

Jahresbericht / Annual Report

---

**2021/22**

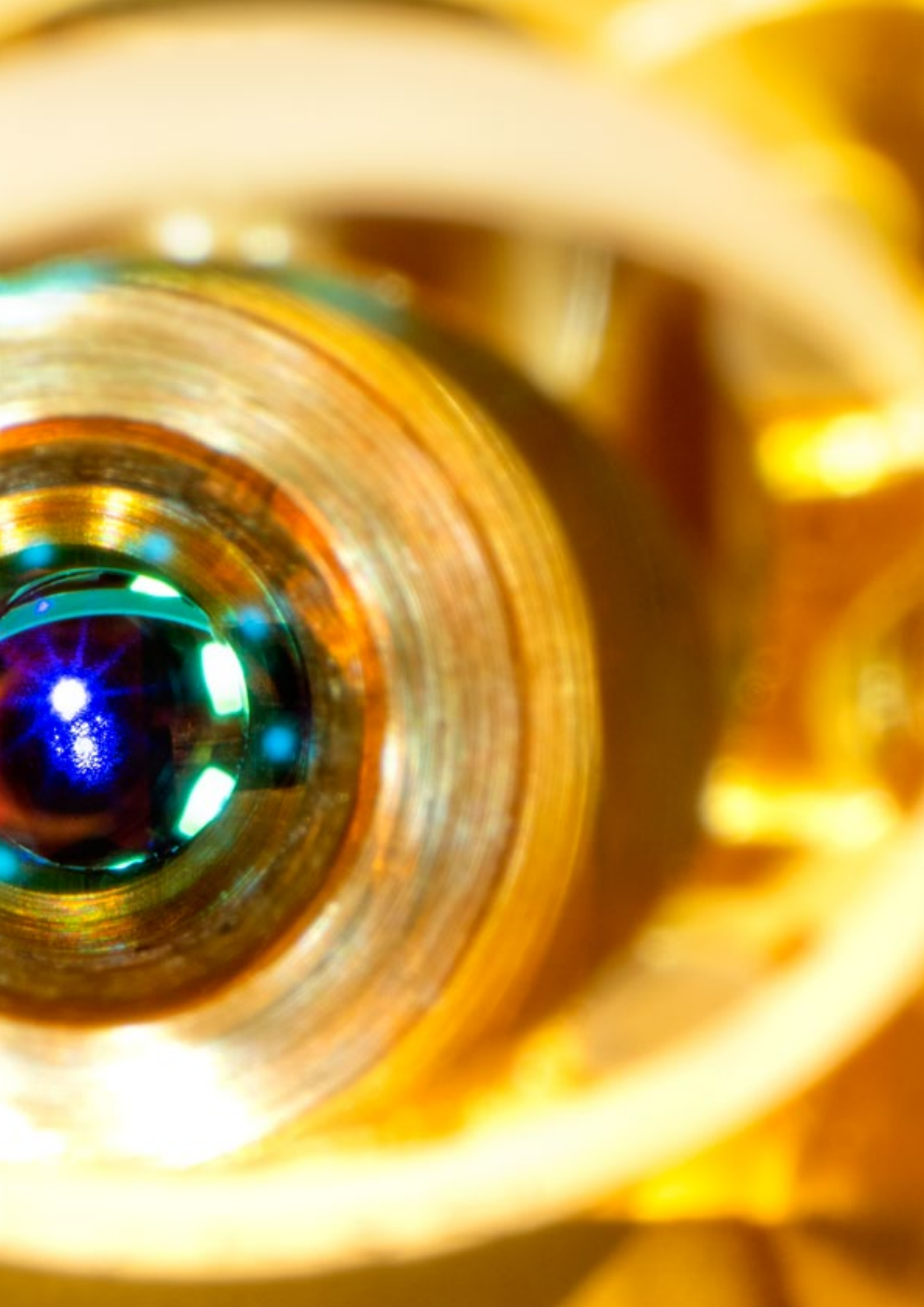
Science in Focus

# Inhalt / Content

---

<b>Grußwort / Foreword</b> .....	<b>4</b>
<b>Quantentechnologien / Quantum technologies</b> .....	<b>8</b>
<b>Ausgewählte Forschungsergebnisse / Selected research results</b> .....	<b>18</b>
Zukunftstechnologien / Emerging Technologies .....	22
Mikro- und nanostrukturierte Optik / Micro- and Nanostructured Optics .....	30
Opto-mechatronische Komponenten und Systeme / Opto-mechatrical Components and Systems .....	36
Präzisionsoptische Komponenten und Systeme / Precision Optical Components and Systems .....	42
Funktionelle Oberflächen und Schichten / Functional Surfaces and Coatings ...	52
Laser- und Fasertechnologie / Laser and Fiber Technology .....	62
Bildgebung und Sensorik / Imaging and Sensing .....	74
Optisches und mechanisches Systemdesign / Optical and Mechanical System Design .....	82
<b>Strategische Projekte / Strategic projects</b> .....	<b>92</b>
Das Institut in Zahlen / The institute in figures .....	96
<b>Anhang / Appendix</b> .....	<b>120</b>





# Grußwort

## Foreword

---



**Wegweisende Zukunftsfragen verbergen sich im Großen, ebenso wie im Kleinen. Sei es der Blick in die endlosen Weiten des Universums oder in die winzige Welt der Quanten: Mit innovativen optischen Technologien haben Forschende des Fraunhofer IOF auch 2021 wieder vielfältige Zukunftsmärkte adressiert. Mit großem Engagement haben sie dabei die weiterhin andauernden Herausforderungen und Einschränkungen der Pandemie auch in diesem Jahr gemeistert und dem Institut erneut zu einem erfolgreichen Jahr verholfen.**

Mit einem Audit startete das Fraunhofer IOF ins neue Jahr. Gemeinsam haben wir über die Forschungsaktivitäten der letzten Jahre reflektiert und in einem Strategieprozess Ziele für die Zukunft definiert. Wir wollen die Erfolgsgeschichte unseres Instituts fortschreiben, um auch in Zukunft weiterhin innovative Lösungen mit Licht für Gesellschaft, Industrie und Wirtschaft zu entwickeln. Die über viele Jahre in Jena aufgebauten und fein aufeinander abgestimmten Technologieketten helfen uns dabei, eine High-End-Infrastruktur in den Bereichen Optik und Photonik anzubieten.

Ein solches Fundament stärkt uns besonders in Krisenzeiten. Das zweite Pandemiejahr war gleichzeitig ein Jahr des Wachstums, in dem wir Grundsteine für die Zukunft legen konnten. Mit der Grundsteinlegung unseres neuen Forschungsgebäudes wird neuer Raum für zukunftsgerichtete Forschung geschaffen.

Insbesondere die Quantentechnologie werden ein Forschungsfeld von zunehmend großem Interesse sein. 2021 erreichten Forschende des Fraunhofer IOF einen wichtigen Meilenstein: Das Projekt QuNET, eine vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Initiative zur Erforschung der hochsicheren Quantenkommunikation, setzte die erste quantengesicherte Videokonferenz zwischen zwei deutschen Bundesbehörden um. Die Gründung des »Quantum Hub Thüringen«, einem neuem Kompetenzzentrum für

**Groundbreaking questions for the future are hidden in the large as well the small. Be it the view into the endless expanses of the universe or into the tiny world of quanta. In 2021, Fraunhofer IOF researchers again addressed a wide range of future markets with innovative optical technologies. With great commitment, they have mastered the continuing challenges and limitations resulting from the pandemic this year as well and helped the institute to another successful year.**

Fraunhofer IOF began the new year with an audit. Together we reflected on the research activities of the past years and defined future goals in a strategy process. We want to continue the success story of our institute in order to continue developing innovative solutions with light for society, industry, and economy in the future. The finely tuned technology chains built over many years in Jena help us to offer a high-end infrastructure in the fields of optics and photonics.

Such a foundation strengthens us especially in times of crisis. The second pandemic year was also a year of growth in which we were able to lay the foundations for the future. The first foundation stone was laid for our new building, which will create new space for future-oriented research.

Quantum technology will be a research field of increasing interest in particular. In 2021, researchers at Fraunhofer IOF reached an important milestone: the QuNET project, an initiative to investigate high-security quantum communication and funded by the German Federal Ministry of Education and Research, implemented the first quantum-secured videoconference between two German federal ministries. The establishment of the "Quantum Hub Thuringia", a new competence center for quantum technologies, will support the networking of Thuringia as a high-tech location in this field. With the co-investment in a new electron beam lithography facility, the Free State of Thuringia is sending another signal to strengthen Thuringia's role in research on quantum technologies.



*QuNET – Quantengesicherte Videokonferenz zwischen zwei Bundesbehörden.  
QuNET - Quantum secured videoconference between two federal agencies.*



*Entwicklungsteam mit »Top Innovation 2021« ausgezeichnet.  
Development team awarded "Top Innovation 2021".*

Quantentechnologien, wird die Vernetzung des Hightech-Standort Thüringens in diesem Feld unterstützen. Mit der Co-Investition in eine neue Elektronenstrahl-Lithographie-Anlage setzt der Freistaat Thüringen ein weiteres Signal, um seine Rolle in der Forschung zu Quantentechnologien zu stärken.

Sehen, was zuvor unsichtbar blieb: 2021 haben Mitarbeitende des Fraunhofer IOF einen Sensor vorgestellt, der sogenannte »unkooperative Oberflächen«, also z. B. stark spiegelnde oder transparente Materialien, problemlos erfassen kann. Von der Zeitschrift »inVISION«, einem Fachmagazin für die Themen Bildverarbeitung, Embedded Vision und Messtechnik, wurde diese neue 3D-Messmethode im thermischen Infrarot als »Top Innovation 2021« ausgezeichnet.

Der Weltraum war dabei auch in diesem Jahr wiederholter Sehnsuchtsort für unsere Forschenden. Mit dem Projekt GALA waren Mitarbeitende unseres Hauses an der Realisierung eines hochleistungsteleskop zur Erforschung des Jupitermondes Ganymed beteiligt. Für ihre Entwicklung metalloptischer Präzisionsinstrumente wurden sie mit dem Lothar-Späß-Award 2021 ausgezeichnet.

Mit besonderem Stolz verfolgten wir außerdem den Start des James-Webb-Weltraumteleskops, dem bisher größten und leistungsstärksten Weltraumteleskop der Menschheit. Mit an Bord: Hochpräzise Spiegel, hergestellt am Fraunhofer IOF. Wir sind stolz darauf, als Forschungsinstitut hierzu einen Beitrag geleistet zu haben!

Für herausragende Leistungen braucht es herausragende Menschen. Auch 2021 ist es uns wieder gelungen, zahlreiche Fachkräfte zu rekrutieren. International wollen wir uns künftig stärker aufstellen und das Institut zu einem attraktiven

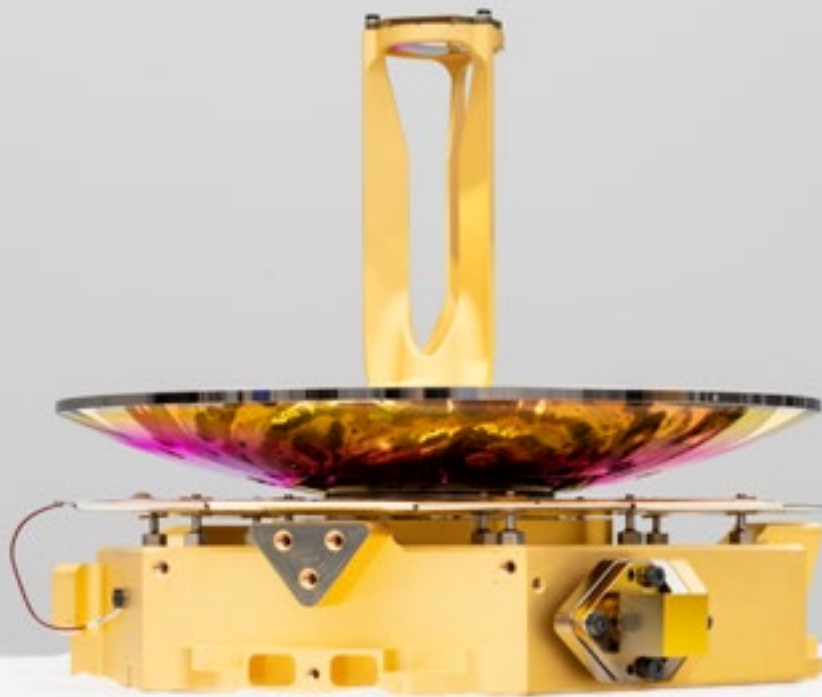
Seeing what previously remained invisible: In 2021, Fraunhofer IOF employees presented a sensor that can easily detect so-called "uncooperative surfaces", e.g., highly reflective or transparent materials. The magazine "inVISION", a specialist journal for the topics of image processing, embedded vision, and metrology, named this new 3D measurement method in thermal infrared as the "Top Innovation 2021".

Space has once again been a place of longing for our researchers. With the GALA project, our employees were involved in the realization of a high-performance telescope for the exploration of Jupiter's moon Ganymede. For their development of metal-optical precision instruments, they received the Lothar Späß Award 2021.

