that even restricted tolerance intervals or specific probability distributions of the tolerances can be reliably approximated by the MLP after initial training.

To evaluate the network performance, additional ten thousand comparison systems were determined independently using OpticStudio and the MLP. This resulted in a relative deviation of 0.5 % between classical simulation and estimation using MLP.

In the future, the network should be extended to include other evaluation criteria in addition to MTF, as well as the possibility of determining compensators such as variable air gaps.





Zahlen und strategische Projekte 2022  
Figures and strategic projects 2022

---

# 2022 – Das Institut in Zahlen

## 2022 – The institute in figures

### Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2022 ist gegenüber dem Vorjahr um 11 % gestiegen, wobei die Aufwendungen für Personal um 3,2 % stiegen, die Sachausgaben um 6% gesunken sind. Basis ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag lag bei 16,8 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten 21,9 Millionen Euro.

### Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2022 wurden insgesamt 10,3 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

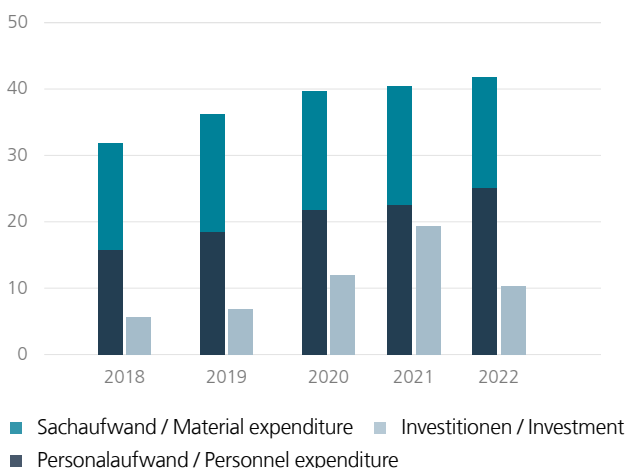
### Operating budget

Compared with the previous year the operating budget increased in 2022 by 11 %, with expenditures for staff grow by 3.2 % and material costs expenditures decreased by 6%. The basis is still the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached more than 16.8 million euros. The received public funding also reached 21.9 million euros.

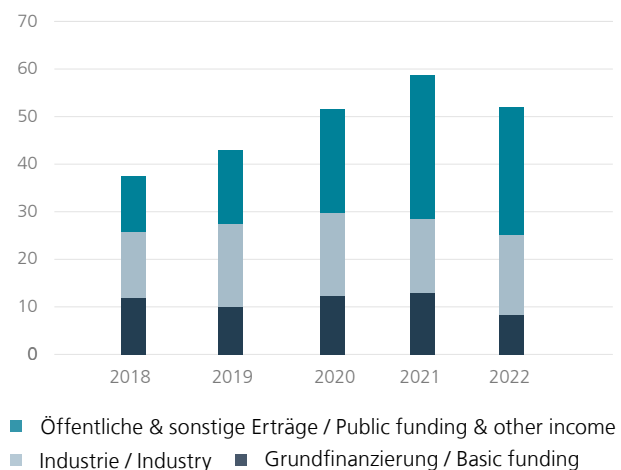
### Investments

The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 10.3 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2022.

**Fraunhofer IOF Gesamthaushalt / Budget (Mio. €)**



**Fraunhofer IOF Ertrag / Revenue (Mio. €)**



## Personal

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

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

Die Mitarbeitenden des IAP konnten für 2022 Drittmittel in Höhe von 8,5 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2022 6 Professoren, 41 wissenschaftliche und 18 technische Mitarbeitende sowie 89 Promovierende und 83 Studierende. Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

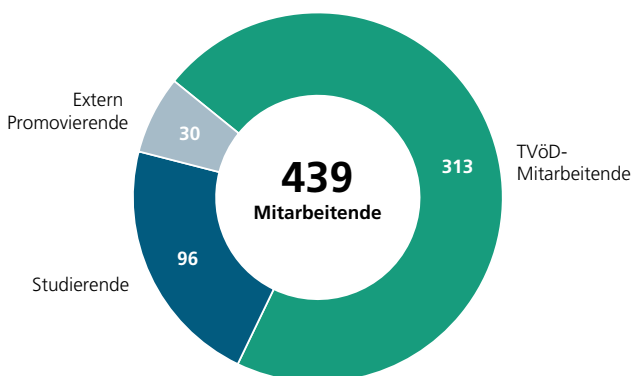
## Staff

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

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

Employees at IAP acquired external funds worth 8.5 million euros in 2022 (see table). A total staff of 6 professors, 41 research assistants, 18 technical assistants, 89 doctoral candidates, and 83 students were working at IAP in 2022. The majority of completed theses are listed in the attachment.

### Fraunhofer IOF Mitarbeitende / Staff



### IAP Drittmiteleinahmen IAP 2022 /

Contract research revenue IAP 2022

Fördergeber / Contracts with	Zuwendung   Funds   T€
BMBF	5.784
DFG	1.578
EU	0.765
Thüringen / Thuringia	0.809
Stiftungen / Foundations	0.829
Industrie / Industry	1.730



# Organisation Organization



## INSTITUTE MANAGEMENT



**Director**  
Prof. Dr. Andreas  
Tünnermann



**Deputy director**  
Dr. Ramona  
Eberhardt



**Deputy director**  
Prof. Dr.  
Stefan Nolte

## ADMINISTRATION



**Administration**  
Elke Heuer



**Marketing and  
coordination**  
Dr. Robert Kammel

## 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

## SCIENTIFIC DEPARTMENTS



**Optical and Mechanical  
System Design**  
Dr. Robert Brüning



**Micro- and  
Nanostructured Optics**  
Dr. Falk Eilenberger



**Opto-mechatronic  
Components and Systems**  
Dr. Erik Beckert



**Functional  
Surfaces and Coatings**  
Dr. Sven Schröder



**Laser and Fiber Technology**  
Dr. Thomas Schreiber



**Imaging and Sensing**  
Dr. Peter Kühmstedt

## STRATEGIC PROJECTS



**QuNET**  
Quantum secure  
IT infrastructure



**Max Planck School  
of Photonics**  
Graduate school



**AMI**  
RUBIN-Alliance



**QUANTIFISENS**  
RUBIN-Alliance



**fo+**  
Regional growth core  
for freeform optics

# Kuratorium Advisory committee

## Vorsitzender / Chair

- Dr. Michael Mertin / CeramTech Gruppe

## Mitglieder | Members

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



**Technical services**  
Wieland Stöckl



Prof. Dr.  
Stefan Nolte



**Precision Optical  
Components and  
Systems**  
Dr. Stefan Risse



**Emerging  
Technologies**  
Dr. Ramona  
Eberhardt



**Digital Innovation Hub  
Photonics**



# Leistungszentrum Photonik Center of Excellence in Photonics

## Fokus Transferpfade Startups & Weiterbildung für Führungskräfte der Photonik

Focus on Transfer Paths Startups & Advanced Training  
for Executives in Photonics

Das Leistungszentrum Photonik ist eine einrichtungübergreifende Forschungs- und Transferplattform des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, des Instituts für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena, der Leibniz-Institute IPHT und HKI sowie des Helmholtz-Instituts Jena HIJ. In dieser Kooperation verbinden die Partner ihre vielfältigen Kompetenzen zu einem gemeinsamen Innovationsökosystem zur Stärkung des Transfers innovativer Lösungen mit Licht, insbesondere über strategische Initiativen wie die Befähigung von Ausgründungen und Startups sowie interne und externe Weiterbildung.

### Digital Innovation Hub Photonics

Der Digital Innovation Hub Photonics (DIHP) ist ein Konsortialprojekt zur Förderung des Technologietransfers insbesondere durch (Aus-)Gründungen und Kooperationen mit kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) der Photonik, welcher als Pilotprojekt des Fraunhofer IOF im Jahr 2019 startete. Zu Beginn der aktuellen Umsetzungsphase (DIHP+) kamen im Jahr 2022 weitere Partner des Leistungszentrums Photonik dazu:

The Center of Excellence in Photonics is a cross-institutional research and transfer platform of the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF, the Institute for Applied Physics of the Friedrich Schiller University Jena, the Leibniz Institutes IPHT and HKI as well as the Helmholtz Institute Jena HIJ. In this cooperation, the partners combine their diverse competencies to form a joint innovation ecosystem to strengthen the transfer of innovative solutions with light, especially via strategic initiatives such as enabling spin-offs and start-ups as well as internal and external training.

### Digital Innovation Hub Photonics

The Digital Innovation Hub Photonics (DIHP) is a consortium project for the promotion of technology transfer, especially through start-ups and cooperation with small and medium-sized enterprises (SMEs) in photonics, which started as a pilot project of Fraunhofer IOF in 2019. At the beginning of the current implementation phase (DIHP+), additional partners of the Center of Excellence in Photonics joined in 2022: The Abbe Center of Photonics (ACP) of the Friedrich Schiller University Jena, the

das Abbe Center of Photonics (ACP) der Friedrich-Schiller-Universität Jena, das Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie (Leibniz-HKI), das Leibniz-Institut für Photonische Technologien (Leibniz-IPHT) und das Helmholtz-Institut Jena (HI-Jena) sowie zusätzlich das Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW, das mit der Gruppe »Crowd Innovation« Feedback-Prozesse digital unterstützt. Diese werden im Rahmen des Projekts den Startups und Unternehmen angeboten. Das Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG) unterstützt das Konsortialprojekt mit insgesamt 1,2 Mio. €.

Im Mai 2022 wurden im DIHP Pitch 2022 erneut vielfältige Forschungsideen durch nationale und internationale Teams präsentiert. Die Auswahl der besten Konzepte erfolgte durch eine diverse Fachjury mit Vertretern aus Industrie, Wissenschaft, Kapitalgebern und erfahrenen Gründerinnen und Gründern. Fünf kreative Ideen wurden dabei zur Unterstützung durch Forschungsbudgets an den Partnereinrichtungen des DIHP+ ausgewählt, darunter interdisziplinäre Ansätze zu drängenden gesellschaftlichen Fragestellungen wie industrielle Abgasanalysen, Sensorik für Bioreaktoren sowie miniaturisierten Endoskopen. Besondere Highlights in 2022 waren zudem die Auszeichnungen zuvor vom DIHP(+) unterstützter Teams mit renommierten Gründerpreisen wie dem Innovationspreis Thüringen, den die FluiDect GmbH und die IDloop GmbH erhielten, sowie dem IQ Innovationspreis Mitteldeutschland für Quantum Optics Jena GmbH in der Gesamtwertung und in der Kategorie Informationstechnologie.

### **Photonics Manager Compact**

Bereits zum zweiten Mal konnte in 2022 die 5-tägige internationale Weiterbildung »Photonics Manager Compact« für Manager und Leitende der Optik- und Photonik-Industrie unter dem Dach des Leistungszentrums Photonik erfolgreich durchgeführt werden. An drei Tagen erhielten die Teilnehmenden fundierte Einblicke zur »Zukunft der Photonik« von Experten des Fraunhofer IOF, der Universität Jena und des Helmholtz-Instituts HIJ. Das Programm kombiniert einen Mix aus technischer Tiefe auf höchstem Niveau und Trends zu verschiedenen Photonik-Themen wie bspw. Messtechnik, Lasertechnik oder Quantentechnologie. Darüber hinaus werden an zwei weiteren Tagen unter dem Titel »Leadership of Photonics« Soft Skills für Organisationsentwicklung und Führung vermittelt. Das Format überzeugte auch die Fraunhofer Academy, die das Programm nach einer Anfangsförderung nun im Rahmen einer Partnerschaft weiter begleitet.