We also followed with particular pride the launch of the James Webb Space Telescope, mankind's largest and most powerful space telescope to date. On board were high-precision mirrors manufactured at Fraunhofer IOF. We are proud to have been able to contribute to this!

Outstanding achievements require outstanding people. In 2021, we again succeeded in recruiting numerous specialists. In the future, we want to position ourselves more strongly internationally and make the institute an internationally attractive employer. With the "Photonics Manager Compact" and the "Photonics Days Jena", we are further expanding our training and networking opportunities.

The success in the transfer path "spin-off" was also continued. With the support of the "Digital Innovation Hub Photonics", a team founded the company "Quantum Optics Jena GmbH" to develop quantum-based solutions for tap-proof communication. In sixth place, the spin-off "SPACEOPTIX"



*Hochleistungsteleskop GALA.  
GALA high performance telescope.*

Arbeitgeber machen. Mit dem »Photonics Manager Compact« und den »Photonics Days Jena« bauen wir außerdem unsere Weiterbildungs- und Vernetzungsangebote weiter aus.

Auch der Erfolg im Transferpfad »Ausgründung« konnte fortgeschrieben werden. Mit Unterstützung des »Digital Innovation Hub Photonics« gründete ein Team die »Quantum Optics Jena GmbH« zur Entwicklung quantenbasierter Lösungen für abhörsichere Kommunikation. Die Ausgründung »SPACEOPTIX« erreichte bei den »Top 50 Start-ups« mit Platz 6 einen Spitzenplatz unter den besten deutschen Start-ups des Jahres 2020. Das Potenzial im Bereich »Ausgründung« wurde mit der Erweiterung des »Digital Innovation Hub Photonics« um benachbarte Einrichtungen und weitere Förderung durch den Freistaat Thüringen sowie der Thüringer Aufbaubank unterstrichen.

Für das Jahr 2022 wünsche ich uns allen wieder mehr persönliche Interaktion. Die Nähe zu unseren Partnern und der Austausch sind für uns der Schlüssel, um anwendungsorientierte Forschung zu betreiben und Technologien vorausschauend weiterzuentwickeln. Ich bedanke mich bei unseren Partneereinrichtungen, kooperierenden Unternehmen sowie Forschungsfördernden und Stiftungen für die Zusammenarbeit. Wir freuen uns darauf, gemeinsam mit Ihnen weiterhin innovative Lösungen mit Licht für die Zukunft zu gestalten.

Mit freundlichen Grüßen

Handwritten signature of Prof. Dr. Andreas Tünnermann in blue ink.

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

reached a top position in the list of the "Top 50 Start-ups" in Germany in 2020. The potential in the transfer path "spin-off" was highlighted with the expansion of the "Digital Innovation Hub Photonics" to include neighboring institutions and further funding from the Free State of Thuringia and the Thüringer Aufbaubank.

For 2022, my wish is that we are able to have more personal interaction again. Proximity to our partners and exchange are key for us to conduct application-oriented research and further develop technologies with foresight. I would like to thank our partner institutions, cooperating companies as well as research sponsors and foundations for their cooperation. We look forward to continuing to shape the future with innovative solutions with light together with you.







Quantentechnologien  
Quantum technologies

---

We shape the future



*Quantenquelle für die  
Quantenkommunikation.  
Quantum source for quantum  
communication.*



Die Quantentechnologien bleiben ein vielversprechendes und dynamisches Feld mit umfangreichen sich bietenden Marktchancen für all jene, die sich hier frühzeitig engagieren. Wichtig ist dabei, spezifische Kompetenzen aufzubauen und die Mehrwerte für sich oder für andere zu identifizieren und nutzbar zu machen. Dabei existieren Synergien insbesondere mit den photonischen Technologien und Prozessketten. Das Fraunhofer IOF nutzt daher weiterhin erfolgreich seine starken Kompetenzen zusammen mit dem exzellenten Know-how, um sowohl Schlüsseltechnologien bereitzustellen als auch originäre Forschungsfragen an der Front der wissenschaftlichen Erkenntnis zu verfolgen. Einerseits werden so präzisionsoptische und weitere Bedarfe in der Forschung und industriellen Vorlauforschung der zweiten Quantenrevolution adressiert. Andererseits werden mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft spannende Grundsatzfragen untersucht, um weitere Anwendungspotenziale zu erschließen.

Die großen Verwertungsaussichten und Mehrwerte für moderne Volkswirtschaften werden bezeugt durch aktuelle Studien, die anhaltenden öffentlichen Förderaktivitäten national (Bund, Länder) und weltweit, sowie das steigende Interesse und die damit einhergehende aktive Einbringung der Industrie in viele Verbundprojekte. Die technologischen Alleinstellungsmerkmale unseres Instituts sowie die wissenschaftlich und handwerklich exzellenten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter haben dazu beigetragen, dass sich das Fraunhofer IOF gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft in mehreren Projekten im nationalen und international kompetitiven Wettbewerb erfolgreich durchgesetzt hat, insbesondere in den Bereichen des Quantencomputings, der Quantensensorik und quantengestützten Bildgebung sowie der Quantenkommunikation.

Dabei agiert das Leistungszentrum Photonik weiterhin nachhaltig in Initiativen der Vernetzung: Das vom Freistaat geförderte »Quantum Hub Thüringen« konnte so beispielsweise zu dem Thema neue Partner aus der lokalen Wirtschaft und Wissenschaft zusammenbringen, angefangen bei Universitäten über Forschungseinrichtungen bis hin zu Unternehmen. Synergien mit dem vom Land Thüringen geförderten Quantenapplikationslabor am Projektzentrum MEOS in Erfurt können hier genutzt werden.

Quantum technologies remain a promising and dynamic field with extensive market opportunities for all those who get involved early on, build specific competencies, and either use the added values themselves or identify and utilize them with and for others. There are synergies in particular with photonic technologies and process chains. Fraunhofer IOF therefore continues to successfully use its broad expertise from across the departments to provide enabling technologies as well as pursue original research at the forefront of scientific knowledge. Precision optics and other needs in research and industrial pre-competitive research of the second quantum revolution are addressed. In addition, exciting fundamental questions are investigated with partners from science and industry in order to open further application potentials.

The great exploitation prospects and added values for modern economies are testified by current studies, the ongoing national and worldwide public funding, as well as the increasing interest and accompanying active involvement of industry in many collaborative. The unique technological features of our institute as well as the excellent scientific and technical staff have contributed to the fact that the Fraunhofer IOF, along with partners from science and industry, has been successful in several projects in national and international competition. This is especially the case in the fields of quantum computing, quantum sensors and quantum-based imaging, as well as quantum communication.

In this context, the Center of Excellence in Photonics continues to act in networking initiatives: The "Quantum Hub Thüringen", funded by the Free State of Thuringia, has for example been able to bring together new partners from local industry and science, ranging from universities and research institutions to companies. Synergies with the quantum application laboratory at the MEOS project center in Erfurt, funded by the state of Thuringia, can be used here.



## 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.

Mit dem ersten Schlüsselexperiment der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) seit 2019 geförderten QuNET-Initiative konnten eindrucksvoll die Perspektive und das Potenzial der Quantenkryptografie für hochsichere Kommunikation im behördlichen Kontext unter Beweis gestellt werden: Exzellente und hochmotivierte Teams von den Fraunhofer-Instituten IOF und HHI sowie der Partner des Max-Planck-Instituts für die Physik des Lichts MPL und dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt DLR-IKN ermöglichten die erste quantensichere Videokonferenz am 10. August 2021 zwischen zwei Einrichtungen des Bundes, dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) und dem BMBF in Bonn. Die ersten Industrieprojekte unter dem Dach von QuNET nahmen 2021 Gestalt an – und weitere folgen. Die Initiative gestaltet den sicheren deutschen Datenraum von Morgen aktiv mit.

Quantum communication focuses on applications and protocols based on the transmission of quantum states. The preparation, manipulation, and measurement of non-classical and thus often fragile quantum states of light are of particular importance in this context.

The first key experiment of the QuNET initiative, funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) since 2019, impressively demonstrated the perspective and potential of quantum cryptography for highly secure communication in a government context. Excellent and highly motivated teams from the Fraunhofer Institutes IOF and HHI, as well as partners of the Max Planck Institute for the Physics of Light MPL and the German Aerospace Center DLR-IKN, enabled the first quantum secure videoconference on August 10, 2021, between two federal institutions, the Federal Office for Information Security (BSI) and the BMBF in Bonn. The first industry projects under the QuNET umbrella began to take shape in 2021, with more to follow. The initiative is actively shaping the secure German data space of tomorrow.



*Schlüsselexperiment der QuNET-Initiative in Bonn.  
Key experiment of the QuNET initiative in Bonn.*

Darüber hinaus konnte das Fraunhofer IOF gemeinsam mit zusätzlichen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft weitere Projekte im nationalen und international kompetitiven Wettbewerb erfolgreich einwerben. Mit der Umsetzung der damit verbundenen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben leistet das Fraunhofer IOF damit 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.

In addition, Fraunhofer IOF, with other partners from science and industry, was able to successfully acquire further projects in national and international competitive bidding. By implementing the associated research and development tasks, Fraunhofer IOF is making decisive contributions to the technological challenges surrounding quantum networks of the future and their applications.

In this context, the open testbed for quantum communication between the 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, are of particular importance. The latter will enable excellent research that is internationally visible as well as contract work to address the highly relevant space segment in quantum communication.



## Quantenimaging Quantum imaging

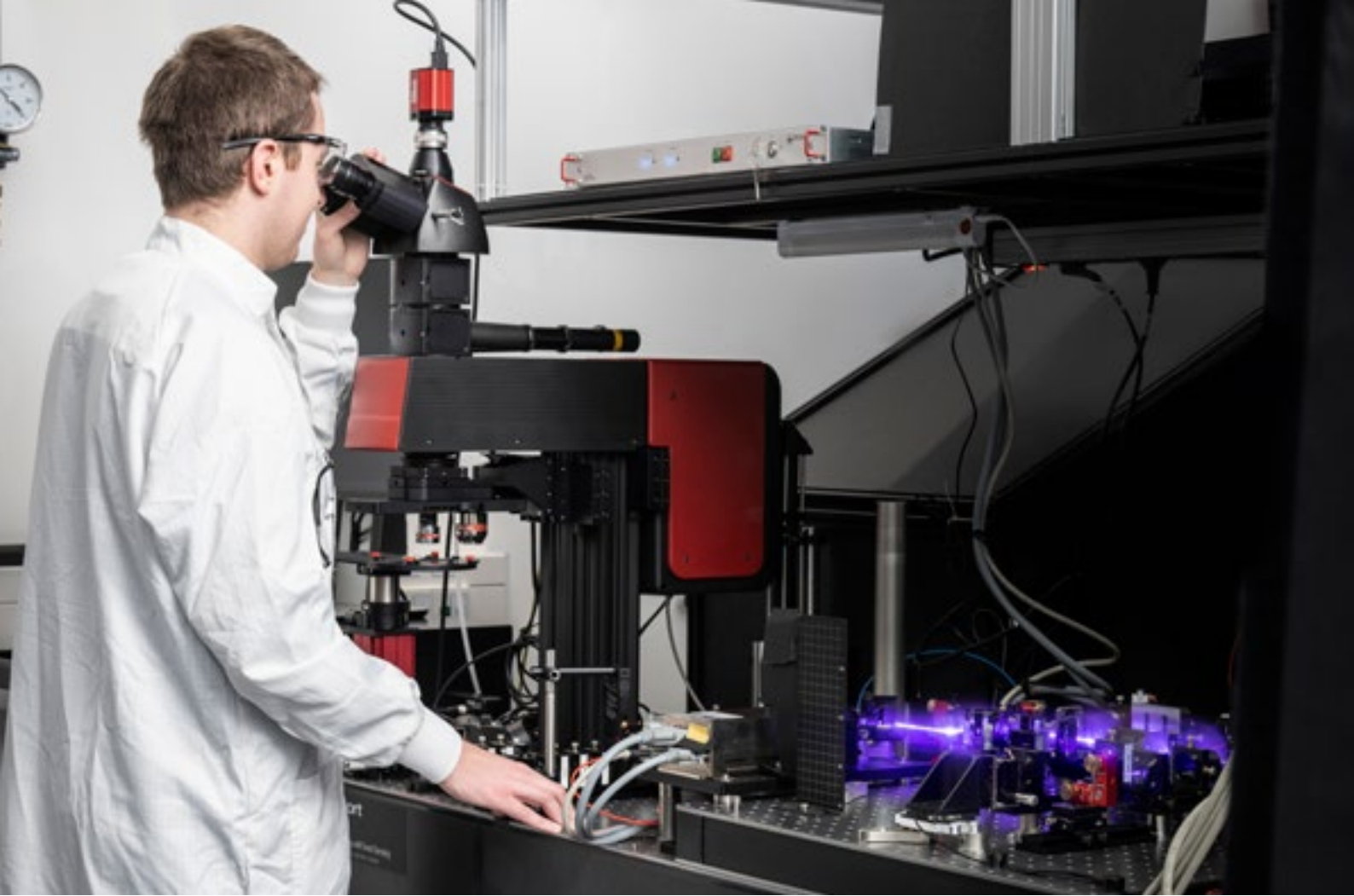
---

Quantenbasierte Bildgebung und Sensorik versprechen neuartige Methoden und damit verbundene anwendungsspezifische Mehrwerte unter Einsatz von nicht-klassischem Licht. Durch geschickte Nutzung von Quantenkorrelationen, verschränkten Photonen und nicht-linearer Interferometer lassen sich unter bestimmten Voraussetzungen und in speziellen Anwendungsszenarien z. B. höhere Auflösungen, höhere Sensitivität, ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis oder spektrale Trennungen von Detektion und Interaktion erreichen. Hochsensible nicht-klassische Phasendetektoren basierend auf gequetschtem Licht zeigen bereits heute in laufenden Gravitationswellenexperimenten das enorme grundlegende Potenzial der Quantentechnologien in diesem Feld.

Insbesondere im low-light Bereich, relevant u. a. in der biologischen Bildgebung, Diagnostik und Analytik, lassen sich so perspektivisch Quantenmehrwerte erzielen, die über die Möglichkeiten von klassischen Verfahren hinausgehen und so gedachte Grenzen sprengen (vgl. das »Heisenberg Limit«). Wenngleich im Vergleich zur Quantenkommunikation in der Quantenbildgebung zum Teil noch ein längerer Weg der Methoden bis zur Marktreife bevorsteht und daher ein langer

Quantum-enhanced imaging and sensing promise novel methods and associated application-specific added values using non-classical light. Clever use of either quantum correlations, entangled photons, and non-linear interferometers means that higher resolution, higher sensitivity, better signal-to-noise behavior, or spectral separation of detection and interaction can be achieved under certain conditions and in specific application scenarios. Highly sensitive non-classical phase detectors based on squeezed light are already demonstrating the great fundamental potential of quantum technologies in this field in ongoing gravitational wave experiments.

Especially in the low-light range, relevant in biological imaging, diagnostics, and analytics, quantum added value can be achieved that exceeds the possibilities of classical methods and thus goes beyond classical optics limit (cf. the "Heisenberg Limit"). Although compared to quantum communication in imaging there is still a longer way to go for some of the methods to be ready for the market, and perseverance is therefore required, new and powerful tools can be expected here as well. Terahertz imaging and infrared spectroscopy with visual light, or imaging with non-detected photons as



*Experiment zur quantenbasierten Bildgebung in der Mikroskopie.  
Experiment on quantum-based imaging in microscopy.*

Atem erforderlich ist, so kann man sich auch hier auf neue und mächtige Werkzeuge einstellen. Terahertz-Bildgebung und Infrarotspektroskopie mit visuellem Licht oder auch Bildgebung mit nicht-detektierten Photonen wie sie vom Fraunhofer IOF und Verbundpartnern im 2021 abgeschlossenen Fraunhofer-Leitprojekt QUILT bis zuletzt entwickelt wurden, sind hier nur die Spitze des Eisberges. Das Fraunhofer IOF treibt im Rahmen von neuen Projekten wie FastGhost (EU) oder LIVE2QMIC (BMBF) innovativ und zukunftsweisend Entwicklungen in diesem Feld weiter voran.

developed by Fraunhofer IOF and collaborative partners in the Fraunhofer Lighthouse project QUILT, which was completed in 2021, are just the tip of the iceberg. Fraunhofer IOF continues to drive innovative and forward-looking developments in this field within the framework of new projects such as FastGhost (EU) or LIVE2QMIC (BMBF).



## Quantencomputer Quantum computer

---

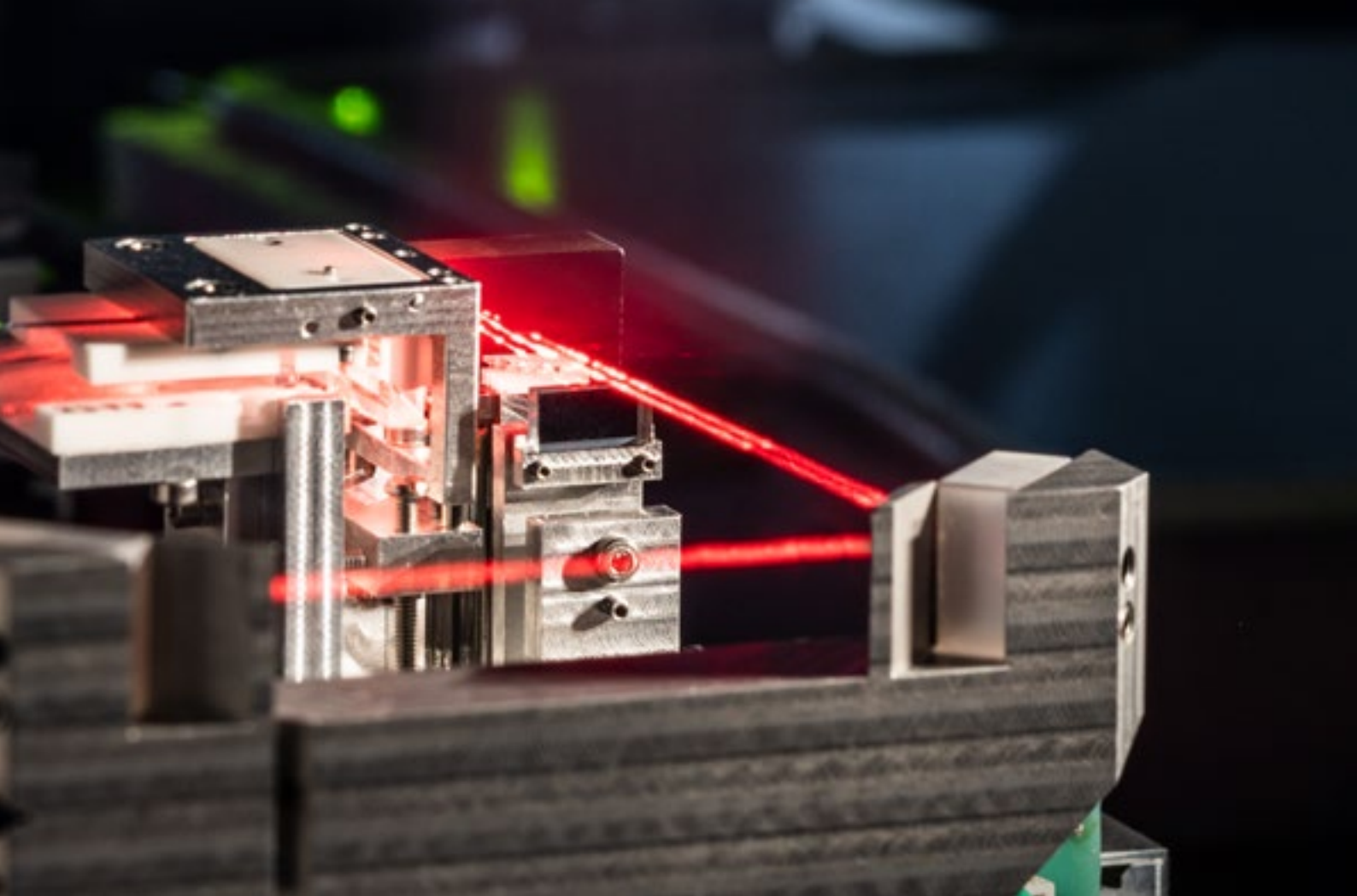
Im Bereich der Quantentechnologien der zweiten Generation wird der Quantencomputer, bzw. Quantencomputer-Module zur Integration in klassischen Computern, typischerweise als die disruptivste Technologie betrachtet. Dabei kommt eine neuartige Rechenarchitektur zum Einsatz, die aufgrund der Quantennatur der eingesetzten Qubits und der involvierten fundamentalen Operationen auf diesen (den Gattern) schnelleres Rechnen erlaubt. Dabei beschränkt sich der Rechenvorteil auf bestimmte aber durchaus ökonomisch höchst relevante Problemklassen: Primfaktorzerlegung (Shor), lineare Gleichungssysteme (HHL), Suche in unsortierten Datenbanken (Grover), Traveling Salesman, Optimierung, Simulation von Quantensystemen und dergleichen mehr.

Aus guten Gründen stellen sich daher viele Unternehmen langfristig auf einen Paradigmenwechsel im Bereich des Hochleistungscomputings ein sowie allen Wertschöpfungs- und Verwertungsmöglichkeiten, die daran geknüpft sind. Im Juni 2021 trat die Allianz QUTAC (Quantum Technology and Application Consortium) zum Vorschein und die Startup-Szene bleibt weiterhin dynamisch entlang der sogenannten Full-Stacks. Diese spiegeln die jeweils vollständigen

In the field of second-generation quantum technologies, quantum computers, or quantum computer modules for integration into classical computers, are typically considered the most disruptive technology. They use a novel computing architecture that allows faster computing thanks to the quantum nature of the qubits used and the fundamental operations involved (the gates). The computational advantage is limited to certain problem classes that are highly relevant from an economic point of view: Prime factorization (Shor), linear systems of equations (HHL), searching in unsorted databases (Grover), traveling salesman, optimization, and simulation of quantum systems, for example.

For good reasons, therefore, many companies are preparing for a long-term paradigm shift in high-performance computing, and the value creation and application opportunities related to it. In June 2021, the QUTAC (Quantum Technology and Application Consortium) alliance emerged and the startup scene continues to be dynamic along the so-called full stacks. These reflect the respective complete technology chains, starting with the different technological varieties of qubits (cold atoms, ions, defect centers, quantum dots,





*Laserbasierte Adressieroptik für die Ionenfalle eines Quantencomputers.  
Laser-based addressing optics for the ion trap of a quantum computer.*

Technologieketten wider: angefangen von den unterschiedlichen technologischen Spielarten der Qubits (kalte Atome, Ionen, Defektzentren, Quantenpunkte, supraleitende Schaltkreise, photonische Clusterzustände, Majorana-Teilchen), über die dazu jeweils spezifischen Gatter-Technologien (Manipulation der Qubits) und Compilern, bis hin zu teilweise Qubit-agnostischer Software, Programmiersprachen und der notwendigen Integration in klassische Computerarchitekturen.

Das Fraunhofer IOF adressiert mit seinem Portfolio von mechatronischen und photonischen Prozessketten maßgeblich solche Full-Stacks, die entweder optische Adressierung erfordern (Qubits, die optisch präpariert, manipuliert und ausgelesen werden müssen) oder photonische Zustände direkt benutzen, um Rechenoperationen durchzuführen (photonische Qubits). Diverse BMBF-geförderte Projekte wie iQuAn (Ionen), FermiQP (Atome), ATIQ (Ionen) und PhoQuant (photonische Qubits) bezeugen die Exzellenz der Arbeiten, die das Institut in die Projekte einbringt.

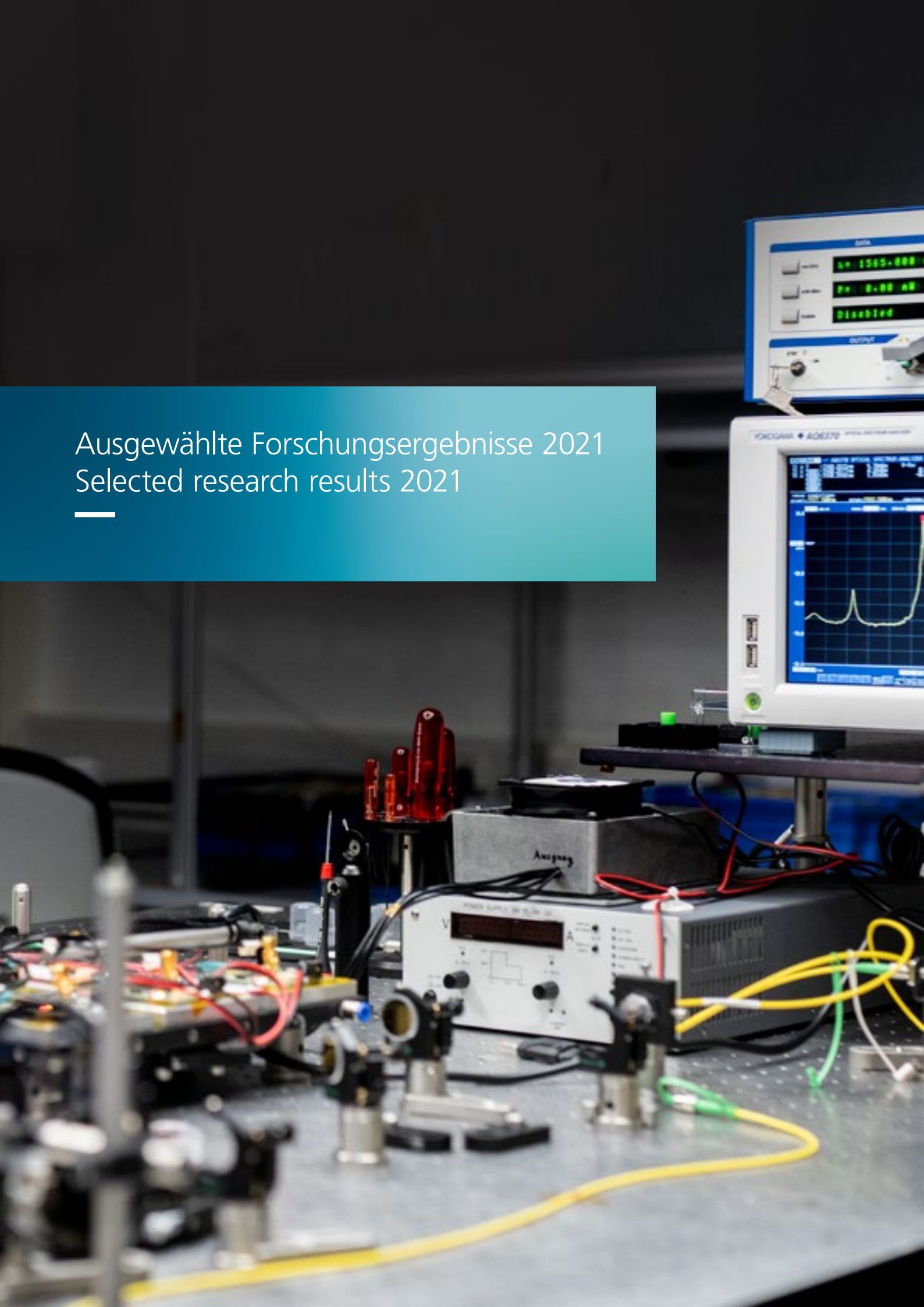
superconducting circuits, photonic cluster states, Majorana particles), via the gate technologies (manipulation of qubits) and compilers specific to each, to partially qubit-agnostic software, programming languages, and the necessary integration into classical computer architectures.