Leibniz Institute for Natural Product Research and Infection Biology (Leibniz-HKI), the Leibniz Institute for Photonic Technologies (Leibniz-IPHT), and the Helmholtz Institute Jena (HI-Jena), as well as the Fraunhofer Center for International Management and Knowledge Economy IMW with the group "Crowd Innovation", which supports feedback processes digitally. The Thuringian Ministry for Economy, Science and Digital Society (TMWWDG) is supporting the consortium project with a total of €1.2 million.

In May 2022, diverse research ideas were again presented by national and international teams in the DIHP Pitch 2022. The best concepts were selected by a diverse jury of experts with representatives from industry, science, investors, and experienced founders. Five creative ideas were selected for support through research budgets at DIHP+ partner institutions, including interdisciplinary approaches to pressing societal issues such as industrial exhaust gas analysis, sensor technology for bioreactors, and miniaturized endoscopes. Special highlights in 2022 also included the awarding of prestigious start-up prizes to teams previously supported by DIHP(+), such as the Thuringia Innovation Award for FluiDect GmbH and IDloop GmbH, as well as the IQ Innovation Award for Central Germany for Quantum Optics Jena GmbH in overall ranking and the information technology category.

### **Photonics Manager Compact - executive education program for managers and leaders**

For the second time, the 5-day international education program "Photonics Manager Compact" for managers and executives of the optics and photonics industry could be successfully held under the umbrella of the Center of Excellence in Photonics, thus building a bridge between applied research and industry.

Over the course of three days, participants will gain in-depth insights into the "Future of Photonics" from experts at Fraunhofer IOF, the University of Jena, and the Helmholtz Institute. The program combines a mix of technical depth at the highest level and trends on various photonics topics such as measurement technology, laser technology, or quantum technology. In addition, soft skills for organizational development and leadership are taught on two further days under the title "Leadership of Photonics".

The format also convinced the Fraunhofer Academy, which has now included the program in its portfolio as part of a partnership following start-up funding. Once a year, this year at the end of spring 2023, the program will take place at IOF in Jena.





## Fraunhofer MEOS

**Fraunhofer-Zentrum für Mikroelektronische und Optische Systeme für die Biomedizin**  
Fraunhofer Center for Microelectronic and Optical Systems for Biomedicine

Das Fraunhofer Projektzentrum für »Mikroelektronische und Optische Systeme für die Biomedizin« (MEOS) ist ein Standort der kollaborativen Forschung in Erfurt, welcher nun seit über drei Jahren besteht. Gemeinsamen arbeiten hier Mitarbeitende von drei Fraunhofer-Forschungsinstituten – den Instituten für Photonische Mikrosysteme IPMS, für Zelltherapie und Immunologie IZI sowie für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in sehr gut ausgestatteten technischen Laboren und können bereits zum Abschluss der Pilotphase auf exzellente interdisziplinäre Arbeitsergebnisse zurückblicken. Im April 2022 wurde dies in der abschließenden Evaluation des Projektzentrums bestätigt, welche die Ergebnisse und Kooperation der drei Institute als äußerst positiv bewerteten.

Die Schwerpunktthemen des MEOS umfassen die multimodale Datenanalyse, automatisierte Montageverfahren, Systemintegration, sowie die nicht-invasive Diagnostik. Hierbei verantwortet das Fraunhofer IOF die Kompetenzen »Automatisierte Montageverfahren« und »Multimodale Datenanalyse«. Die Kompetenz der Automatisierten Montageverfahren fokussiert sich auf die Entwicklung von Systemplattformen für die Anbindung von Sensoren im Bereich Biomedizintechniksysteme. Dafür konnte im Jahr 2022 eine innovative und hochpräzise Anlage zur Mikromontage der Firma FiconTech in Erfurt angeschafft und in Betrieb genommen werden. Als strategische

The Fraunhofer Project Center for "Microelectronic and Optical Systems for Biomedicine" (MEOS) in Erfurt has existed for the past three years. To foster research for biomedical applications, three Fraunhofer research institutes, i.e., the institute for Photonic Microsystems (IPMS), for Cell Therapy and Immunology (IZI), and Applied Optics and Precision Engineering (IOF), collaborate at this location. Employees from these three institutes work in well-equipped technical laboratories and have already achieved excellent interdisciplinary work results at the end of the pilot phase. The final evaluation of the project center in April 2022 found the results and cooperation of the three institutes to be outstanding.

The main topics of the MEOS include multimodal data analysis, automated assembly processes, system integration, and non-invasive diagnostics. Fraunhofer IOF is responsible for the competence fields "Automated Assembly Processes" and "Multimodal Data Analysis". "Automated Assembly Processes" focuses on the development of system platforms for fiber-optical sensor connections in the field of biomedical engineering. For this purpose, an innovative and high-precision microassembly system from FiconTech was put into operation in 2022. As a strategic extension, a gray-tone lithography system "High5" from the Fraunhofer IOF was

Erweiterung wurde aus dem Fraunhofer IOF heraus eine Grauton-Lithographieanlage »High5« im Reinraum des Gebäudes in Erfurt installiert, welche zusätzliche Optionen für den Aufbau von neuen optischen Sensoren erlaubt. Diese innovative Ausstattung ermöglicht die Erforschung und Entwicklung neuartiger Verfahren für die Mikromontage für vielfältige Anwendungen in vielfältigen Bereichen der Photonik, von der Biosensorik bis hin zur Quantenkommunikation. Die Kompetenz »Multimodale Datenanalyse« soll Verfahren der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens für die Bilderzeugung sowie Bild- und Messdatenanalyse erforschen. Das Ziel ist eine Unterstützung der am MEOS entwickelten Sensorik bezüglich der Bildvorverarbeitung und Bilderzeugung, Bildanalyse, sowie Messdatenanalyse.

Zusammen mit Partnern innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft ist es in diesem Jahr gelungen, weitere Projekte einzuwerben. Ein Beispiel ist das MEOS Innovation Center for Precision Analysis of Cell Therapy Products, kurz MIC-PreCell, das bis Sommer 2023 aufgebaut wird. Es wird mit 750.000€ vom Freistaat Thüringen gefördert und wird neue Analysemethoden zur Qualitätssicherung und Prozesskontrolle für die Herstellung von zellbasierten therapeutischen Produkten entwickeln.

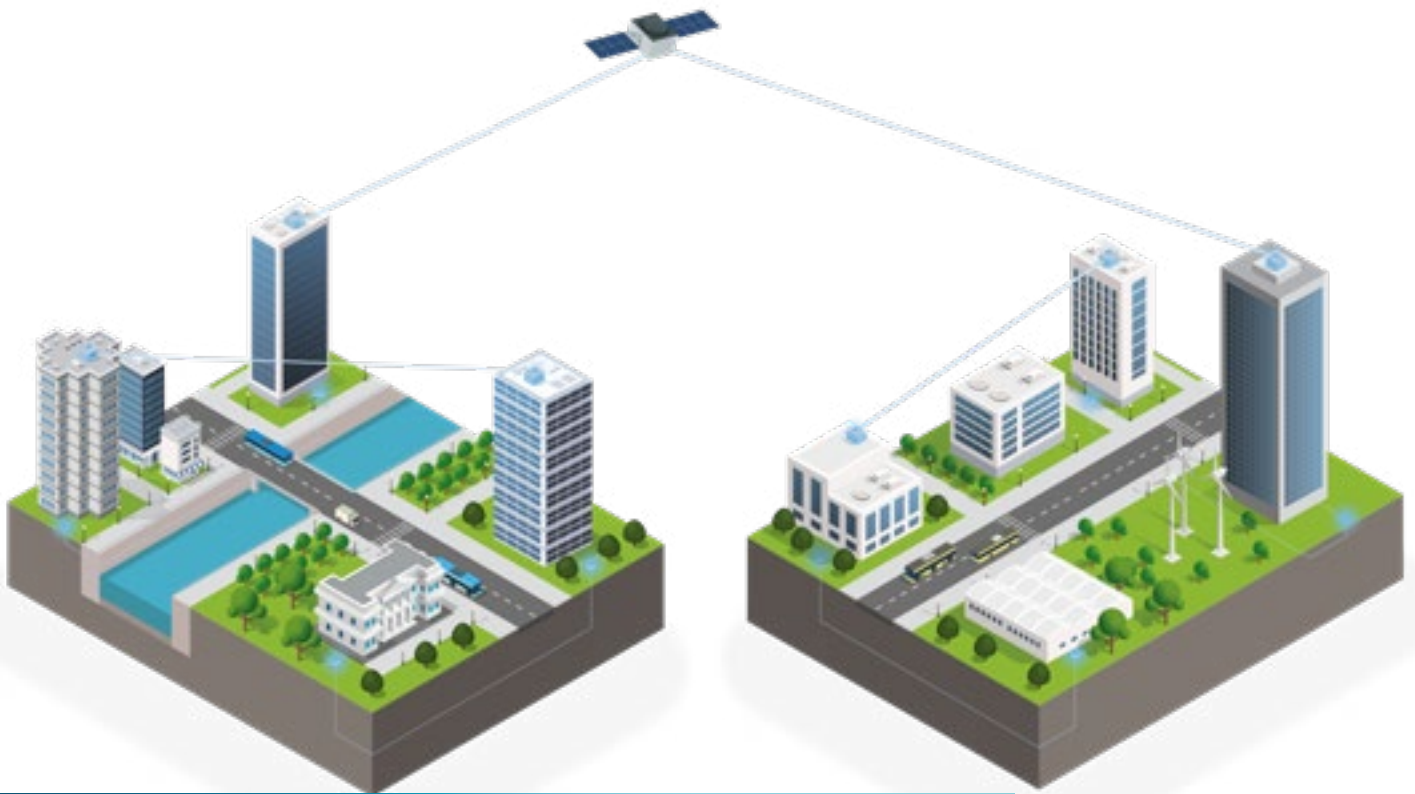
Auch im Bereich der Quantenkommunikation hat der Standort Erfurt zu entscheidenden Fortschritten beigetragen. Nachdem im Mai 2021 am MEOS in Erfurt das Forschungsnetzwerk »Quantum-Hub Thüringen« eröffnet wurde, konnte bereits im Frühjahr 2022 die glasfaserbasierte Teststrecke für die Quantenkommunikation fertiggestellt werden. Sie verbindet das Fraunhofer IOF in Jena mit dem Fraunhofer MEOS in Erfurt. Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme wurde im September 2022 ein Meilenstein für die Erforschung der hochsicheren Quantenkommunikation in Thüringen und Deutschland erreicht: Zum ersten Mal ist es gelungen, erfolgreich Quantenschlüssel über eine Distanz von 75 km via Glasfaser auszutauschen. Dabei wurden mehr als 300.000 Quanten-Keys über einen Testzeitraum von zehn Tagen zwischen den Thüringer Städten versendet.

installed in the clean room in Erfurt. It allows for additional options in the construction of new optical sensors. This innovative equipment enables the research and development of novel microassembly processes for numerous applications in diverse areas of photonics, from biosensing to quantum communication. "Multimodal Data Analysis" researches methods of artificial intelligence and machine learning for image generation and image and measurement data analysis. The aim is to support the sensor technology developed at MEOS regarding image pre-processing and generation as well as measurement data analysis.

Together with internal and external partners of Fraunhofer, we succeeded in acquiring further projects this year. One example is the MEOS Innovation Center for Precision Analysis of Cell Therapy Products, MIC-PreCell, which will start in summer 2023. It is funded by the Free State of Thuringia with €750,000 and will develop new analysis methods for quality assurance and process control for manufacturing cell-based therapeutic products.

The Fraunhofer location in Erfurt has also contributed to decisive progress in the field of quantum communication. After the "Quantum-Hub Thuringia" research network was opened at MEOS in Erfurt in May 2021, the fiber-optic-based test track for quantum communication was completed in spring 2022. It connects the Fraunhofer IOF in Jena with the Fraunhofer MEOS in Erfurt. With its successful commissioning in September 2022, a milestone for the research of highly secure quantum communication in Thuringia and Germany was reached: For the first time, the successful exchange of quantum keys over a distance of 75 km via fiber optics was realized. More than 300,000 quantum keys were sent between the Thuringian cities over a test period of ten days.

[1] Fraunhofer MEOS in Erfurt. /  
Fraunhofer MEOS in Erfurt.



## Quantenkommunikation Quantum Communication

Die Quantenkommunikation befasst sich mit Anwendungen und Protokollen, die auf der Übertragung von Quantenzuständen beruhen. Besondere Bedeutung kommt hierbei der Präparation, Manipulation und Messung von nicht-klassischen und damit oft fragilen Quantenzuständen des Lichts zu.

Die seit 2019 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte QuNET-Initiative entwickelt hochsichere Kommunikationssysteme basierend auf modernster Quantentechnologie mit dem Schwerpunkt auf zwischenbehördliche Kommunikation auf Bundesebene zur Gewährleistung langfristiger Datensicherheit. Die QuNET-Initiative erforscht Grundlagen für sichere und robuste IT-Netze, die schon heute gegen Cyberangriffe von morgen gewappnet sind. Im Zentrum der Initiative steht die Forschung zur sogenannten »Quantenschlüsselverteilung« (engl.: Quantum Key Distribution, kurz: QKD). Gemeint sind damit Verfahren zum Erzeugen und Teilen von kryptographischen Schlüsseln, die auf der Nutzung von Licht und Quantenphysik beruhen. Mit dieser Technologie kann jeder Abhörversuch identifiziert werden. QuNET profitiert von einer engen Zusammenarbeit

Quantum communication deals with applications and protocols based on the transmission of quantum states. Of particular importance here are the preparation, manipulation, and measurement of non-classical and, thus, often fragile quantum states of light.

The QuNET Initiative, funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) since 2019, develops highly secure communication systems based on modern quantum technology. The focus of the project is on communication between departments at the federal level to ensure long-term data security. QuNET conducts research for secure and robust IT networks that are prepared today to withstand tomorrow's cyberattacks. The initiative focuses on research into Quantum Key Distribution (QKD), meaning methods for generating and sharing cryptographic keys that are based on light and quantum physics. Using this technology, any eavesdropping attempt can be identified. QuNET benefits from close cooperation with the Federal Office for Information Security (BSI) to transfer quantum key distribution approaches to realistic application scenarios, especially for federal communications.

mit dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), um Ansätze der Quantenschlüsselverteilung in realistische Anwendungsszenarien, vor allem für die Kommunikation auf Bundesebene, zu übertragen.

QuNET ist eine gemeinsame Initiative des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts HHI, des Max-Planck-Instituts für die Physik des Lichts MPL und des Instituts für Kommunikation und Navigation des DLR unter der Leitung des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF. Darüber hinaus wurden weitere Partner aus Industrie und Forschung in Form von QuNET+Projekten eingebunden.

Nach der ersten Demonstration verschiedener QKD-Entwicklungen in einem Kommunikationsszenario zwischen Bundesbehörden im Jahr 2021 ging QuNET 2022 in die nächste Projektphase. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Zusammenarbeit zwischen Industrie, Forschungs- und Technologieorganisationen sowie der Wissenschaft, um den Transfer von QKD-Laboraufbauten in zertifizierbare Soft- und Hardware zu ermöglichen.

Das im September 2022 gestartete Schirmprojekt Quantenkommunikation Deutschland (SQuaD) dient der Bündelung der verschiedenen Initiativen. Dabei steht ein Austausch zwischen Wirtschaft und Forschung im Vordergrund. Begleitend soll dazu Infrastruktur für die Kalibrierung und Evaluierung von Quantentechnologie bereitgestellt werden. Dabei spielen auch die verschiedenen Partner eine essenzielle Rolle. Unter der Leitung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt kann u.a. die Kalibrierung von Photonenquellen und -detektoren angeboten werden. Das Fraunhofer IOF stellt die verschiedenen Infrastrukturen, wie Faser- (siehe oben), Freistrahlestrecke oder auch zukünftig eine optische Bodenstation für Satellitenkommunikation zur Verfügung.

Darüber hinaus konnte das Fraunhofer IOF gemeinsam mit zusätzlichen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft weitere Projekte im nationalen und internationalen kompetitiven Wettbewerb erfolgreich einwerben. Mit der Umsetzung der damit verbundenen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben leistet das Fraunhofer IOF entscheidende Beiträge zu den technologischen Herausforderungen rund um die Quantennetze der Zukunft und deren Anwendungen.

Dabei kommen der vom Freistaat Thüringen im Zusammenhang mit dem Quantenapplikationslabor geförderten offenen Teststrecke für Quantenkommunikation zwischen dem MEOS in Erfurt und dem Leistungszentrum in Jena, sowie der für das Dach des Fraunhofer IOF-Neubaus geplanten Bodenstation, besondere Bedeutung zu. Letztere wird international sichtbare exzellente Forschungs- und Auftragsarbeiten zur Adressierung des höchst relevanten Weltraumsegments in der Quantenkommunikation ermöglichen.

QuNET is a joint initiative of the Fraunhofer Heinrich Hertz Institute HHI, the Max Planck Institute for the Physics of Light MPL and the DLR (German Aerospace Center) Institute for Communication and Navigation under the leadership of the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF. In addition, other partners from industry and research are involved in the form of QuNET+Projects.

After the first demonstration of various QKD developments in a communication scenario between two federal institutions, QuNET entered the next project phase in 2022. That year, the focus was on collaboration between industry, research, and technology organizations as well as science to enable the transfer of QKD laboratory components in certifiable software and hardware.

The umbrella project Quantum Communication Germany SQuaD launched in September 2022 and serves as connecting link for various initiatives. The focus is on an exchange between industry and research. This will be accompanied by the provision of infrastructure for the calibration and evaluation of quantum technology. The various partners also play an essential role here. Under the direction of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (National Metrology Institute), among other things, the calibration of photon sources and detectors can be offered. The Fraunhofer IOF provides various infrastructures, such as fiber (see above), free beam path, or - in the future - an optical ground station for satellite communication.

Furthermore, Fraunhofer IOF was able to successfully acquire additional projects in national and international competition together with further partners from science and industry. With the implementation of the associated research and development tasks, Fraunhofer IOF is making decisive contributions to the technological challenges surrounding the quantum networks of the future and their applications.

Of particular importance in this context are the test track for quantum communication between MEOS in Erfurt and the performance center in Jena, which is funded by the Free State of Thuringia in connection with the quantum application laboratory, as well as the ground station planned for the roof of the new Fraunhofer IOF building. The latter will enable internationally visible excellent research and contract work to address the highly relevant space segment in quantum communication.





# QUANTIFISENS

## Startschuss für QUANTIFISENS

Kick-off for QUANTIFISENS – the sensing [r]evolution

Das regionale RUBIN-Bündnis QUANTIFISENS aus elf Industrieunternehmen und zwei Forschungseinrichtungen startete offiziell im September 2022 mit dem Aufbau einer quanteninspirierten, omnifunktionalen Fasersensorplattform zum Ziel der Bereitstellung angepasster vollintegrierter Sensorlösungen für breite Einsatzgebiete und zur langfristigen Entwicklung der Quantentechnologien für einen nachhaltigen Innovationssprung der Fasersensorik.

Ziel des Bündnisses ist die Lösung komplexer Fragestellungen z. B. aus der medizinischen Bildgebung und der digitalen Infrastrukturüberwachung. Durch das Zusammenführen der Kompetenzen in den Bereichen faseroptischer Sensorik, quantentechnologischer Konzepte sowie innovativer Software zur Datenerfassung, -auswertung und -visualisierung werden technologische Herausforderungen auf dem Gebiet der Quantensensorik adressiert. Langfristig wird dies zu einer deutlichen Verbesserung der Funktionalität und Anwendbarkeit faseroptischer Sensoren führen.

Die gemeinsame Innovationsbasis setzt sich aus den Themenkomplexen »Optische Fasertechnologie«, »Streuungs-basierte Messtechnik«, »Quanten- und Lasertechnologie«, »Software

The regional RUBIN alliance QUANTIFISENS of eleven industrial companies and two research institutions has been started in September 2022 with setting up a quantum-inspired, omnifunctional fiber sensor platform in order to provide customized, fully integrated sensor solutions for a wide range of applications in different markets and long-term developments in quantum technologies for a sustainable leap in innovation in fiber optical sensors.

The aim of the alliance is to solve complex problems, e.g., from medical imaging and digital infrastructure monitoring. Technological challenges in the field of quantum sensors are addressed by combining expertise in the areas of fiber optical sensors, quantum technological concepts, and innovative software for data acquisition, evaluation and visualization. In the long term, this will lead to a significant improvement in functionality and applicability of fiber optical sensors. The common basis for innovation is made up of the subject areas "optical fiber technology", "scattering-based measurement technology", "quantum and laser technology", "software and data analysis" as well as "omnifunctional system integration".

The Fraunhofer IOF ensures the coordination of the research and development fields across partners and demonstrators by



und Data Analysis« sowie »Omnifunktionale Systemintegration« zusammen. Die Koordination der Forschungs- und Entwicklungsfelder des Verbundes leistet das Fraunhofer IOF Partner- und Demonstratorübergreifend durch Dr. Stephanie Hesse-Ertelt. Unter der Leitung des Bündnissprechers »Forschung«, Dr. Thomas Schreiber, entwickelt das Fraunhofer IOF während der dreijährigen Projektlaufzeit eine omnifunktionale Fasertechnologie, maßgeschneiderte Lasersysteme zur verbesserten Auflösung in verteilter Fasersensorik als auch Quellen für quantenbildgebende Fasersensorik.

Es ist vorgesehen, die ersten Ergebnisse auf der erstmals in Jena stattfindenden W3+ Fair in 2023 vorzustellen. Das Gesamtvorhaben wird mit insgesamt etwa 12,5 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert; hiervon erhält das Fraunhofer IOF mehr als 3,8 Mio. Euro. Weitere ca. 5,5 Mio. Euro des Gesamtbudgets werden von den beteiligten Industriepartnern eigenfinanziert.

Wir danken dem BMBF für die Finanzierung (FKZ 03RU1K07B und 03RU1U071B) im Rahmen der Förderrichtlinie »Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation« (RUBIN).

[www.quantifisens.com](http://www.quantifisens.com)

Dr. Stephanie Hesse-Ertelt. Under the leadership of the alliance spokesman for research, Dr. Thomas Schreiber, the Fraunhofer IOF is developing an omnifunctional fiber technology, tailor-made laser systems for improved resolution in distributed fiber sensors as well as sources for quantum imaging fiber sensors in the three-year project phase. It is planned to present the first results at the W3+ Fair, which will be held in Jena for the first time in 2023.

The project is funded with a total of around 12.5 million euros from the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). Fraunhofer IOF will receive more than 3.8 million euros of this. A further amount of approx. 5.5 million euros of the total budget is self-financed by the industrial partners involved.

Funding (grant no. 03RU1K07B and 03RU1U071B) within the framework "Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation" (RUBIN) of the BMBF is gratefully acknowledged.