With its portfolio of mechatronic and photonic process chains, Fraunhofer IOF addresses such full stacks that either require optical addressing (qubits that require optically preparation, manipulation, and read out), or directly use photonic states to perform computational operations (photonic qubits). Various BMBF-funded projects such as iQuAn (ions), FermiQP (atoms), ATIQ (ions), and PhoQuant (photonic qubits) attest to the excellence of the institute's work on the projects.



Ausgewählte Forschungsergebnisse 2021  
Selected research results 2021

---



# Wissenschaftliche Fachabteilungen

## Scientific departments



### Emerging Technologies

#### Research focus

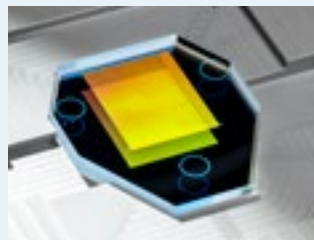
- Quantum communication technologies
- Quantum imaging technologies
- Active and adaptive optical components and systems

#### Head of department

Dr. Ramona Eberhardt

#### Scientific research groups

- **Quantum Communication**  
Dr. Fabian Steinlechner  
Group leader
- **Quantum Imaging**  
Dr. Markus Gräfe  
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. Frank Burmeister

#### Scientific research groups

- **Center for Advanced Micro- and Nano-Optics**  
Dr. Thomas Flügel-Paul  
Group leader
- **Advanced Microoptical Components**  
Dr. Robert Leitel  
Group leader



### Opto-mechanical 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. Stefan Risse  
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. Marcus Trost  
Group leader



## Laser and Fiber Technology

### Research focus

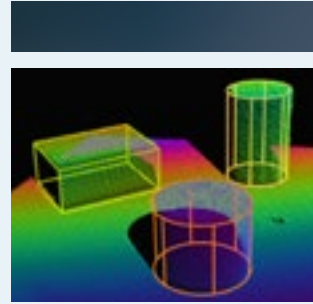
- From glass materials to custom fabrication: special fibers
- Custom laser systems for space, telecommunication, sensing, security, and quantum application
- Application labs with novel laser sources for EUV, MIR, and THz wavelength region

### 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**  
Group leader n.n.
- **3D Sensing**  
Dr. Stefan Heist  
Group leader
- **Facet Vision**



## 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

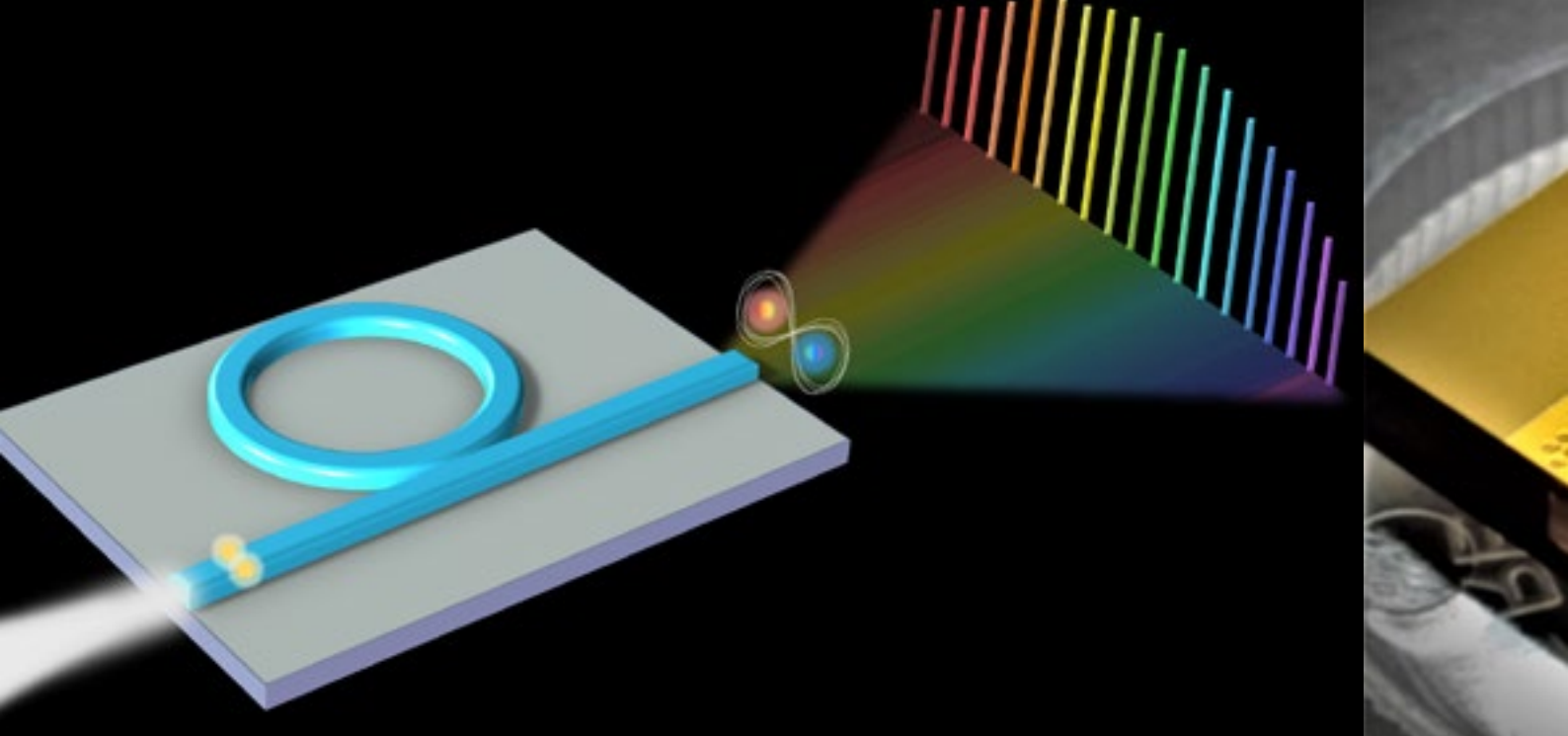
- **Advanced Optical Design**  
Dr. Christian Vetter  
Group leader
- **Micro-Optical Systems**  
Dr. Norbert Danz  
Group leader
- **Opto-Mechanical Design**  
Dr. Thomas Peschel  
Group leader





Zukunftstechnologien  
Emerging Technologies

---



[1] Veranschaulichung eines Mikroring-Resonators zur Erzeugung verschränkter Quantenfrequenzkämme hoher Dimensionalität. / Illustration of a microring resonator for quantum frequency combs generation with massive entanglement dimensionality.

## Hochdimensionale Quantenverschränkung in Raum und Zeit / High-dimensional quantum entanglement in space and time

Verschränkte Photonen sind eine zentrale Ressource für die Realisierung von Quantenmehrwerten in vielen Technologien. Sie dienen als rauscharme Sonden in der Quantensensorik, als vielseitige Informationsträger in Quantennetzen und der Quantenkryptografie. Die Fähigkeit zur Manipulation der räumlichen und spektralen Modenstruktur verschränkter Quantenzustände sowie die Methoden zur Erzeugung und Transmission verschränkter Zustände sind Schlüsseltechnologien für praktische Anwendungen. Ein vielversprechender Ansatz könnte hier die Erhöhung der Dimensionalität der Quantenverschränkung sein.

Die Mehrheit gegenwärtiger Quantenapplikationen bedient sich einer zweidimensionalen Zustandskodierung, z. B. in orthogonalen Polarisationsmoden, womit jedes Photon höchstens ein Quanten-Bit übertragen kann. Photonen haben jedoch weitere Quanteneigenschaften, die ebenfalls zur Informationsübertragung herangezogen werden können. Die Ausweitung der Quanteninformationsverarbeitung auf mehrere solcher Freiheitsgrade und die Realisierung hochdimensional verschränkter (HDE) Zustände birgt immenses Potenzial hinsichtlich Bandbreite und Effizienz der Quanteninformationsverarbeitung.

Unter Zuhilfenahme der einzigartigen Photonik-Kompetenzen des Fraunhofer IOF implementieren wir verschiedene

Entangled photons are a vital resource for quantum-enhancements in many technologies. They act as low-noise probes in quantum imaging and sensing, as versatile information carriers in quantum information processing and quantum networks, or as tamper-proof padlocks in cryptography. The ability to engineer the spatiotemporal mode structure of light as well as methods for generating, manipulating, and processing entangled quantum information are key technologies for practical applications. Thus, a promising approach could be the increment in dimensionality of quantum entanglement.

State-of-the-art quantum information protocols encode information in two-level systems, so-called qubits. In general, polarization or two-level time-bin coding is used, which means that each photon can transmit one qubit at most. However, other properties such as frequency, temporal, or spatial modes can also be used to transmit information. Extending quantum protocols to high-dimensional degrees of freedom thus realizing high-dimensionally entangled (HDE) states has great potential in terms of bandwidth and efficiency of quantum photonics.

Using the unique photonics competences of Fraunhofer IOF, we implement different methods to generate HDE sources from theory to experiment to harness HDE photon pairs in time, frequency, and space.





[2] Räumlicher Modensortierer.  
*Spatial mode sorter.*

#### Authors

Meritxell Cabrejo Ponce  
Carlos A. Sevilla  
Luis J. González  
Robert Leitel  
Fabian Steinlechner

#### Contact

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

Verfahren zur Erzeugung von HDE-Quellen von der Theorie bis zum Experiment zur Bändigung von HDE-Photonenpaaren in Zeit, Frequenz und Raum.

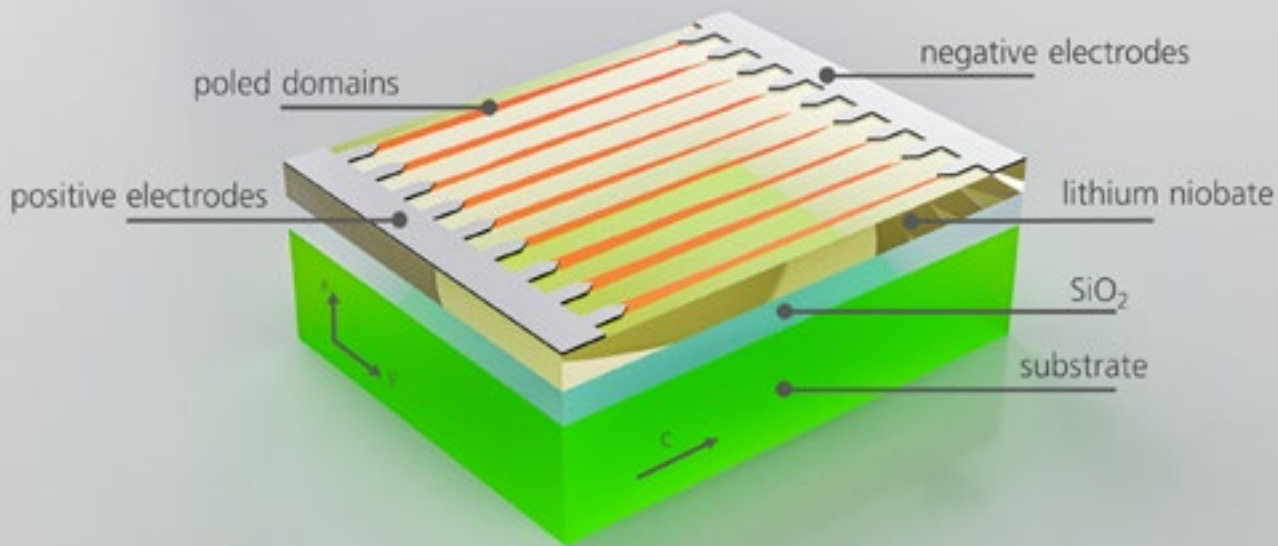
Im Rahmen des Attract-Projekts haben wir Ansätze entwickelt, um die Trägerfrequenz von Photonen zur Kodierung großer Mengen von Quanteninformationen zu nutzen. In Abbildung 1 ist schematisch ein Mikroring-Resonator dargestellt, welcher verschränkte Quantenfrequenzkämmen hoher Dimensionalität erzeugt. Aktuell können wir somit eine Verschränkung in bis zu 100x100 Frequenzmoden realisieren, was einer potenziellen Kapazität von mehr als 6 Qubits pro Photon entspricht. Um diese auch im Bereich der Quantenkommunikation nutzen zu können, haben wir robuste Phasenstabilisierungstechniken für komplexe Interferometer entwickelt, welche die Analyse von zeitlich kodierten Quantenbits ermöglichen.