**QUANTIFISENS**  
DETECT ANALYZE FOCUS



fo+

## FREEFORM OPTICS PLUS

10 Jahre Freiformen / 10 years of freeforms

Der regionale Wachstumskern fo+ [freeform optics plus] wurde von August 2018 bis Juli 2022 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in einer zweiten Forschungsphase gefördert. Der Verbund aus neun führenden Photonik-Unternehmen und zwei renommierten Forschungsinstituten entwickelte die Basis für den Einsatz von Freiformoptiken

- geeignet für einen erweiterten Spektralbereich,
- mit verlässlichen Parametern,
- bereit für die Serienproduktion und
- für einen breiteren Anwendungsbereich, einschließlich Lasermaterialbearbeitung, maschinelles Sehen und Sensorik im Automobilbereich

Unter der Gesamtkoordination und FuE-Leitung des Verbundes durch Dr. Stephanie Hesse-Ertelt und Dr. Ramona Eberhardt wurde das Vorhaben Mitte 2022 erfolgreich abgeschlossen. Anhand von Demonstratoren auf Komponenten- und Systemebene wurde die in der Region etablierte Technologieplattform »Freiformoptik« mit den Komponenten »Design«, »Material«, »Bearbeitung«, »Beschichtung«, »Strukturierung« und »Systeme« eindrucksvoll validiert.

Das Fraunhofer IOF entwickelte Freiformtechnologien entlang der gesamten Prozesskette, und verifizierte diese beispielweise anhand von Hauptdemonstratoren: des reflektiven, modularen

The regional growth core fo+ [freeform optics plus] has been funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in a second research phase from August 2018 to July 2022. The alliance of nine leading photonics companies and two renowned research institutes developed the basis for the use of freeform optics

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

Under the overall coordination and R&D management of the alliance by Dr. Stephanie Hesse-Ertelt and Dr. Ramona Eberhardt, the project was successfully completed in mid-2022. The technology platform with the components "design", "materials", "processing", "coating", "structuring", and "systems" established in the region has been impressively validated by demonstrators at component and system level. The Fraunhofer IOF developed new technological principles for the production and application of freeform optics in the visual and ultraviolet spectral range under the direction of Dr. Stefan Risse, and dealt with the implementation of measurement technologies and replication.

The Fraunhofer IOF developed freeform technologies along the entire process chain and verified them, e. g., by main



Laserstrahlformers und des freiformbasierten Trackers für 3D Scanner.

Im vierten Projektjahr beteiligte sich das Fraunhofer IOF an der Präsentation der *fo+* Ergebnisse im Rahmen der »Wrap up & Round tour« auf der LASER World of Photonics 2022 in München, zu der das Bündnis Kunden aus Branchen wie der Lasermaterialbearbeitung, der industriellen Bildverarbeitung und der Automobilindustrie einlud, die *fo+* Lösungen für zukünftige Herausforderungen und Produkte kennenzulernen.

Das Fraunhofer IOF präsentierte unter anderem Ergebnisse zu Design und additiver Fertigung eines Topologieoptimierten Teleskopsystems mit ultrapräzisen Freiformspiegeln aus Metall als auch die additiv gefertigten Gehäuse eines Strahlaufweilers mit drei Spiegeln, Topologieoptimiert und auf Basis einer Schaumstruktur.

Das Bündnis *fo+* startet nun in die Verwertungsphase seiner Forschungs- und Entwicklungsergebnisse.

Wir danken allen Partnern und der Geschäftsstelle OptoNet e.V. für die erfolgreiche Zusammenarbeit sowie dem BMBF für die Finanzierung (FKZ 03WKCK1B und 03WKCX1B) im Rahmen der Initiative »Unternehmen Region – Innovative Regionale Wachstumskerne«.

[1] *Wachstumskerntreffen. / Growth Core Meeting*

demonstrators: the reflective, modular laser beam shaper and the freeform-based tracker for 3D scanners.

In the fourth year of the project, the Fraunhofer IOF participated in the presentation of the *fo+* results as part of the "Wrap up & Round tour" at the LASER World of Photonics 2022 in Munich, to which the alliance invited customers from sectors such as laser material processing, industrial image processing, and the automotive industry to get to know *fo+* solutions for future challenges and products. Among other things, the Fraunhofer IOF presented results on the design and additive manufacturing of a topology-optimized telescope system with ultra-precise freeform metal mirrors as well as additively manufactured housings of a beam expander with three mirrors, topology-optimized and based on a foam structure. The alliance *fo+* has now started the exploitation phase of its research and development results.

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

[www.fo-plus.de](http://www.fo-plus.de)





## Anhang – Publikationen und Aktivitäten Appendix – Publications and activities

### Artikel / Journals

- Abbasirad, N.; A. Barreda, D. Arslan, M. Steinert, Y.-J. Chen, J.-S. Huang, I. Staude, F. Setzpfandt, T. Pertsch  
**Near-field interference map due to a dipolar emission near the edge of a monocrystalline gold platelet**  
Journal of Optics (United Kingdom), 24(12), ISSN 20408978
- Abbasirad, N.; A. Barreda, Y.-J. Chen, J.-S. Huang, I. Staude, F. Setzpfandt, T. Pertsch  
**Near-field launching and mapping unidirectional surface plasmon polaritons using an automated dual-tip scanning near-field optical microscope**  
Photonics Research, 10(11), pp. 2628-2641, ISSN 23279125
- 3. Alberucci, A.; C. P. Jisha, M. Monika, U. Peschel, S. Nolte  
**Wave manipulation via delay-engineered periodic potentials**  
Physical Review Research, 4 (4), p. 14, ISSN 043162
- Aleshire, C.; A. Steinkopff, A. Klenke, C. Jáuregui, S. Kuhn, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, J. Limpert  
**High-energy Q-switched 16-core tapered rod-type fiber laser system**  
Optics Letters, 47(7), pp. 1725-1728, ISSN 1469592
- Alimohammadian, E.; K. Lammers, A. Alberucci, G. Djogo, C.P. Jisha, S. Nolte, P. Herman  
**Manipulating geometric and optical properties of laser-inscribed nanogratings with a conical phase front**  
Optics Express, 30(4), pp. 5360-5375, ISSN 10944087
- Baghdasaryan, B.; F. Steinlechner, S. Fritzsche  
**Maximizing the validity of the Gaussian approximation for the biphoton state from parametric down-conversion**  
Physical Review A, 106 (6), ISSN 063714

[1] *Photonics Days 2022 – Prof. Dr. Michèle Heurs spricht in ihrer Keynote über Gravitationswellen. / Photonics Days 2022 - Prof. Dr. Michèle Heurs talking about Gravitational waves in her keynote address.*

- Ballato, J.; U. Fotheringham, M. Hubert, S. Nolte, L. Petit, K.A. Richardson  
**Celebrating Optical Glass - the International Year of Glass (2022): feature issue introduction**  
Optical Materials Express, 12(12), pp. 4660-4664, ISSN 21593930
- Barreda, A.; A. Kuppadakkath, L. Ghazaryan, Z. Gan, K. Koshelev, T. Bucher, T. Pertsch, A. George, A. Turchanin, A. Szeghalmi, Y. Kivshar, D.-Y. Choi, I. Staude, F. Eilenberger  
**The impact of loss on high-Q resonant metasurfaces: A case study for heated a-Si:H**  
Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 292, ISSN 10944087
- Barreda, A.; C. Zou, A. Sinelnik, E. Menshikov, I. Sinev, T. Pertsch, I. Staude  
**Tuning and switching effects of quasi-BIC states combining phase change materials with all-dielectric metasurfaces**  
Optical Materials Express, 12(8), pp. 3132-3142, ISSN 21593930
- Bartnick, M.; G. Bharathan, T. A. Goebel, R. G. Kramer, S. Nolte, C. S. Bres  
**Wavelength-stabilized tunable mode-locked thulium-doped fiber laser beyond 2  $\mu$  m**  
Optics Letters, 47 (8), pp. 2085-2088
- Beer, S.; J. Gour, A. Alberucci, C. David, S. Nolte, U. D. Zeitner  
**Second harmonic generation under doubly resonant lattice plasmon excitation**  
Optics Express, 30 (22), pp. 40884-40896
- Beladiya, V.; T. Faraz, P. Schmitt, A. S. Munser, S. Schröder, S. Riese, C. Mühlig, D. Schachtler, F. Steger, R. Botha, F. Otto, T. Fritz, C. can Helvoirt, W. M. M. Kessels, H. Gargouri, A. Szeghalmi  
**Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition of HfO<sub>2</sub> with Substrate Biasing: Thin Films for High Reflective Mirrors**  
ACS Applied Materials Interfaces, 14, pp. 14677-14692
- Blothe, M.; M. Chambonneau, S. Nolte  
**Nanostructured back surface amorphization of silicon with picosecond laser pulses**  
Applied Physics Letters, 121 (10), ISSN 036951
- Böttner, P.; T. Peschel, A. Brady, D. Heinig, M. Goy, R. Eberhardt, S. Nolte  
**Design of a metal-based deformable mirror for orthogonal beam deflection and highly dynamic beam oscillation**  
Optics Express, 30 (25), pp. 45178-45194
- Bräuer-Burchardt, C.; C. Munkelt, C. Bleier, M. Heinze, I. Gebhart, P. Kühmstedt, G. Notni  
**A New Sensor System for Accurate 3D Surface Measurements and Modelling of Underwater Objects**  
Applied Sciences, 12, p. 413
- Bräuer-Burchardt, C.; C. Munkelt, M. Heinze, I. Gebhart, P. Kühmstedt, G. Notni  
**Underwater 3D measurements with advanced camera modelling**  
PFG Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, ISSN 25122789
- Bräuer-Burchardt, C.; R. Ramm, P. Kühmstedt, G. Notni  
**The Duality of Ray-Based and Pinhole-Camera Modeling and 3D Measurement Improvements Using the Ray-Based Model**  
Sensors (Basel, Switzerland), 22 (19), ISSN 14248220
- Cabrejo-Ponce, M.; C. Spiess, A.L. Marques Muniz, P. Ancsin, F. Steinlechner  
**GHz-pulsed source of entangled photons for reconfigurable quantum networks**  
Quantum Science and Technology, 7(4), ISSN 20589565
- Cheng, X.; S. Schröder, C. Stolz, X. Liu  
**Special Section Guest Editorial: Frontiers of Optical Coatings**  
Optical Engineering, 61 (3), ISSN 913286
- Cholsuk, C.; S. Suwanna, T. Vogl  
**Tailoring the Emission Wavelength of Color Centers in Hexagonal Boron Nitride for Quantum Applications**  
Nanomaterials, 12 (14), p. 13, ISSN 2427
- Dittrich, P.-G.; D. Kraus, E. Ehrhardt, T. Henkel, G. Notni  
**Multispectral Imaging Flow Cytometry with Spatially and Spectrally Resolving Snapshot-Mosaic Cameras for the Characterization and Classification of Bioparticles**  
Micromachines, 13 (2), p. 238
- Eschen, W.; L. Loetgering, V. Schuster, R. Klas, A. Kirsche, L. Berthold, M. Steinert, T. Pertsch, H. Gross, M. Krause, J. Limpert, J. Rothhardt
- **Material-specific high-resolution table-top extreme ultraviolet microscopy**  
M Light: Science and Applications, 11 (1), ISSN 20955545