In den vom BMBF geförderten Quantum Photonics Labs (QPL) haben wir neue Techniken zur Kontrolle und Manipulation der komplexen Wellenfront von Photonen entwickelt. Mit Hilfe der »Multi-Plane Light Conversion« (Abb. 2) haben wir einen kompakten räumlichen Modensortierer für bis zu 7 Hermite-Gauß-Moden realisiert, der maßgeschneiderte Phasenelemente verwendet, die in Zusammenarbeit mit der Abteilung Mikro- und Nanostrukturierte Optik am Fraunhofer IOF entwickelt wurden. Dieser Modensortierer erlaubt es u. a. einzelne Photonen nach ihrem optischen Bahndrehimpuls (OAM) zu sortieren – eine Grundvoraussetzung für die Anwendung komplexer Wellenformen in der Quanteninformationsverarbeitung.

Within the Attract project, we have developed approaches to harness the carrier frequency of photons to encode vast amounts of quantum information. Figure 1 schematically shows a microring resonator that was used to generate quantum frequency combs with massive entanglement dimensionality. We are currently working with photon pairs of 100x100 frequency modes, which corresponds to a possible information capacity of more than 6 qubits per photon. In order to be able to use them also in the field of quantum communication, we have developed phase-stabilization techniques for unbalanced interferometers which enable the analysis of quantum states encoded in discrete time-bin superposition states.

In the BMBF-funded Quantum Photonics Labs (QPL), we are developing new techniques to control and manipulate the complex wavefront of photons. Employing "Multi-Plane Light Conversion" (Fig. 2), we have realized a compact spatial mode sorter for up to seven Hermite-Gauss modes that uses custom phase elements developed in collaboration with the department Micro- and Nanostructured Optics at Fraunhofer IOF. Among other things, this mode sorter allows individual photons to be sorted according to their optical orbital angular momentum (OAM) – a basic requirement for the application of complex waveforms in quantum information processing.

A current project employing entanglement in space is QSource, which aims to develop a bright and stable modular HDE source in orbital angular momentum with scalable dimensionality.



[1] Skizze der Elektrodenkonfiguration für die Polung von LNOI.  
 Sketch of the electrode configuration for poling of LNOI.

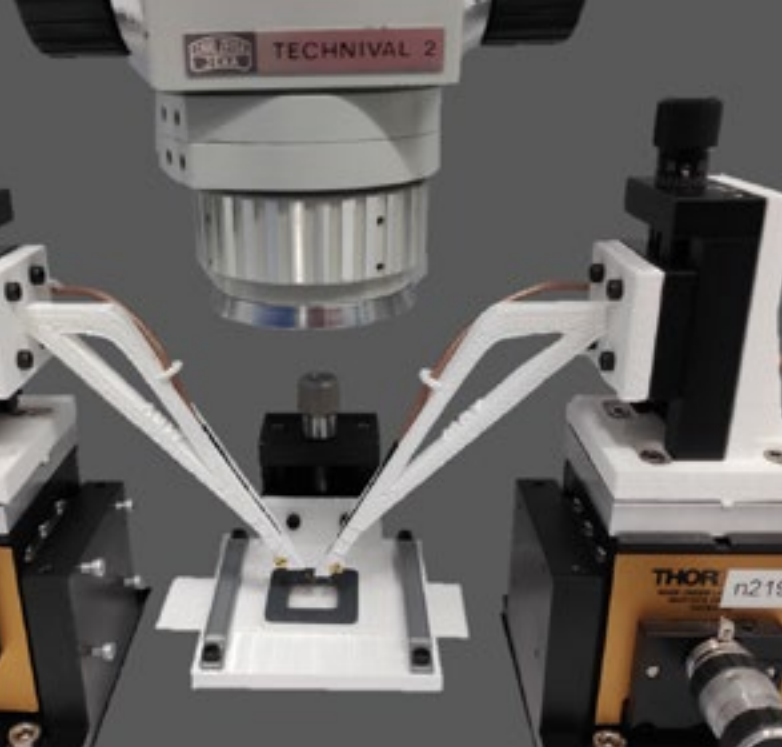
## Periodisches Polen im Mikrometerbereich für integrierte Quantenphotonik / Micrometer-range periodic poling for integrated quantum circuits

Lithiumniobat ist ein hervorragendes Material für viele Anwendungen in der Photonik, da es über einen weiten Spektralbereich transparent ist und eine hohe Nichtlinearität aufweist. Für effiziente nichtlineare Frequenzkonversionsprozesse wie die Photonenpaarerzeugung muss allerdings Phasenanpassung zwischen den beteiligten propagierenden Feldern unterschiedlicher Frequenzen erreicht werden. Eine weitverbreitete Methode dafür ist die Quasiphasenanpassung durch periodische Inversion der Kristallstruktur von Lithiumniobat entlang der Propagationsrichtung. Dieser Inversionsprozess, das Polen von Lithiumniobat, wird durch ein hohes lokales elektrisches Feld ausgelöst, welches zwischen zwei Elektroden innerhalb des Substrats generiert wird und das Wachstum einer invertierten Domäne auslöst. Zur Polung von Dünnschicht-Lithiumniobatsubstraten (LNOI) für die integrierte Quantenphotonik wird das elektrische Feld mittels Oberflächenelektroden entlang der Oberfläche des Substrates erzeugt, wie in Abbildung 1 gezeigt. Dabei müssen die Parameter des elektrischen Signals zum Erreichen möglichst homogener Domänenstrukturen optimiert werden.

Mittels dieser Technik konnten wir gepolte LNOI-Substrate mit hoher Qualität realisieren. Dafür wurden zuerst metallische Elektroden realisiert und das Polungsfeld mittels des in Abbildung 2 gezeigten Aufbaus appliziert. Während des Polungsvorgangs werden dessen Parameter kontinuierlich

Lithium niobate is a favorable material for many applications in photonics due to its wide transparency window and high second-order nonlinearity. For nonlinear-optical processes such as second-harmonic generation (SHG) or photon-pair generation, momentum conservation between the fundamental and second-order photons should be realized. One of the main methods to do this is quasi-phase matching by inversion of the crystal direction periodically along the propagation direction. This inversion process, called poling, is triggered by applying a high-voltage electric field to the substrate through two electrodes, resulting in domain growth from positive to negative electrode. For the thin-film lithium niobate on insulator (LNOI) substrates used in integrated quantum photonics, the electric voltage is applied along the surface of the substrate using specific electrodes as sketched in figure 1. The main challenge in poling is to optimize the electric signal to obtain homogenous domains with defined domain width.

Using this technique, we could realize high-quality periodically poled LNOI substrates. We firstly deposit metallic electrodes on the LNOI surface with a lift-off process and then used the dedicated poling station shown in figure 2 to apply the poling field. Online monitoring of the poling current allows to analyze the poling process during the experiment. After poling, we use polarization contrast microscopy as a fast and



[2] Experimenteller Aufbau für das Polen von LNOI.  
Poling station for poling of LNOI.

#### Authors

Mohammadreza Younesi  
Frank Setzpfandt  
Thomas Pertsch

#### Contact

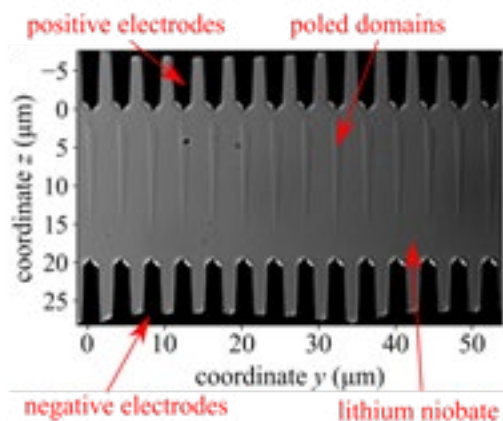
Prof. Dr. Thomas Pertsch  
Phone +49 3641 9-47560  
thomas.pertsch@uni-jena.de

überwacht. Zur schnellen und nichtdestruktiven Kontrolle des Polungsergebnisses nutzen wir Polarisationskontrastmikroskopie, ein Beispiel für eine Domänenstruktur ist in Abbildung 3 dargestellt. Zur systematischen Analyse der Polungsstrukturen haben wir weiterhin eine Software entwickelt, welche die Mikroskopbilder hinsichtlich Breite und Homogenität der Domänen statistisch auswertet. Mit Hilfe dieser Technologien konnten wir optimierte Polungsprozesse für Domänen mit einer Größe bis zu 1  $\mu\text{m}$  entwickeln.

Basierend auf gepolten LNOI-Substraten wurden Wellenleiter mittel Elektronenstrahlolithographie und Trockenätzverfahren hergestellt. Die entwickelten Polungsprozesse sind dabei ein wichtiger Baustein für die Realisierung von Frequenzkonversionsprozessen mit einstellbaren spektralen Eigenschaften in LNOI-Wellenleitern, welche eine bisher vorhandene Lücke in der Technologiekette schließen.

non-destructive imaging method to investigate the poling quality, where an example image is shown in figure 3. To analyze the microscope images systematically, we developed a software which quantifies statistically the homogeneity and width of the domains. Using these instruments, we developed and optimized poling processes that enable repeatable poling of domains with widths down to 1  $\mu\text{m}$ .

The poled LNOI substrates were subsequently used to fabricate waveguides by electron-beam lithography and dry etching. The developed poling processes enable high-efficiency nonlinear frequency conversion with variable spectral properties in LNOI waveguides, in particular for photon-pair generation by spontaneous parametric down conversion. Thus, they are closing an important gap in our technological capabilities.



[3] Mikroskopbild eines periodisch gepolten LNOI-Substrats mit einer Periode von 4  $\mu\text{m}$ . | Microscope image of poled LNOI substrate with poling period of 4  $\mu\text{m}$ .



[1] Experimenteller Aufbau für Holografie mit undetektiertem Licht.  
Experimental setup for holography with undetected light.

## Quanten-Holografie / Quantum holography

Holografische Messtechniken kommen in der optischen Sensorik und Mikroskopie zum Einsatz. In der Biologie finden Sie bspw. zum phasen-sensitiven Erfassen in Streu- und Absorptionsprozessen Anwendung. Allerdings erreichen diese Verfahren ihre detektorbedingten Grenzen in der Messung von nicht-sichtbaren Licht niedriger Intensität, ein attraktiver Bereich für besonders schonenden Umgang mit den Proben.

Bei der Quantenbildgebung können wir verschiedene Wellenlängen verwenden: eine für die Beleuchtung des Objekts und die andere für die Detektion. Damit kann Licht zur Kamera geführt werden, für welches diese besonders sensitiv ist und gleichzeitig die Probe mit einer anderen Wellenlänge, z. B. IR oder UV-Strahlung, vermessen werden.

Aufbauend auf dieser Basis haben wir das neue Verfahren der Quanten-Holografie /1/ entwickelt, welches die Vorteile der klassischen Holografie mit denen der Quantenbildgebung vereint. Wir haben im Labor das Verfahren der Quantenbildgebung mit undetektierten Photonen /2/ eingesetzt, um mit der digitalen Holografie /3/ ein Objekt zu vermessen, ohne die Beleuchtungswellenlänge zu detektieren (Abb. 1). Auf diese Weise können Phasen und Transmissionseigenschaften bestimmt werden, unabhängig von den spektralen Detektorgrenzen.

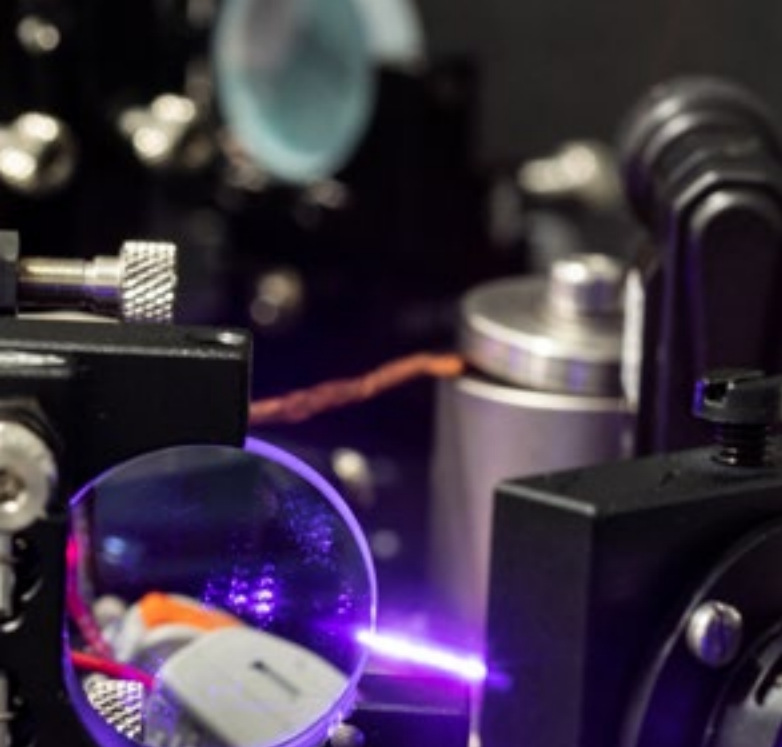
Es ist gelungen, die Phase und Transmission verschiedener Objekte mit Genauigkeiten vom jeweils  $0.1 \pi$  bzw. 6 % zu vermessen (Abb. 2). Die räumliche Auflösung beläuft sich

Holography techniques are already successfully applied in sensing and microscopy, in particular for biological samples, where scattering and absorption processes require a phase-sensitive sensing contrast approach. However, classical holography faces detector limitations when imaging outside the visible range at low light levels in order to minimize photo-toxicity on the sample.

Quantum imaging techniques allow us to use different wavelengths: one to illuminate the object and the other for detection. Therefore, one can detect the wavelength where the detector exhibits its highest performance, while illuminating the sample with IR or UV light, for example.

We therefore combined classical holography with quantum imaging to create the novel approach of quantum holography /1/ that combines the benefits from both techniques. We applied the quantum imaging technique "Imaging with undetected photons" /2/ to perform digital phase shift holography /3/ of an object without the need to detect the light that illuminates it (Fig. 1). This way, we are able to obtain information on the phase and transmission of the sample at wavelengths outside the visible range without the detector technology limitations.

It was possible to obtain phase and transmission values from different objects with an accuracy of  $0.1 \pi$  and 6 %, respectively in 2 s (Fig. 2). The spatial resolution obtained with the current optical configuration is  $86 \mu\text{m}$ . As a proof-of-principle experiment, it shows the validity of the process, thus



### Authors

Marta Gilaberte Basset  
Sebastian Töpfer  
Markus Gräfe

### Contact

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

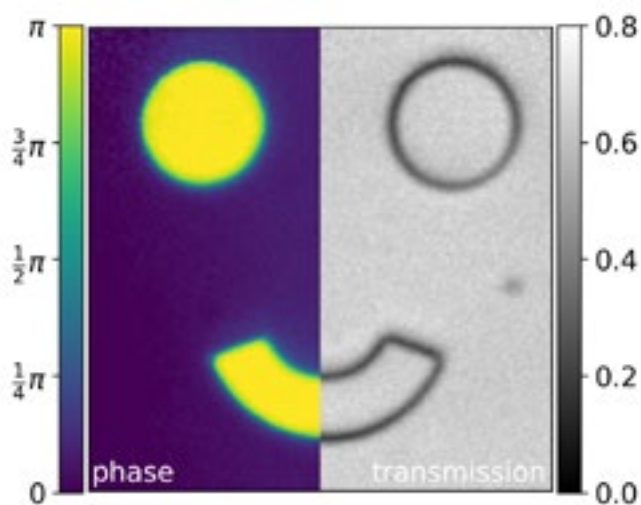
dabei auf  $86\ \mu\text{m}$  und die Messzeit beträgt 2 Sekunden. Als Machbarkeitsanalyse zeigen die Ergebnisse eindrucksvoll, dass das Verfahren funktioniert und motivieren zu weiterer Forschung auf diesem Feld.

In der Zukunft sollen sowohl die Messgenauigkeit als auch die räumliche Auflösung durch Optimierung des optischen Aufbaus verbessert werden. Es sind ebenfalls Untersuchungen im Bereich exotischer Wellenlängen wie dem UV und MID-IR geplant, sowie komplexerer Messverfahren wie z. B. optischer Kohärenztomografie zur 3D-Vermessung, um die Möglichkeiten der Anwendung zu erweitern.

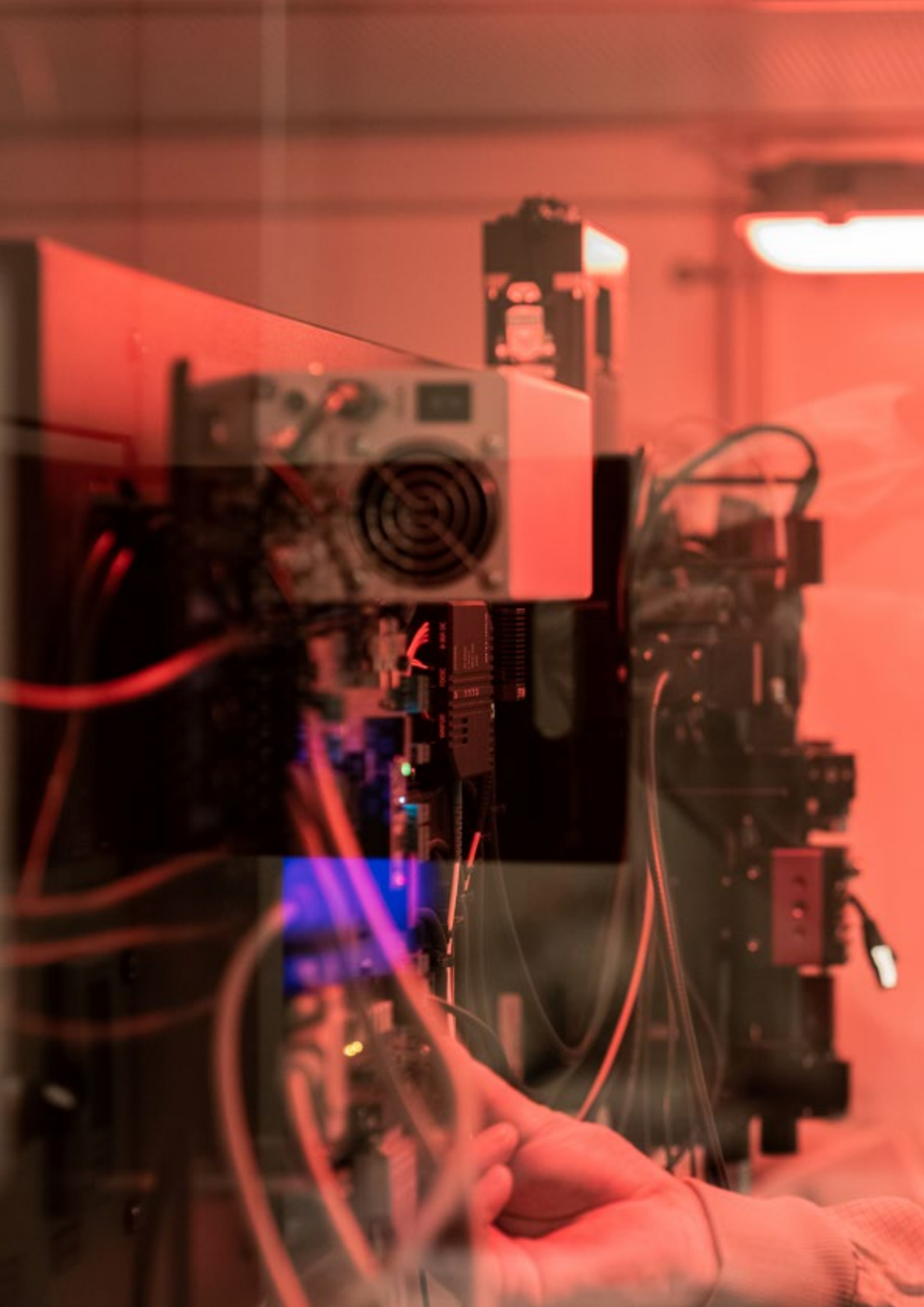
allowing further research in this field. The spatial resolution as well as the measurement accuracy can be further increased by improving the optical setup, which we are currently working on. The next step is to apply quantum holography in the MID-IR or in the UV, while detecting visible light. Finally, we plan to introduce techniques from optical coherence tomography for 3D surface reconstruction to further broaden the field of application.

### References / Literatur

- /1/ S. Töpfer et al., Sci. Adv. 8, eabl4301 (2022).
- /2/ G. Barreto Lemos et al., Nature 512, 409 (2014).
- /3/ I. Yamaguchi and T. Zhang, Opt. Lett. 22, 1268 (1997).



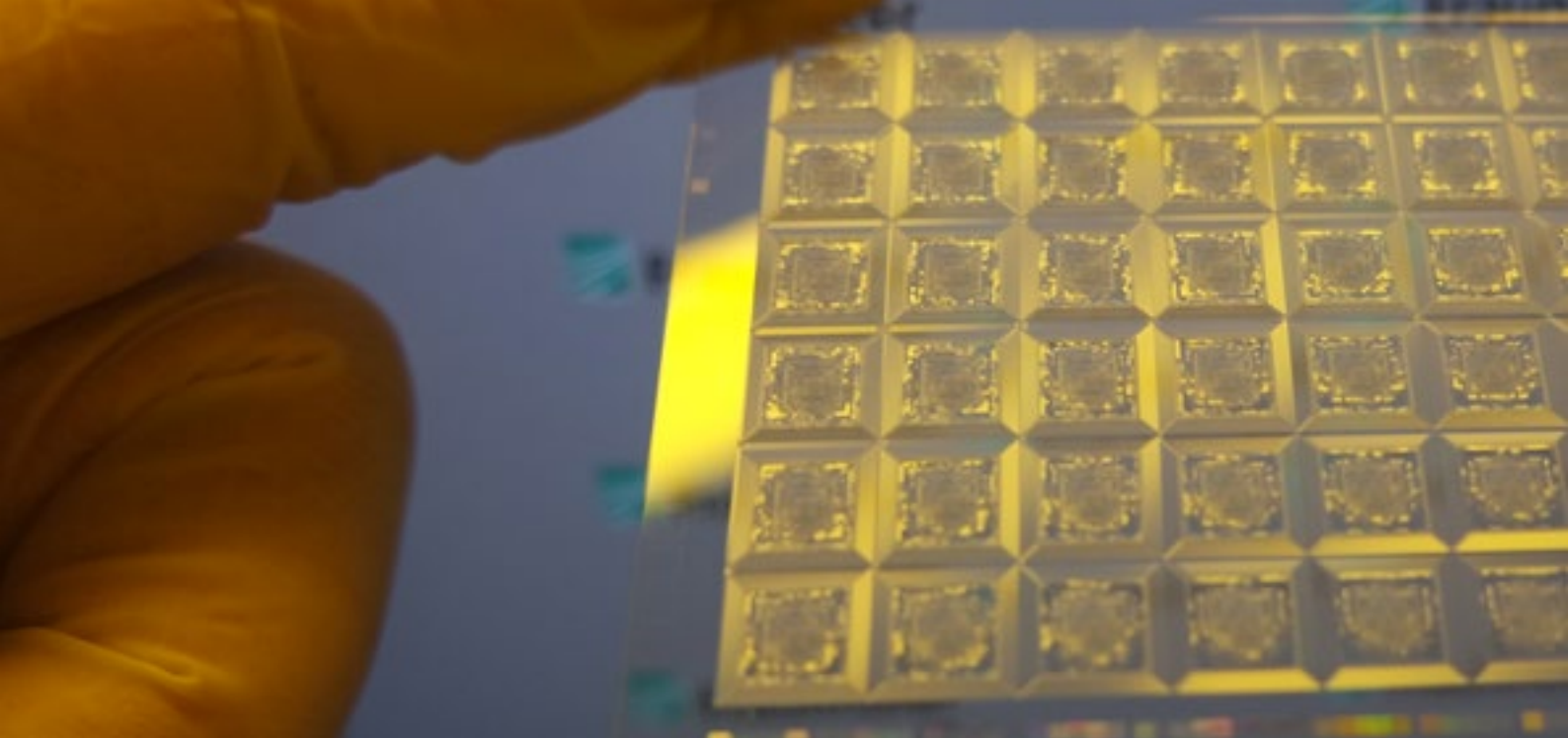
[2] Phasen (links) und Transmission (rechts): Ergebnisse von einem transparenten Objekt. / Phase (left side) and transmission (right side) images from a transparent object.





Mikro- und nanostrukturierte Optik  
Micro- and Nanostructured Optics

---



[1] Doppelseitige Strahlformungselemente basierend auf Tailored-Light-Diffusoren zur Homogenisierung einer Display-Direkthinterleuchtung (8 x 6 Kanäle).

Double-sided beam shaping elements based on Tailored-Light Diffusers for the homogenization of a direct-lit display illumination (LED grit arrangement 8 x 6 channels).

## Maßgeschneiderte Diffusoren für effiziente Beleuchtungsoptiken / Tailored-light diffusers for efficient illumination

Der Bedarf an kompakten und hocheffizienten Strahlformungsoptiken wächst kontinuierlich seit der Einführung von LEDs und Halbleiter-Lasern in kommerziellen Beleuchtungsaufgaben, bspw. Raum- und Fahrzeugbeleuchtung, Bildschirme, Unterstützung optischer Sensoren.