# Artikel Journals

- Falmbigl, M.; K. Godin, J. George, C. Mühlig, B. Rubin  
**Effect of annealing on properties and performance of  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  optical coatings for UV-applications**  
Optics Express, 30 (8), pp. 12326-12336, ISSN 10944087
- Fedotova, A.; L. Carletti, A. Zilli, F. Setzpfandt, I. Staude, A. Toma, M. Finazzi, C. De Angelis, T. Pertsch, D.N. Neshev, M. Celebrano  
**Lithium Niobate Meta-Optics**  
ACS Photonics, 9 (12), pp. 3745–3763, ISSN 23304022
- Gan, Z.; E. Najafidehaghani, S.H. Han, S. Shradha, F. Abtahi, C. Neumann, J. Picker, T. Vogl, U. Hübner, F. Eilenberger, A. George, A. Turchanin  
**Patterned Growth of Transition Metal Dichalcogenide Monolayers and Multilayers for Electronic and Optoelectronic Device Applications**  
Small Methods, ISSN 23669608
- Gierschke, P.; C. Grebing, M. Abdelaal, M. Lenski, J. Buldt, Z. Wang, T. Heuermann, M. Mueller, M. Gebhardt, J. Rothhardt, J. Limpert  
**Nonlinear pulse compression to 51-W average power GW-class 35-fs pulses at 2- $\mu\text{m}$  wavelength in a gas-filled multi-pass cell**  
Optics Letters, 47 (14), pp. 3511-3514, ISSN 1469592
- Gili, V.F.; C. Piccinini, M. Safari Arabi, P. Kumar, V. Besaga, E. Brambila, M. Gräfe, T. Pertsch, F. Setzpfandt  
**Experimental realization of scanning quantum microscopy**  
Applied Physics Letters, 121 (10), ISSN 036951
- Gour, J.; S. Beer, A. Alberucci, U. D. Zeitner, S. Nolte  
**Enhancement of third harmonic generation induced by surface lattice resonances in plasmonic metasurfaces**  
Optics Letters, 47 (22), pp. 6025-6028
- Hadrich, S.; E. Shestaev, M. Tschernajew, F. Stutzki, N. Walther, F. Just, M. Kienel, I. Seres, P. Jojart, Z. Bengery, B. Gilicze, Z. Varallyay, A. Borzsonyi, M. Muller, C. Grebing, A. Klenke, D. Hoff, G. G. Paulus, T. Eidam, J. Limpert  
**Carrier-envelope phase stable few-cycle laser system delivering more than 100 W, 1 mJ, sub-2-cycle pulses**  
Optics Letters, 47 (6), pp. 1537-1540
- Hengster, J.; J. Elsner, K. Lutter, T. Uphues  
**Thin-film Hybrid Nanostructures: A Perspective to Subcycle Opto-Electronics and Coherent Control**  
Applied Sciences (Switzerland), 12 (10), ISSN 20763417
- Heuermann, T.; Z. Y. Wang, M. Lenski, M. Gebhardt, C. Gaida, M. Abdelaal, J. Buldt, M. Muller, A. Klenke, J. Limpert  
**Ultrafast Tm-doped fiber laser system delivering 1.65-mJ, sub-100-fs pulses at a 100-kHz repetition rate**  
Optics Letters, 47 (12), pp. 3095-3098
- Heusinger, M.; T. Flugel-Paul, K. Grabowski, D. Michaelis, S. Risse, U. D. Zeitner  
**High-dispersion TIR-GRISMs with flattened angular dispersion profile**  
Optica, 9 (4), pp. 412-418
- Junger, C.; R. Fütterer, M. Rosenberger, G. Notni  
**FPGA-based multi-view stereo system with flexible measurement setup**  
Measurement: Sensors, 24, ISSN 26659174
- Kahvedžić, R.; S. Gräfe  
**Strong-field approximation with leading-order nondipole corrections**  
Physical Review A, 105 (6), ISSN 24699926
- Kahvedžić, R.; S. Gräfe  
**Shift of the photoelectron momentum against the radiation pressure force in linearly polarized intense midinfrared laser fields**  
Physical Review A, 106 (4), ISSN 24699926
- Kinast, J.; A. Tünnermann, A. Undisz  
**Dimensional Stability of Mirror Substrates Made of Silicon Particle Reinforced Aluminum**  
Materials, 15 (9)
- Klenke, A.; A. Steinkopff, C. Aleshire, C. Jauregui, S. Kuhn, J. Nold, C. Hupel, S. Hein, S. Schulze, N. Haarlammert, T. Schreiber, A. Tünnermann, J. Limpert  
**500 W rod-type 4 × 4 multicore ultrafast fiber laser**  
The Optical Society, 47 (2), pp. 345-348, ISSN 1469592
- Klenke, A.; C. Jauregui, A. Steinkopff, C. Aleshire, J. Limpert  
**High-power multicore fiber laser systems**  
Progress in Quantum Electronics, 84, ISSN 796727
- Knoblich, M.; M. Kraus, D. Stumpf, L. Werner, H. Hillmer, R. Brunner  
**Variable ring-shaped lithography for the fabrication of meso- and microscale binary optical elements**  
Applied Optics, 61 (8), pp. 2049-2059, ISSN 1559128X

- Kobylinskiy, A.; L. Werner, M. Kraus, H. Hillmer, R. Brunner  
**Folded beam path architecture for highly efficient filter-based spectral sensors**  
Applied Optics, 61 (33), pp. 9996-10001, ISSN 1559128X
- Kohl, H.; L. Schade, G. Matthäus, T. Ullsperger, B. Yürekli, B. Seyfarth, S. Nolte  
**Lasergestützte Additive Fertigung reiner Kupferbauteile unter Einsatz von Laserstrahlung im NIR-Spektralbereich**  
Metall, 75(11-12), pp. 400-402, ISSN 260746
- Kraus, M.; T. Hönle, E. Förster, P. Sadlowski, D. Stumpf, A. Schöneberg, B. Laue, R. Brüning, H. Hillmer, R. Brunner  
**Compact double-pass Echelle spectrometer employing a crossed diffraction grating**  
Optics Express, 30 (17), pp. 31336-31353, ISSN 10944087
- Kumar, P.; S. Saravi, T. Pertsch, F. Setzpfandt, A. Sukhorukov  
**Direct growth of monolayer MoS<sub>2</sub> on nanostructured silicon waveguides**  
Nanophotonics, ISSN 21928614
- Landmann, M.; S. Heist  
**Transparente Teile erfassen**  
Robotik und Produktion, 6, p. 70
- Lenski, M.; T. Heuermann, M. Gebhardt, Z. Y. Wang, C. Gaida, C. Jauregui, J. Limpert  
**Inband-pumped, high-power thulium-doped fiber amplifiers for an ultrafast pulsed operation**  
Optics Express, 30 (24), pp. 44270-44282
- Li, D.; H. Shan, C. Rupprecht, H. Knopf, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Qin, S. Tongay, M. Nuß, S. Schröder, F. Eilenberger, S. Höfling, C. Schneider, T. Brixner  
**Hybridized Exciton-Photon-Phonon States in a Transition Metal Dichalcogenide van der Waals Heterostructure Microcavity**  
Physical Review Letters, 128 (8), ISSN 319007
- Linss, S.; D. Michaelis, U. D. Zeitner  
**Ultrafast farfield simulation of non-paraxial computer generated holograms**  
Optics Express, 30 (8), pp. 13765-13775
- Loetgering, L.; S. Witte, J. Rothhardt  
**Advances in laboratory-scale ptychography using high harmonic sources**  
Optics Express, 30 (3), pp. 4133 – 4164
- Moradi, M.; I. Staude, T. Pertsch, M. Jager, U. S. Schubert  
**Acid-base responsive photoluminescence switching of CdSe/ZnS quantum dots coupled to plasmonic gold film using nanometer-thick poly (2-diethylamino)ethyl methacrylate layer**  
Nanoscale, 14 (34), pp. 12395-12402
- Ngo, G.Q.; E. Najafidehaghani, Z. Gan, S. Khazaei, M.P. Siems, A. George, E.P. Schartner, S. Nolte, H. Ebendorff-Heidepriem, T. Pertsch, A. Tuniz, M.A. Schmidt, U. Peschel, A. Turchanin, F. Eilenberger  
**In-fibre second-harmonic generation with embedded two-dimensional materials**  
Nature Photonics, 16, pp. 769–776, ISSN 17494885
- Perna, A.S.; E. Ortega, M. Gräfe, F. Steinlechner  
**Visible-wavelength polarization-entangled photon source for quantum communication and imaging**  
Applied Physics Letters, 120 (7), ISSN 036951
- Portwich, F.L.; Y. Carstensen, A. Dasgupta, S. Kupfer, R. Wyrwa, H. Görls, C. Eggeling, B. Dietzek, S. Gräfe, M. Wächtler, R. Kretschmer  
**A Highly Fluorescent Dinuclear Aluminium Complex with Near-Unity Quantum Yield\*\***  
Angewandte Chemie - International Edition, ISSN 14337851
- Ramm, R.; M. Mozaffari-Afshar, D. Höhne, T. Hilbert, H. Speck, S. Kühl, D. Hoffmann, S. Erbes, P. Kühmstedt, S. Heist, G. Notni  
**High-resolution 3D shape measurement with extended depth of field using fast chromatic focus stacking**  
Optics Express, 30 (13), pp. 22590-22607, ISSN 10944087
- Ramm, R.; M. Heinze, P. Kühmstedt, A. Christoph, S. Heist, G. Notni  
**Portable solution for high-resolution 3D and color texture on-site digitization of cultural heritage objects**  
Journal of Cultural Heritage, 53, pp.165-175
- Rothhardt, C.; S. Klose, B. Satzer, S. Schmidl, K. Grabowski, P. Birckigt, E. Hilpert, U. Lippmann, R. Schlegel, S. Shestaeva, S. Schwinde, S. Risse  
**Technical layout and fabrication of a compact all-glass four-channel beam splitter based on a Kösters design**  
CEAS Space Journal, ISSN 18682502
- Sachse, A.; I. Hasenbein, P. Hortschansky, K.D. Schmuck, S. Maenz, B. Illerhaus, P. Kuehmstedt, R. Ramm, R. Huber, E. Kunisch, V. Horbert, F. Gunnella, A. Roth, H. Schubert, R.W. Kinne  
**Efficient freeform-based pattern projection for 3D measurements**  
Optics Express, 30 (22), pp. 39534-39543, ISSN 10944087



# Artikel Journals

- Sachse, A.; I. Hasenbein, P. Hortschansky, K.D. Schmuck, S. Maenz, B., Illerhaus, P. Kuehmstedt, R. Ramm, R. Huber, E. Kunisch, V. Horbert, F. Gunnella, A. Roth, H. Schubert, R.W. Kinne  
**Treatment of tibial bone defects in senile osteopenic sheep with BMP-2 or GDF-5-coated hydroxyapatite/tricalcium-phosphate/brushite cylinders**  
Cells (MDPI)
- Santos, E.A.; T. Pertsch, F. Setzpfandt, S. Saravi  
**Subdiffraction Quantum Imaging with Undetected Photons**  
Physical Review Letters, 128 (17), ISSN 319007
- Schenkl, S.; R. Ramm, G. Mall, P. Kühmstedt  
**Person identification during growth – a preliminary study for accuracy assessment of external ear 3D models generated by photogrammetry**  
Forensic Science International (Elsevier)
- Schmelz, A.; K. Gerold, T. Käsebier, N. Sergeev, A. Szeghalmi, U.D. Zeitner  
**Optical properties of black silicon structures ALD-coated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**  
Nanotechnology, 34 (1), ISSN 13616528
- Schmitt, P.; N. Felde, T. Döhring, M. Stollenwerk, I. Uschmann, K. Hanemann, M. Siegler, G. Klemm, N. Gratzke, A. Tünnermann, S. Schwinde, S. Schröder, A. Szeghalmi  
**Optical, structural, and functional properties of highly reflective and stable iridium mirror coatings for infrared applications**  
Optical Materials Express, 12 (2), pp. 545 – 559, ISSN 21593930
- Sekman, Y.; M. Trost, T. Lammers, J. Hartung, S. Risse, S. Schröder  
**Topography stitching in the spatial frequency domain for the representation of mid-spatial frequency errors**  
Applied Optics, 61 (28), pp. 8286-8301, ISSN 1559128X
- Singh, A.V.; T. Pertsch  
**Spatio-temporal propagation dynamics of Airy plasmon pulses**  
Optics Express, 30, (8), pp. 13765-13775
- Shan, H. Y.; I. Iorsh, B. Han, C. Rupprecht, H. Knopf, F. Eilenberger, M. Esmann, K. Yumigeta, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Klembt, S. Hofling, S. Tongay, C. Anton-Solanas, I. A. Shelykh, C. Schneider  
**Brightening of a dark monolayer semiconductor via strong light-matter coupling in a cavity**  
Nature Communications, 13 (1), p. 7
- Stark, H.; C. Grebing, J. Buldt, A. Klenke, J. Limpert  
**Divided-pulse nonlinear compression in a multipass cell**  
Journal of Physics-Photonics
- Steinkopff, A.; C. Aleshire, A. Klenke, C. Jauregui, J. Limpert  
**Mitigation of thermally-induced performance limitations in coherently-combined multicore fiber amplifiers**  
Optics Express, 30 (10), pp. 16896-16908, ISSN 10944087
- Svoboda, L.; J. Sperrhake, M. Nisser, C. Zhang, G. Notni, H. Proquitté  
**Contactless heart rate measurement in newborn infants using a multimodal 3D camera system**  
Frontiers in Pediatrics, 10, ISSN 22962360
- Temmler, A.; M. Cortina, I. Ross, M.E. Küpper, S.-K. Rittinghaus  
**Evolution of Surface Topography and Microstructure in Laser Polishing of Cold Work Steel 1.2379 (AISI D2) Using Quadratic, Top-Hat Shaped Intensity Distributions**  
Optical Materials Express, 12 (2), pp. 545-559, ISSN 19961944
- Töpfer, S.; M.G. Basset, J. Fuenzalida, F. Steinlechner, J.P. Torres, M. Gräfe  
**Quantum holography with undetected light**  
Science Advances, 8 (2), ISSN 23752548
- Topper, B.; A. Neumann, A. R. Albrecht, A. S. Flores, S. Kuhn, D. Hassner, S. Hein, C. Hupel, J. Nold, N. Haarlammer, T. Schreiber, M. Sheik-Bahae, A. Mafi  
**Laser cooling experiments to measure the quantum efficiency of Yb-doped silica fibers**  
Optics Letters, 47 (14), pp. 3608-3611
- Tran, J.H.; P. Traber, B. Seidler, H. Görls, S. Gräfe, M. Schulz  
**Ligand-Induced Donor State Destabilisation – A New Route to Panchromatically Absorbing Cu(I) Complexes**  
Chemistry - A European Journal, ISSN 9476539