Maßgeschneiderte Diffusoren sind in der Lage, die Abstrahlungscharakteristik einer Lichtquelle oder eines Quell-Arrays zu homogenisieren und gleichzeitig in gewünschte Winkelverteilungen abzulenken. Die Erzeugung einer maßgeschneiderten Beleuchtung ausgehend von einer definierten Quellverteilung wird über deterministische Mikrostrukturen erreicht. Im Gegensatz zu stochastisch-verteilten Streuzentren ermöglicht die gezielte Auswahl an Strukturgrößen und Oberflächenprofilformen eine hocheffiziente Strahlformung mit geringen Streuverlusten in ungewünschte Bereiche. Zudem wird ein achromatisches Verhalten über einen ausgedehnten Spektralbereich erzielt, z. B. des kompletten sichtbaren Bereichs.

Mit Hilfe der direkt-schreibenden Grauton-Fotolithographie werden hochpräzise Mikrostrukturen mit orts aufgelösten veränderlichen Abstrahl- und Ablenkverteilungen erzeugt. Diese dienen anschließend direkt als Urform für Replikationsverfahren, wie UV-Abformung, Heißprägen oder Spritzprägen. Das Ergebnis sind hochintegrierte mikrooptische Elemente, die mehrere optische Funktionen vereinen (Homogenisierung,

The demand for compact and highly efficient optical beam shaping has been continuously growing since the advent of solid-state light sources in commercial illumination tasks, e.g., ambient and automotive lighting, displays, and sensor assistance.

Tailored-light diffusers enable the homogenization of emission characteristics of a light-source or a source array and deflection of light into a desired angular region at the same time. The formation of a tailored illumination from a defined light distribution is achieved using deterministic surficial microstructures. In contrast to stochastically distributed scattering domains, the specific variety of topological feature sizes and profile shapes lead to highly efficient homogenization and beam shaping with low losses from scattering into undesired regions. Moreover, this approach yields an achromatic behavior for an extended spectral range, for example the entire VIS range.

Suitable microstructures with spatially variable diffusion and deflection characteristics are generated by direct-writing grayscale photolithography. They are the masters for replication techniques such as UV-molding, injection molding, or hot embossing. Finally, highly integrated micro-optical elements are available that combine multiple optical functions (homogenization, deflection, specific far field distribution) and enable reduction in material, volume, and cost, respectively.





### Authors

Robert Leitel  
Philipp Schleicher  
Georg Widholz

### Contact

Dr. Robert Leitel  
Phone: +49 3641 807-375  
robert.leitel@iof.fraunhofer.de

Strahlableitung, spez. Fernfeldverteilung) und so den Anwendenden Material-, Volumen- und Kosteneinsparung ermöglichen.

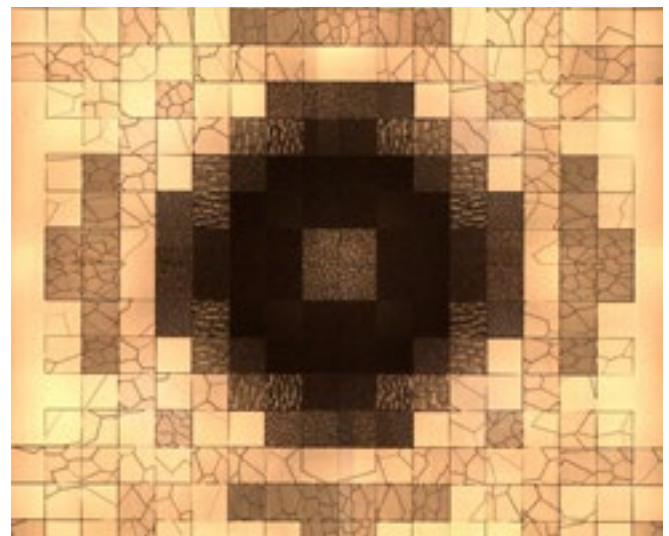
Das am Fraunhofer IOF entwickelte Designverfahren nutzt wellenoptische Methoden und berücksichtigt sowohl die Brechung als auch die Beugung der einfallenden Lichtverteilung an der Mikrostruktur, sowie die Fähigkeiten der Herstellungsmethode /1/. Im Rahmen des Verbundprojekts IBELIVE (FKZ 13N14613, Photonik nach Maß) wurde diese Methode einem ganzheitlichen optischen Systemdesign durch die Entwicklung einer Schnittstelle zur Raytracing-Software Zemax® zugänglich gemacht. Gemeinsam wurden mit den Partnern OSRAM OS GmbH und Continental Automotive GmbH maßgeschneiderte anspruchsvolle Diffusorelemente realisiert, die Anwendungen in selektiver Display-Direkthinterleuchtung, adaptivem Blitzlicht sowie als Zwischenbildebene in kompakten augmented-reality Head-up-Displays finden. Mit dem Partner TEMICON GmbH wurden Prozesse entwickelt um die realisierten Mikrostrukturen über kostengünstige Replikationsverfahren, wie Spritzprägen, der Massenproduktion zugänglich zu machen.

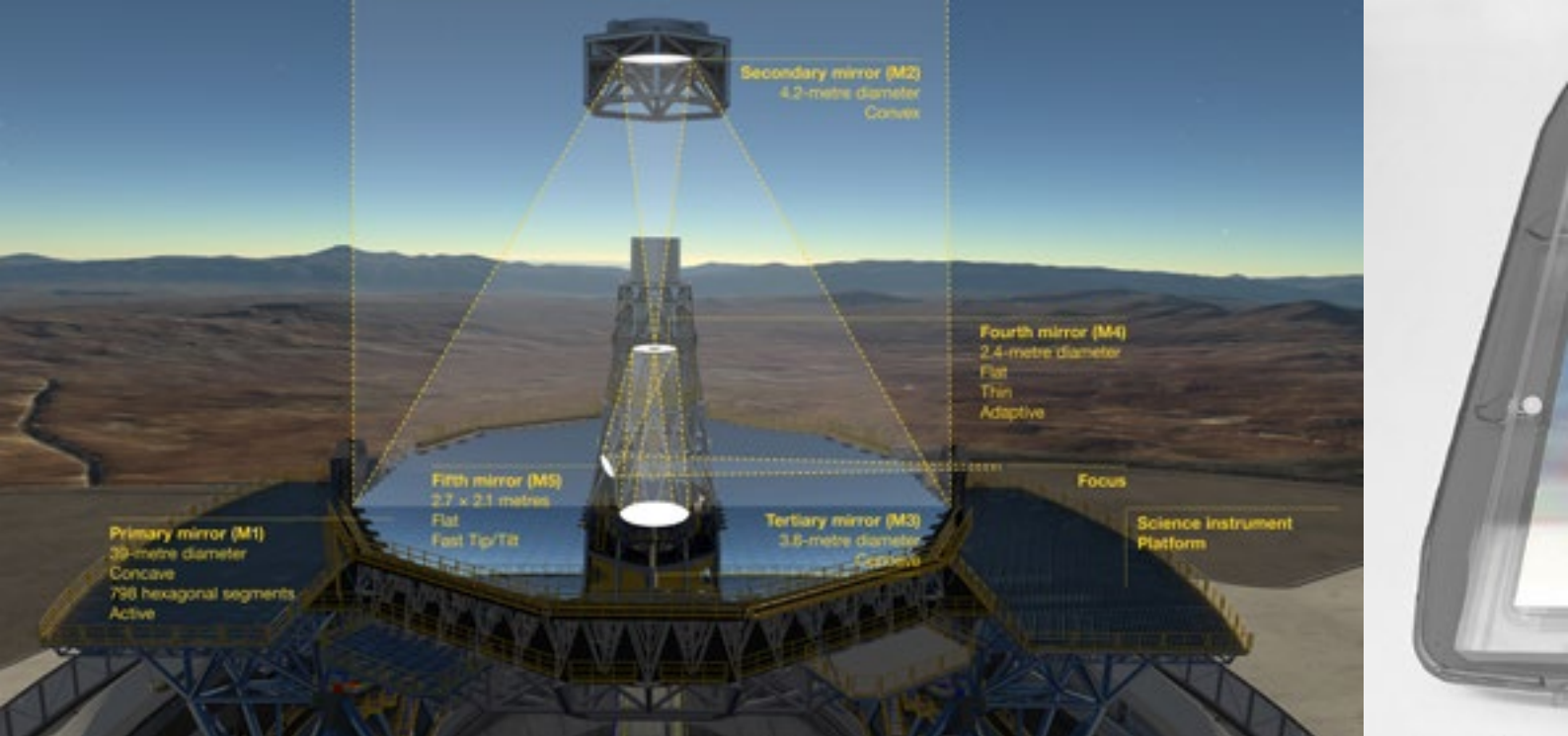
### Literatur / References

/1/ H.-C. Eckstein, U. Zeitner, Patent DE 102013003441 (2013).

[2] Mikroskop-Bild in Durchlichtkonfiguration zeigt die mikrostrukturierte Oberfläche eines segmentierten maßgeschneiderten Diffusor zur Umverteilung des Lichts einer OSRAM LED der Display-Hinterleuchtung. / Microscope image in transmitting configuration shows the micropatterned surface of a segmented tailored-light diffuser to redirect light of an OSRAM LED of display backlight.

At Fraunhofer IOF a specific design algorithm has been developed using wave-optical methods and the capabilities of the microstructure generation /1/. Within the scope of the joint research project IBELIVE (FKZ 13N14613, Photonik nach Maß), this method gained access to a wholistic optical system design introducing an interface to raytracing software Zemax®. In collaboration with partners OSRAM OS GmbH and Continental Automotive GmbH, customized deterministic diffusers have been developed for ambitious applications such as selective direct-lit display illumination, adaptive flashlight, and intermediate image planes for augmented reality head-up displays. Together with Temicon GmbH, a process chain has been established for manufacturing and cost-efficient replication using injection compression molding to bring tailored-light diffusers to mass market.





[1] Das optische System des ELT (Credit: ESO). Das am Fraunhofer IOF gefertigte CGH war Teil der Vermessung des 4,2 m großen Sekundärspiegels. / The optical system of the ELT (Credit: ESO). The CGH made at Fraunhofer IOF was part of testing of the 4.2 m secondary mirror.

## Hochpräzisions-CGH für ESOs ELT M2 Spiegel High-precision CGH for ESO's ELT M2 Mirror

Das European Southern Observatory (ESO) arbeitet aktuell an der Realisierung des weltweit größten Teleskops für den sichtbaren und infraroten Spektralbereich, dem Extremely Large Telescope (ELT), mit einem Primärspiegel von 39 Meter Durchmesser (Abb. 1), das planmäßig 2027 den Betrieb aufnehmen wird. Der asphärische Sekundärspiegel M2 ist der größte konvexe Spiegel, der jemals gefertigt wurde. Seine hochpräzise Fertigung und dafür notwendige Oberflächenprüfung ist eine der größten Herausforderungen bei der Herstellung der ELT-Optiken. Für die Messung der Formfehler und Bestimmung der Korrekturdaten für die finalen Polierschritte dieses 4,2 m großen Spiegels wurde eigens ein anspruchsvolles interferometrisches Testkonzept entwickelt, in dem eine hochpräzise Referenzplatte zum Einsatz kommt.

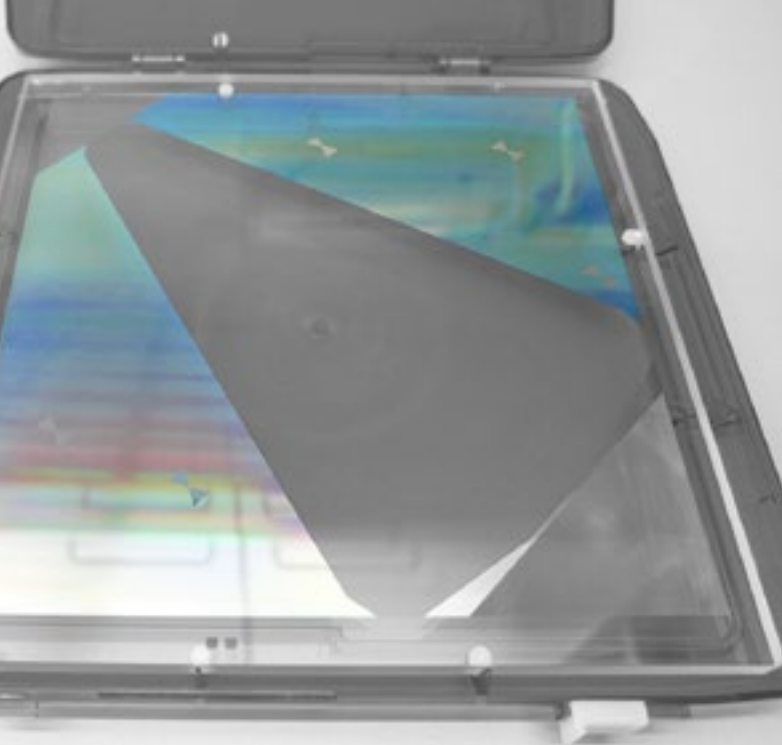
Für die Prüfung dieser Referenzplatte wurde das Fraunhofer IOF von Safran Reosc mit der lithographischen Herstellung eines speziell angepassten computer-generiertem Hologramms (CGH) beauftragt. Abbildung 2 zeigt ein Foto des gefertigten CGHs. Es wurde mittels Elektronenstrahlolithographie in ein 9-Zoll Quarzglassubstrat (230 mm x 230 mm x 9 mm) strukturiert und besitzt neben der zentralen Prüfstruktur mehrere Justagestrukturen, die eine sehr präzise Ausrichtung von CGH und Spiegel im Interferometeraufbau erlauben.