- Vega, A.; E.A. Santos, J. Fuenzalida, M. Gilaberte Basset, T. Pertsch, M. Gräfe, S. Saravi, F. Setzpfand  
**Fundamental resolution limit of quantum imaging with undetected photons**  
Physical Review Research, 4 (3), ISSN 26431564
- Walther, D.; L. Schmidt, K. Schricker, C. Junger, J.P. Bergmann, G. Notni, P. Mäder  
**Automatic detection and prediction of discontinuities in laser beam butt welding utilizing deep learning**  
Journal of Advanced Joining Processes, 6
- Weissflog, M.A.; M. Cai, M. Parry, M. Rahmani, L. Xu, D. Arslan, A. Fedotova, G. Marino, M. Lysevych, H.H. Tan, C. Jagadish, A. Miroshnichenko, G. Leo, A.A. Sukhorukov, F. Setzpfand, T. Pertsch, I. Staude, D.N. Neshev  
**Far-Field Polarization Engineering from Nonlinear Nanoresonators**  
Laser and Photonics Reviews, ISSN 18638880
- Widholz, G.; U. Zeitner  
**Analysis of iterative design algorithms for achromatic deterministic diffusers**  
Applied Optics, 61(26), pp. 7571-7578, ISSN 1559128X
- Wilbrandt, S.; O. Stenzel, A. Liaf, P. Munzert, S. Schwinde, S. Stempfhuber, N. Felde, M. Trost, T. Seifert, S. Schröder  
**Spectrophotometric Characterization of Thin Semi-Transparent Aluminum Films Prepared by Electron Beam Evaporation and Magnetron Sputtering**  
Coatings, 12 (9)
- Wolleb, S. J.; F. Kemper, U. Schulz  
**Oberflächenfunktionalisierung 3D-gedruckter transparenter Optiken: Plasmabehandlung von hochtransparenten Hybridpolymeren**  
Vakuum in Forschung und Praxis, 34 (5), pp. 39-43, ISSN 0947076X
- Zeitner, U.D.; H. Dekker, F. Burmeister, T. Flügel-Paul, A. Bianco, A. Zanutta  
**High efficiency transmission grating for the ESO CUBES UV spectrograph**  
Experimental Astronomy
- Zhao, X.; M. Baudisch, M. Beutler, T. Gabler, S. Nolte, R. Ackermann  
**Tunable picosecond optical parametric amplifier pumped by 1 ps pulses at 1  $\mu\text{m}$  for coherent anti-Stokes Raman scattering**  
Optics Express, 30 (19), pp. 33850-33859, ISSN 10944087
- Ziems, K.M.; J. Bruhnke, V. Engel, S. Gräfe  
**Nuclear–Electron Correlation Effects and Their Photoelectron Imprint in Molecular XUV Ionisation**  
Frontiers in Chemistry, 10, ISSN 22962646
- Zou, C.; P. Poudel, S.L. Walden, K. Tanaka, A. Minovich, T. Pertsch, F.-H.Schacher, I. Staude  
**Multiresponsive Dielectric Metasurfaces Based on Dual Light- and Temperature-Responsive Copolymers**  
Advanced Optical Materials, ISSN 21951071

# Abschlussarbeiten

## Theses

### Bachelorarbeiten / Bachelor theses

- Jakob Bruhnke  
**Predicting Propagation of Paraxial Waves Using Physics-Informed Neural Networks**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Bruno Bussemer  
**Konzeptentwicklung zur Reorganisation des Prozessflusses im Bereich der Montage für Zweigelenkwellen**  
Technische Universität Ilmenau
- Helena Ida Kramer  
**Semiklassische Simulation von Tunnelionisation in bizirkularen Starkfeldern**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Nicolas Killermann  
**Auswirkungen hoher Temperaturen auf die optischen und mechanischen Eigenschaften von mittels ALD hergestellten TiO<sub>2</sub>-Nanolaminaten**  
EAH Jena
- Zhi Xi Koay  
**Untersuchung der Maschinenfähigkeitszahl anhand der Messsystemanalyse bei einem optischen Prüfsystem sowie Möglichkeiten der Verbesserung durch geeignete Messstrategien**  
Technische Universität Ilmenau
- Elisa Köthe  
**Messunsicherheitsbestimmung für das Dunkelsignal von Leuchtdichtemesskameras unter Verwendung der Monte-Carlo-Methode und verschiedener Regressionsmodelle**  
Technische Universität Ilmenau
- Jonas Margraf  
**Characterization Of A Regenerative Stretcher For Use In CPA Systems**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Thomas Olbricht  
**Entwicklung einer Software für die Charakterisierung von Kameras nach EMVA-Standard 1288 - Release 4.0 Linear mit dem MATLAB-App Designer**  
Technische Universität Ilmenau

- Joanna Rehfeldt  
**Untersuchungen zum konstruktiven Entwurf einer motorisierten, höhenverstellbaren Z-Achse für das modulare Sichtprüfgerät Qualileo**  
Technische Universität Ilmenau
- Nils Rommel  
**Zeitaufgelöste Streulichtmessungen an optischen Systemen**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Jan Till Schmieder  
**Untersuchung des Einflusses thermischer 3D-Messungen auf die Probenunversehrtheit**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Pia Schubert  
**Streulichtbasierte Analyse von Oberflächendefekten im sub-mikrometer Bereich**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Nora Tadewaldt  
**Untersuchung des Einflusses von Subsurface-Damage auf die laserinduzierte Zerstörschwelle optischer Komponenten**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Sonja Weitzing  
**Nonlinear Frequency Conversion in Hybrid Bragg- and Mie-resonant Photonic Nanostructures**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Lei Xiao  
**Datensatzanalyse ausgewählter Schüttgüter unter Verwendung von Hyperspektralsensorsystemen**  
Technische Universität Ilmenau

### Masterarbeiten / Master theses

- Namig Alasgarzade  
**Study of the Mechanisms Governing Ultrafast Laser Waveguide Inscription in Silicon and Associated Properties**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Waref Ali  
**Entwicklung von stabilen gedampften Antireflex-Schichtsystemen für starre Endoskope**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

- Philippe Ancsin  
**Modulated entangled photon source for applications beyond QKD**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Anton Averin  
**Non-invasive glucose concentration detection based on its specific rotation in human tissues**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Andreas Binder  
**Bestimmung des Gelenkwinkels eines geländegängigen autonomen Gabelstaplers auf Basis von 2D-Kameradaten**  
Technische Universität Ilmenau
- Jana Broghammer  
**Ähnlichkeitsmaße zur dichten Korrespondenzbestimmung in Multispektralbildern bei passiven Stereoverfahren**  
Technische Universität Ilmenau
- Julia Bruischütz  
**Methodik-Entwicklung zur prozessbegleitenden Auswertung von Hochgeschwindigkeitsvideos des Laserkontaktierprozesses elektrischer Antriebe**  
Technische Universität Ilmenau
- Li Chen  
**Ein dynamischer Bewegungsplanungsalgorithmus für den Roboterarm (Universal-Robot-10) basierend auf ROS, GTSAM und miniSAM**  
Technische Universität Ilmenau
- Dupish Dupish  
**Towards Real-time Quantum Ghost Imaging**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Nico Lennart Döll  
**Hong-Ou-Mandel Interferometer for applications in quantum communication**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Sebastian Endreß  
**Entwicklung einer intelligenten Erkennungsroutine für Hyperspektralbilder unter Verwendung von klassischen, auf Bildmerkmalen trainierten Machine-Learning-Algorithmen**  
Technische Universität Ilmenau
- Lia Engelhardt  
**Tailored chromatic diffraction efficiency behavior of double-layer single-relief blazed gratings**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Christoph Freitag  
**Lensless Imaging with the Double Matrix Camera**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Santhoshi Gayathri Tangirala  
**Design of a Compact and Deployable Mirror Telescope for Quantum Key Distribution**  
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV), KIT Karlsruhe
- Christian Görner Tenorio  
**Erweiterung und Inbetriebnahme eines bildgestützten autopenetrographischen Analysesystems und Implementierung einer objektgenauen RGB-Z-Datenfusion von CCD-Farbzeilenkamera und 3D-Laser-Line-Scanner**  
Technische Universität Ilmenau
- Florian Grimm  
**Modenaufgelöste Polarisationsmessung mittels einer Highspeedkamera**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Genc Günay  
**Development of Solution Processable and Optoelectrowetting-based Digital Microfluidics**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Cornelius Benedikt Hake  
**In-Situ Auswertung des Laserkontaktierprozesses elektrischer Antriebe mittels Hochgeschwindigkeitsvideos sowie Machbarkeitsanalyse hinsichtlich des Einsatzes von künstlicher Intelligenz**  
Technische Universität Ilmenau
- Jian-Ying He  
**Modeling UV and VUV optical losses of rough aluminum films**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Pillay Jyothika  
**Application of machine learning methods for structure-property relationships of transition metal complexes**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Walaa Khoury  
**Entwicklung einer effizienten Echtzeit 3D-Rekonstruktion auf dem NVIDIA Jetson Nano**  
Technische Universität Ilmenau
- Peter Kraus  
**Entwicklung eines holografischen Wellenfrontensensors für die Laser-Kommunikation**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

# Abschlussarbeiten

## Theses

---

- Josefine Krause  
**Coupling of Quantum Emitters in 2D Materials to Laser-Written Waveguides**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Peter Krause  
**Entwicklung eines holografischen Wellenfrontsensors für die Laser-Kommunikation**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Saurabh Kulkarni  
**Development of Superhydrophobic surface via Inkjet printing for Microfluidics chips**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Markus Leipe  
**Pulsed SHG Source for Quantum Technology Applications**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Yang Li  
**Entwicklung eines Verfahrens zur Bewegungsplanung für den Roboterarm (Universal-Robots-10) basierend auf ROS und miniSAM**  
Technische Universität Ilmenau
- Marcel Matthes  
**Charakterisierung des Lithographie-Prozesses zur Herstellung von hochdichten Verdrahtungen und Kontakten für die 3D Wafer-Level-System-Integration**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Franziska Metz  
**Geschäftsmodellierung bei Hightech-Projekten junger Unternehmen – Erarbeitung eines differenzierten wirtschaftlichen Analyse- und Planungsmodells für ein mittel- bis langfristiges Forschungs- und Entwicklungsprojekt der satellitengestützten Quantenschlüsselverteilung**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Mohammad Mishuk  
**Characterization of Suspended Monolayer 2D Materials for He Atom Detection**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Ahmed Mohamed  
**Investigation, Implementation and Optimization of Multi-Tone BOFDA Measurements**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Yuya Murase  
**Full Inkjet Printed Organic Photodiodes for Lab-on-a-Chip Systems**  
Technische Universität Ilmenau
- Raghava Vinaykanth Mushunuri  
**Deep Learning Techniques for Vulvar Cancer Detection in Tissue Micro Arrays**  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Sebastian Nölle  
**Untersuchungen zu dynamischen Kalibrierverfahren im 2D-Bild mittels eines virtuellen Kalibriernormals**  
Technische Universität Ilmenau
- Muhammad Tayab Noor  
**Optimisation of the 3D point cloud by using a non-end-to-end stereo matching framework**  
Technische Universität Ilmenau
- Jannik Nuding  
**Lithografische Strukturierung von Spektrometergittern auf Spezialsubstraten**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Daniel Nwatu  
**Group-delay ripple reduction in femtoseconds inscribed chirped fiber Bragg gratings**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Karolina Paciorek  
**Design and characterization of field widened Michelson interferometer for quantum communication**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Martin Richter  
**Aufbau eines 3D-Analysesystems für die Messung von Forstwegen (Wegkörperoberfläche)**  
Technische Universität Ilmenau
- Florian Scheinpflug  
**Herstellung absorptionsarmer Nanostrukturen durch Entfernung organischer Bestandteile**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Katharina Schlauch  
**Die Inbetriebnahme und Optimierung eines Stereosensors auf Zeilenkamerabasis**  
Technische Universität Ilmenau

- Annika Schleinitz  
**Machbarkeitsstudie einer Projektentwicklung für Wohnen im ländlichen Raum. Vergleich von genossenschaftlichem und privatem Träger**  
Bauhaus-Universität Weimar
- Christian Schmittner  
**Design and Realization of a multistage high power monolithic fiber amplifier at eye-safe wavelength**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Martin Schröder  
**Theorie-inspirierte Modellierung maßgeschneiderter lichtgetriebener Elektronentransferprozesse an bioinspirierten [FeFe]-Hydrogenase-Modellsystemen**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Gojare Siddhi  
**Quantum mechanical insight into branching pathways in plasmon-induced catalysis**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Maisuradze Tamar  
**Tuning the electron relay – photophysics and hydrogen evolution activity of novel RuRh-photocatalysts assessed by quantum chemical methods**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Jiaming Tan  
**Intelligente Segmentierung von Objektstrukturen in der industriellen Qualitätssicherung**  
Technische Universität Ilmenau
- Maik Tienken  
**Tintenstrahldruck P(VDF-TrFE-CTFE) basierter Aktoren für den Einsatz in mikrofluidischen Lab-on-a-Chip-Systemen**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Srikanth Venkatramani  
**Analysis and prediction of high-resolution eye-tracking data**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Jingyu Wang  
**Entwicklung eines multifunktionalen Kalibrierungstools für einen Roboter mit Multikamerasystem**  
Technische Universität Ilmenau
- Silas Westhäuser  
**Entwicklung und Realisierung eines Konzepts zur additiven Fertigung hochpräziser Mikrolinsenarrays auf sphärischen Flächen mittels 2-Photonen-Polymerisation**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Xiangyun Zhang  
**Self-Guided Quantum Tomography of High Dimensional Spatial States of Photons**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Xiangyun Zhang  
**Self-Guided Quantum Tomography of High Dimensional Spatial States of Photons**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Licheng Zheng  
**Aufbau einer Dualmatrixkamera auf Silizium und InGaAs-Basis zur Erzielung einer breitbandigen multispektralen Bilderfassung**  
Technische Universität Ilmenau
- Tim Zwerenz  
**Optische und tribologische Eigenschaften von geschützten Goldschichtsystemen**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

# Abschlussarbeiten

## Theses

---

### Promotionen / Dissertation

- Najmeh Abbasirad  
**Automated dual-tip scanning near-field optical microscope for investigation of nanophotonic systems**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Danyun Cai  
**Development of Freeform Optical Systems**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Patrick Dietrich  
**Methoden zur Reduktion der Messlatenz von GOBO-Projektor-basierten 3D-Sensoren**  
TU Ilmenau
- Martin Gebhardt  
**Power scaling of few-cycle short-wavelength infrared laser sources for nonlinear frequency conversion**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Kim Alina Lammers  
**Polarization manipulation in femtosecond laser direct written waveguides in fused silica**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Martin Landmann  
**Schnelle und genaue 3D-Formvermessung mittels Musterprojektion und Stereobildaufnahme im thermischen Infrarot**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Amit Vikram Singh  
**Spatiotemporal evolution of non-diffracting plasmonic pulses**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Jan Sperrhake  
**Semi-analytical modeling of stacked metasurfaces**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Ilka Urban  
**Modellierung, Simulation und Vergleich der optischen Eigenschaften unterschiedlicher Akkommodationsmechanismen von terrestrischen, aquatischen und amphibischen Wirbeltieren unter spezieller Berücksichtigung unterschiedlicher Netzhautspezialisierungen**  
Universität Leipzig
- Ziyao Tang  
**Improved correction methods for symmetry-free systems**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

# Schutzrechte

## Intellectual property

### Patentoffenlegungen / Patent First Publications

- Limpert, J.; Tünnermann, A.; Seise, E.; Eidam, T.; Schimpf, D.; Röser, F.  
**Vorrichtung zum Verstärken und/oder Transportieren von elektromagnetischer Strahlung**  
EP 2 452 407 A2
- Jauregui, C (FSU); Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Multicore Fiber Amplifier based on the Talbot Effect**  
EP 3980823 A1
- Duparré, J.; Wippermann, F.  
**Multiaperturabbildungssysteme mit schmalem gemeinsamen Austrittsfenster**  
EP 3948389 A1 / US 2022/0011661 A1
- Wächter, C.; Höfer, B.; Schreiber, P.  
**Mehrkanalige opto-mechanische Adressiereinheit**  
EP 3997509 A1 / US 2022/0128827 A1
- Beckert, E.; Kemper, F.  
**Verfahren und Material zur digitalen Erzeugung eines optischen Elements mit integrierten Funktionalitäten**  
EP 4003695 A1
- Duparré, J.; Wippermann, F.  
**Multiaperturvorrichtung zur Bildaufnahme mit geringer Kanalzahl**  
EP 3981145 A1
- Notni, G.; Zhang, Ch.; Sperrhake, J.; Nisser, M.; Pertsch, T.  
**Verfahren und Vorrichtung zur kontaktfreien Bestimmung von zeitlichen Farb- und Intensitätsveränderungen**  
EP 4069072 A1 / US 2022/409078 A1
- Klenke, A.; Shestaev, E.; Limpert, J.; Tünnermann, A.  
**Methode zur Bestimmung und Stabilisierung der zeitlichen Carrier-Envelope Phasenänderungen eines gepulsten Lasersystems**  
DE 10 2020 124969 A1
- Zeitner, U.; Kley, E-B; Schrepel, F. (FSU)  
**Verfahren zur Herstellung eines diffraktiven optischen Elements und diffraktives optisches Element**  
US 2022/0397707 A1
- Schulz, U.; Gärtner, A.; Gratzke, N.; Füchsel, K.; Rickelt, F.  
**Schichtsysteme und Verfahren zu ihrer Herstellung zur Absenkung Reflexion für breite Spektralbereiche und Lichteinfallswinkel bis 80°**  
DE 10 2020 118 959 A1
- Eilenberger, F.; Vogl, T.  
**Erzeugung von Einzelphotonen**  
DE 10 2020 126 956 A1 / WO 2022/079180 A1
- Brüning, R.; Leitel, R.; Hubold, M.  
**Katadioptrisches System mit segmentiertem Bildfeld**  
WO 2022/00331 A1
- Muniz, A.; Steinlechner, F.  
**Device and Method for Generating Single-Photons via frequency to time multiplexing**  
EP 3971638 A 1
- Steinlechner, F.; Krzic, A. Rieländer, D.; Sharma, A.  
**Optical transmission system**  
EP 3978996 A1
- Steinlechner, F.; Berlich, R.; Krzic, A.  
**Method for spatial filtering of a quantum signal for free space quantum communication**  
EP 4012943 A1
- Oberdörster, A.; Gassner, C.; Brüning, R.; Satzer, B.  
**Effiziente Multiapertur-Fischaugenabbildung durch Prismen-Spiegeloptik**  
WO 2022/028964 A1
- Steinlechner, F.; Berlich, R.  
**Optical free space communication**  
EP 4002723 A1 / CN 114 520 688 A
- F. Eilenberger; T. Vogl  
**Verfahren und Geräte zur hochauflösenden Signal-Messungen mittels Zeit-zu-Digital-Wandlung**  
DE 102020133467A1
- Brüning, R.; Hubold, M.; Montag, E.  
**Tandemblendenarchitektur zur Füllfaktorhöhung von kompakten Multikanalabbildungssystemen**  
DE 102021202164 B3 /WO2022184837 A1
- Schulz U.; Rickelt, F.; Gärtner A.; Gratzke N.; Schröder S.;  
**Schichtsystem mit Antibeslag- und Antireflex-Eigenschaften und Verfahren zur Herstellung eines Schichtsystems**  
DE 102021112288 A1 / CH 718597 A2 /US 2022/0363915 A1



# Schutzrechte

## Intellectual property

---

- Eberhardt, R.; Böttner, P.  
**Dynamische 3D-Strahlformung für Verfahren der Lasermaterialbearbeitung**  
US 2022/0037846 A1

### Patenterteilungen / Patent Grants

- Danz, N.; Flämmich, M.;  
**Strahlungsemitternde organisch-elektronische Vorrichtung und Verfahren zu deren Herstellung**  
EP 2 652 810 B1
- Michaelis, D.; Wächter, C.; Danz, N.; Flämmich, M.  
**Beleuchtungsvorrichtung mit Strahlformer**  
EP 2414886 B1
- Kalkowski, G.; Eberhardt, R.; Schürmann, M.; Fabian, S.; Jahnke, C.  
**Verfahren zum silikatischen Bonden von beschichteten und unbeschichteten optischen Körpern**  
DE 10 2010 016 908 B4
- Sieler; Schreiber, P.  
**Projektionsdisplay und Verfahren zum Anzeigen eines Gesamtbildes für Projektionsfreiformflächen oder verkippte Projektionsflächen**  
EP 3712700 B1
- Duparré, J.; Wippermann, F.  
**Multiaperturabbildungssysteme mit schmalem gemeinsamen Austrittsfenster**  
TW I754907 B
- Wippermann, F., Reimann, A.; Bräuer, A.  
**Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben**  
US 11,209,607 B2
- Klenke, A. (IAP); Otto, H.-J.; Limpert, J. (IAP); Tünnermann, A. (FSU)  
**Optische Anordnung mit Strahlaufteilung**  
EP 3103167 B1
- Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.  
**Vorrichtung und Verfahren zur relativen Positionierung einer Multiaperturoptik mit mehreren optischen Kanälen relativ zu einem Bildsensor**  
VN 31488
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem**  
JP 7030048 /EP 3338130 B1
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.  
**3D-Multiaperturabbildung**  
US 11,244,434 B2
- Böhme, S.; Schreiber, T.; Harnisch, G.; Nold, J.; Liem, A.  
**Anordnung zur Modifizierung von Glaserzeugnissen**  
DE 102016112588 B4
- Plötner, M.; de Vries, O.; Schreiber, T.  
**Herstellung eines Faserkopplers**  
US 11,267,210 B2
- Wippermann, F.; Lange, N.; Pabst, O.  
**Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Verfahren zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes**  
US 11,474,331 B2
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs**  
KR 10-2340698
- Nolte, S.; Steinkopf, R.; Vetter, C. (FSU); Szameit, A. (FSU); Gross, H. (FSU); Ornigotti, M. (FSU)  
**Ring-Linsen-System**  
EP 3479162 B1 /US 11,372,254 B2
- Naujok, P.; Yulin, S.; Kaiser, N.;  
**Multilayerspiegel zur Reflexion von EUV-Strahlung und Verfahren zu dessen Herstellung**  
US 11,500,137 B2
- Schreiber, T.; Haarlammert, N.  
**Rückreflexschutz**  
GB 2573446 B
- Duparré, J.; Wippermann, F.  
**Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
CN 000110771132 B/ JP 7087000 B2

- Duparré, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Oberdörster, A.  
**Vorrichtung zur Abbildung von Teilgesichtsfeldern, Multiaperturvorrichtung und Verfahren zum Bereitstellen derselben**  
US 11,457,152 B2 / CN110771135 B
- Brüning, R.; Hubold, M.; Montag, E.  
**Tandemblendenarchitektur zur Füllfaktorhöhung von kompakten Multikanalabbildungssystemen**  
DE 10 2021 202164 B3
- Beckert, E.; Pabst, O.; Dannberg, P.  
**Verfahren zum Herstellen eines optischen Mikrolinsenarrays und Mikrolinsenarray**  
DE 10 2017 203180 B4
- Wippermann, F.; Duparré, J.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit geringer Falschlichtempfindlichkeit, Abbildungssystem und Verfahren zu Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
CN 000110892701B / EP 3649773 B1 / KR000102378001B1
- Wippermann, F.; Duparré, J.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit geringer Falschlichtempfindlichkeit, Abbildungssystem und Verfahren zu Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
CN 110771135 B
- Wippermann, F.; Duparré, J.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit geringer Falschlichtempfindlichkeit, Abbildungssystem und Verfahren zu Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
EP 3649773 B1 / JP 7022495 B1 / US 11,460,613 B2
- Popp, J.; Gottschall, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Meyer, T.  
**Erzeugung von synchronisierten Laserpulsen bei variablen Wellenlängen**  
EP 3652819 B1
- Beckert, E.; Schöler, U. (Olympus);  
**UKP-Laser gestützter Zentrierautomat zur ultrapräzisen Bearbeitung**  
EP 3769149 B1
- Chen, L.; Schreiber, P.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Fischer, S.  
**Optischer Strahlformer**  
US 11,327,325 B2/ KR000102480606 B1/ CN 111433638 B
- Limpert, J.; Tünnermann, A.; Stihler, C. (FSU); Jauregui Misas, C. (FSU)  
**Vermeidung von Modeninstabilität in einer optischen Verstärkerfaser**  
US 11,381,054 B2
- Wippermann, F.; Duparré, J.; Brückner, A.; Oberdörster, A.  
**Erzeugung von Panoramabildern**  
US 11,310,420 B2 / JP 7109559 B2
- Nolte, S.; Bergner, K. (FSU)  
**Steuerung nicht-linearer Wechselwirkung**  
EP 3676045 B1
- Brahm, A.; Gebhart, I.; Reinlein, C.  
**Projektionsvorrichtung und Projektionsverfahren**  
US 11,029,145 B2
- Lukowicz, H. v.; Hartung, J.; Risse, S.; Beier, M.  
**Halterung zur Fixierung und Referenzierung von mit einer Messvorrichtung an mehreren, nicht in einer gemeinsamen Ebene angeordneten Oberflächen in einer Einspannung zu vermessenden Bauteilen**  
DE 10 2018 209 017 B4
- Pertsch, T.; Eilenberger, F.; Gräfe, M.; Setzpfand, F.  
**Optische Anordnung zur Hyperspektralen Beleuchtung und Auswertung eines Objektes**  
EP 3 814 731 B1 / US 11/371,932 B2
- Knopf, H.; Eilenberger, F.; Schulz, U.;  
**Optische Schichtsysteme mit eingebetteten, atomar dünnen zweidimensionalen Schichten**  
DE 10 2018 125335 B4
- Schreiber, P.; Li, C.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Fischer, S.  
**Segmentiertes Fernlicht mit Multiaperturoptik/ Fernlichtscheinwerfer**  
US 11,421,846 B2
- Wippermann, F.; Duparré, J.  
**Multikanalabbildungsvorrichtung und Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
TW 000001742480 B
- Schulz, U.; Rickelt, F.; Schweinfurth, J.  
**Verfahren zur Herstellung einer porösen Siliziumoxidschicht**  
DE 10 2019 122451 B4
- Freitag, Chr.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Bilderfassungsvorrichtung und Verfahren zum Bestimmen einer plenoptischen Funktion**  
DE 10 2020 206768 B4

# Schutzrechte

## Intellectual property

---

- Brüning, R; Gassner, C.; Satzer, B.  
**Multiapertur-Projektor**  
DE 10 2021 202716 B4
- Brüning, R.; Hubold, M.; Montag, E.  
**Tandemblendenarchitektur zur Füllfaktorhöhung von kompakten Multikanalabbildungssystemen**  
DE 10 2021 202164 B3
- Blothe, M.; Chambonneau, M.; Nolte, S.; Kumkar, M.  
**Verfahren zum Zerteilen eines transparenten Werkstücks**  
DE10 2021 100 675 B4
- Gräfe, M; Steinlechner, F.; Gilaberte Basset, M.  
**Method for imaging or spectroscopy with a non-linear interferometer**  
US 11,454,541 B2
- Schwinde, S.; Leitel, R.; Schröder S.  
**Spiegel und Verfahren zu dessen Erneuerung**  
DE 10 2020 101041 B4

## Auszeichnungen Awards

---

- **Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2022**  
Dr. Peter Kühmstedt, Matthias Heinze, Dr. Christoph Munkelt
- **ORBEC SPIE Best Paper Award**  
Dr. Patrick Dietrich, Florian Siegmund, Dr. Christian Bräuer-Burchardt, Dr. Stefan Heist, Prof. Dr. Gunther Notni
- **ORBEC SPIE Best Student Paper Award**  
Christina Junger, Prof. Dr. Gunther Notni
- **Hugo Geiger Preis 2022**  
Dr. Robert Klas
- **Silbermedaille der internationalen Fachmesse iENA**  
Prof. Dr. Robert Brunner
- **Quantum Futur Award**  
Uday Chandrashekara

## Messebeteiligungen Trade fair participations

---

- **Laser World of Photonics & World of Quantum**  
26.-29.4.2022, München
- **Control**  
3.-6.5.2022, Stuttgart
- **Hannover Messe**  
30.5.-2.6.2022, Hannover
- **analytica**  
21.-24.6.2022, München
- **automatica**  
21.-24.6.2022, München
- **ILA**  
22.-25.6.2022, Berlin
- **Vision**  
4.-6.10.2022, Stuttgart
- **IZB**  
11.-13.10.2022, Wolfsburg
- **Messe K**  
19.-26.10.2022, Düsseldorf
- **Compamed**  
14.-17.11.2022, Düsseldorf
- **SpaceTech Expo**  
15.-17.11.2022, Bremen

# Ausgewählte Vorlesungen

## Selected lectures

---

- Dr. Erik Beckert  
**Optikmontage**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Vivek Beladiya  
**Analytical Instrumentation**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Robert Brunner  
**Optik - Grundlagen und Anwendungen**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Dr. Robert Brüning  
**Mikrooptik**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Dr. Falk Eilenberger  
**Quantum Optics**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Markus Gräfe  
**Integrated Quantum Photonics**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena  
  
**Quantum Imaging and Sensing**  
TU Darmstadt
- Prof. Stefanie Gräfe  
Quantenchemie I & II  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Herbert Gross  
Imaging and aberration theory  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Sebastian Händschke  
Gründungsorientierte Einführung in die BWL  
Bauhaus-Universität Weimar
- Prof. Dr.-Ing. Thomas Hühn  
Informatics and Communication Technology  
Hochschule Nordhausen
- Prof. Jens Limpert  
Laser Physics  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Christian Mühlig  
Moderne Laseranwendungen  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Prof. Stefan Nolte  
Experimental Optics  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Gunther Notni  
Bildverarbeitung für die Qualitätssicherung  
TU Ilmenau
- Dr. Reinhold Pabst  
Coaching und Führung  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Prof. Thomas Pertsch  
Fundamentals of modern optics  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Yusuf Sekman  
Design and Correction of Optical  
Systems Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Fabian Steinlechner  
Quantum Communication  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Olaf Stenzel  
Thin Film Optics  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Adriana Szeghalmi  
Vakuum und Dünnschichtphysik  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Josué Ricardo León Torres  
Quantum Imaging and Sensing  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Andreas Tünnermann  
Structure of Matter  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Uwe D. Zeitner  
Introduction to Optical Modeling  
Friedrich-Schiller-Universität

# Die Fraunhofer-Gesellschaft

## The Fraunhofer-Gesellschaft

---

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

The Fraunhofer-Gesellschaft's interdisciplinary research teams turn original ideas into innovations together with contracting industry and public sector partners, coordinate and complete essential key research policy projects and strengthen the German and European economy with ethical value creation. International collaborative partnerships with outstanding research partners and businesses all over the world provide for direct dialogue with the most prominent scientific communities and most dominant economic regions.

Founded in 1949, the Fraunhofer-Gesellschaft currently operates 76 institutes and research units throughout Germany. Over 30,000 employees, predominantly scientists and engineers, work with an annual research budget of €2.9 billion. Fraunhofer generates €2.5 billion of this from contract research. Industry contracts and publicly funded research projects account for around two thirds of that. The federal and state governments contribute around another third as base funding, enabling institutes to develop solutions now to problems that will become crucial to industry and society in the near future.

The impact of applied research goes far beyond its direct benefits to clients: Fraunhofer institutes enhance businesses' performance, improve social acceptance of advanced technology and educate and train the urgently needed next generation of research scientists and engineers.

Highly motivated employees up on cutting-edge research constitute the most important success factor for us as a research organization. Fraunhofer consequently provides opportunities for independent, creative and goal-driven work and thus for professional and personal development, qualifying individuals for challenging positions at our institutes, at higher education institutions, in industry and in society. Practical training and early contacts with clients open outstanding opportunities for students to find jobs and experience growth in business and industry.

The prestigious nonprofit Fraunhofer-Gesellschaft's namesake is Munich scholar Joseph von Fraunhofer (1787–1826). He enjoyed equal success as a researcher, inventor and entrepreneur.

Figures as of: January 2022

[www.fraunhofer.de](http://www.fraunhofer.de)



Our team needs to grow. We are looking for people who, like us, love photonics. Those eager to challenge the boundaries of their field again and again. If you are one of them, become part of our team at Fraunhofer IOF. Research the challenges of humanity together with great colleagues. Develop optical technologies that make a difference.

The Fraunhofer IOF has already been awarded the German Future Prize three times for groundbreaking, application-ready solutions. The fourth time might be with you!

Visit [www.iof.fraunhofer.de](http://www.iof.fraunhofer.de) for exciting job offers