Der erlaubte Wellenfrontfehler der CGH-Messung aufgrund von Herstellungsfehlern beträgt lediglich 7,2 nm (RMS). Dies erfordert die lithographische Fertigung auf einem speziell

The European Southern Observatory (ESO) is currently working on the realization of the world's largest telescope for the visible and infrared spectral range: the Extremely Large Telescope (ELT). It has a primary mirror of 39 m in diameter (Fig. 1) and is scheduled to start operation in 2027. The M2 aspherical secondary mirror is the largest convex mirror ever produced, and its high-precision fabrication and surface testing is one of the greatest challenges in the manufacturing of the ELT optics. To measure the shape defects and determine the correction data for the final polishing steps of this 4.2 m mirror, a sophisticated interferometric test concept was specially developed using a high-precision reference plate.

For the testing of this reference plate, Fraunhofer IOF was contracted by Safran Reosc with the lithographic production of a specially adapted computer-generated hologram (CGH). Figure 2 shows a photo of the fabricated CGH. It was patterned by electron beam lithography into a 9-inch fused silica substrate (230 mm x 230 mm x 9 mm) and has, in addition to the central test structure, several alignment structures that allow very precise alignment of the CGH and mirror in the interferometer setup.

The specified wavefront error of the CGH measurement due to manufacturing errors is only 7.2 nm (RMS). This requires lithographic fabrication on a specially corrected substrate. Using ion beam finishing (IBF), a technology well established at Fraunhofer IOF, it was possible to correct the used



[2] Finales CGH mit einem herstellungsbedingten Wellenfrontfehler von lediglich 5.34 nm (RMS). / Final CGH with a manufacturing-related wavefront error of only 5.34 nm (RMS).

#### Authors

Frank Burmeister  
Antonia Klein  
Tino Benkenstein  
Sascha Ehrhardt  
Philipp Schleicher

#### Contact

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

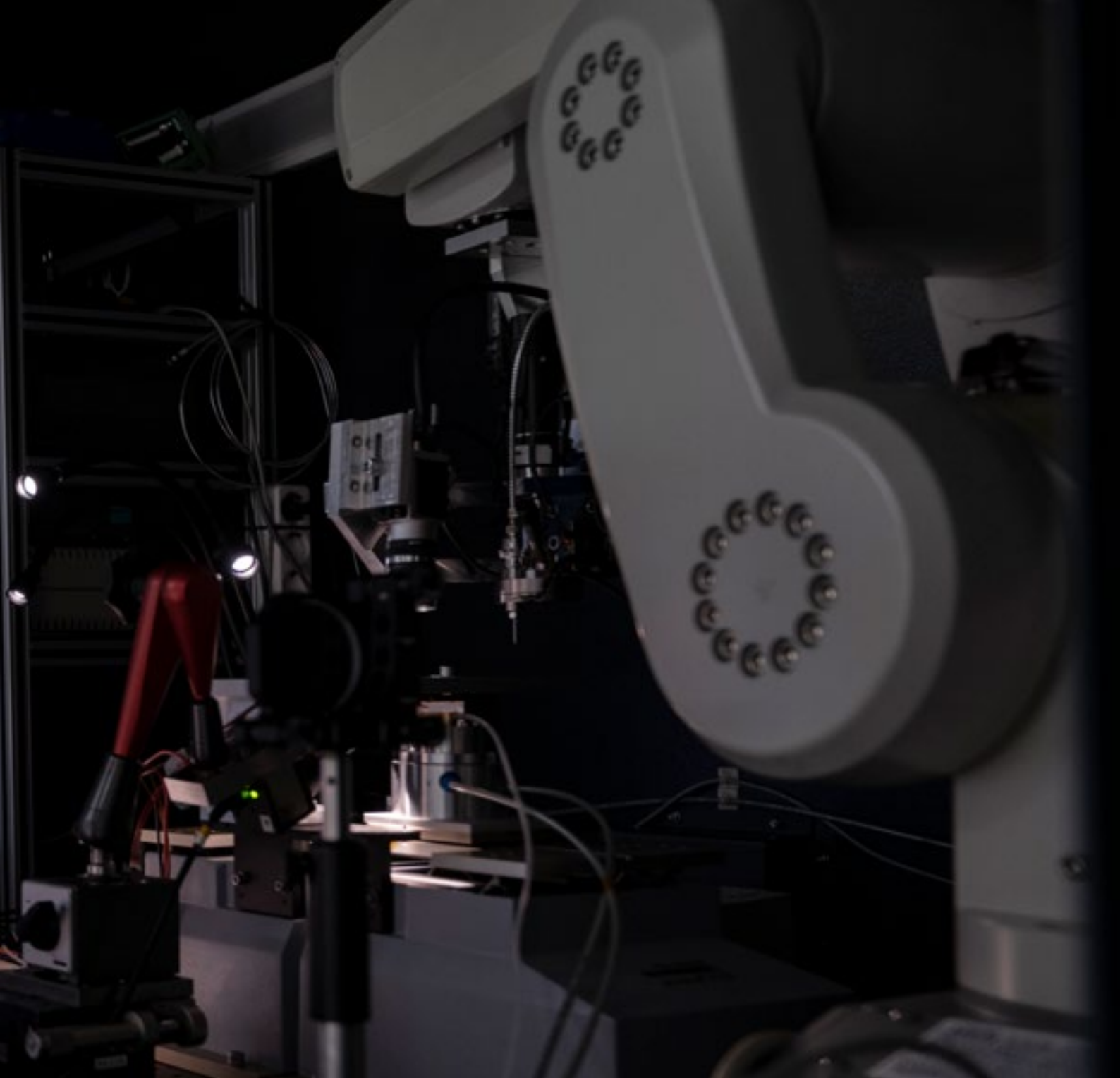
korrigierten Substrat. Durch die am Fraunhofer IOF etablierte Technologie der Ionenstrahl-Bearbeitung (IBF) konnte das verwendete Substrat auf einen transmittierten Wellenfrontfehler von lediglich 1,5 nm (RMS) korrigiert werden. Um die geforderte Präzision des finalen CGHs erreichen zu können, wurden zudem alle Fehlerquellen entlang der kompletten lithographischen Prozesskette charakterisiert und hinsichtlich des Einflusses auf die spätere CGH-Messung der Referenzplatte modelliert.

Durch die Kombination aus hochpräziser Fertigung sowie Modellierung und Kompensation verbleibender Herstellungsfehler betrug das finale Fehlerbudget des CGHs lediglich 5,34 nm (RMS). Mit dem gefertigten CGH konnte das Fraunhofer IOF einen wertvollen Beitrag zur Fertigung der anspruchsvollen Optiken des weltweit größten Spiegelteleskopes leisten.

substrate to a transmitted wavefront error of only 1.5 nm (RMS). In order to be able to achieve the required precision of the final CGH, all error sources along the complete lithographic process chain were also characterized and modelled with regard to their influence on the subsequent CGH measurement of the reference plate.

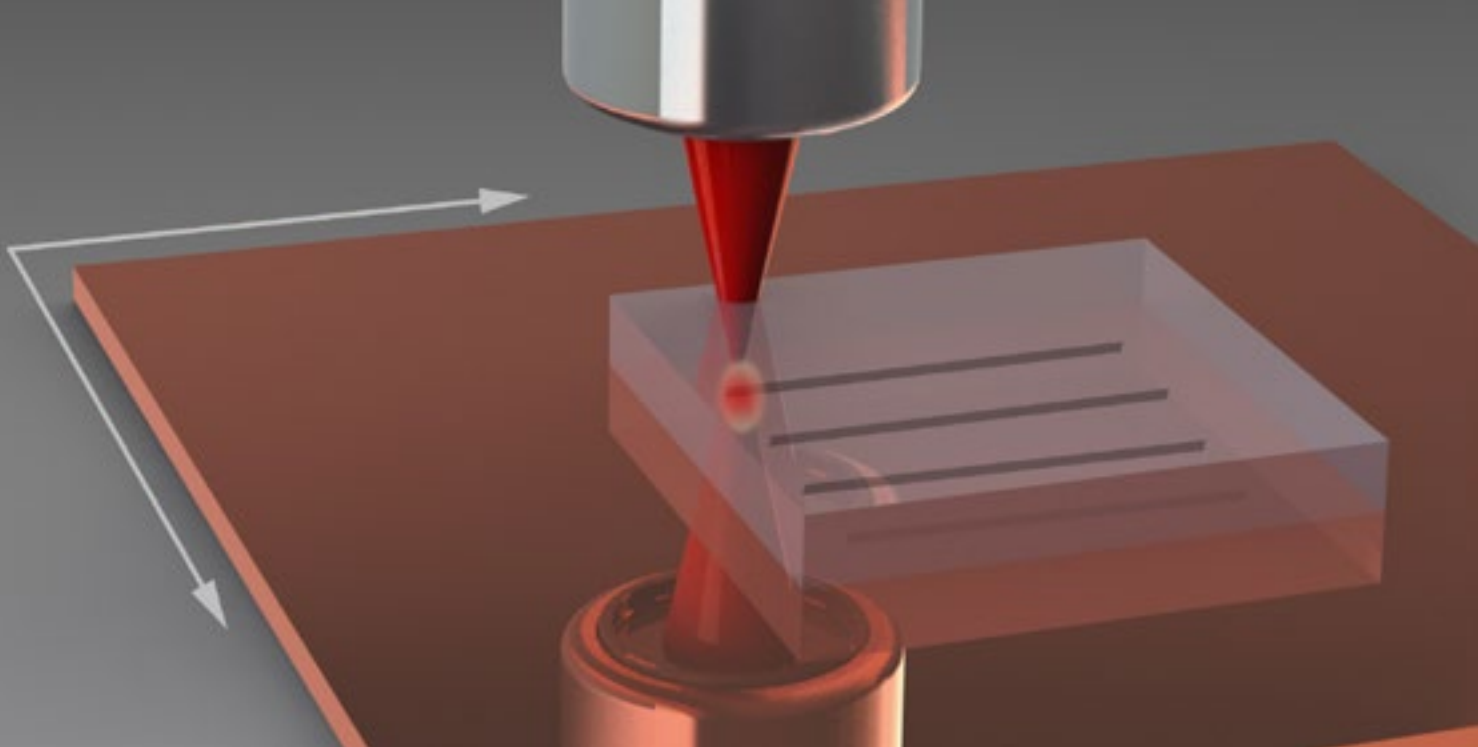
Through the combination of high-precision manufacturing as well as modelling and compensation of remaining manufacturing errors, the final error budget of the CGH was only 5.34 nm (RMS). With the manufactured CGH, Fraunhofer IOF was able to make a valuable contribution to the production of the demanding optics of the world's largest reflecting telescope.





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

---



[1] Veranschaulichung des Laserschweißprozesses. / Illustration of the laser welding process.

## UKP-Laserschweißen von Glas-Metall und Silizium-Metall / USP laser welding of glass-metal and silicon-metal

Das dauerhafte Verbinden ungleicher Materialien ist ein wesentlicher Arbeitsschritt für die Fertigung unzähliger Produkte. Hierzu stehen verschiedene Verfahren wie Klemmen, Kleben, Löten oder Verschweißen zur Verfügung. Oftmals möchte man allerdings auf den Einsatz zusätzlicher Hilfsstoffe verzichten, z. B. wenn die Verbindungen extremen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. In diesem Fall müssen chemische Folgereaktionen, Alterungsprozesse oder z. B. Ausgasungen vermieden werden.

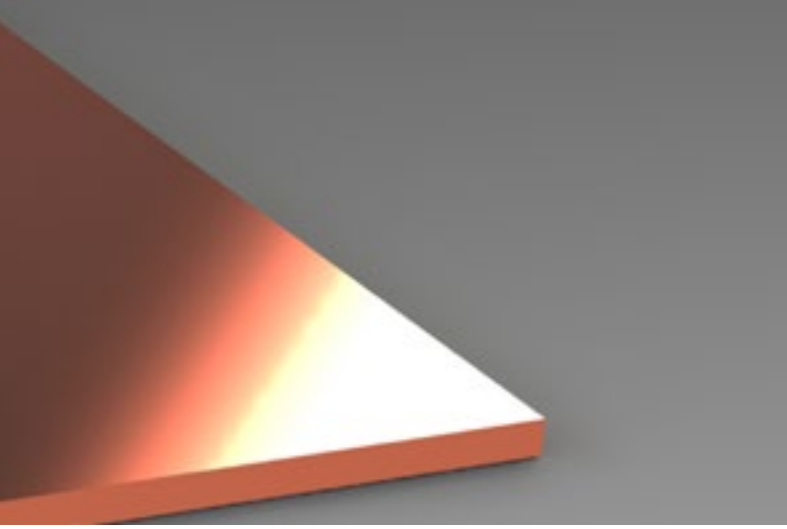
Der Königsweg wäre oftmals das direkte Verschweißen ohne Zusatzstoffe. Allerdings steht man insbesondere bei der Verwendung spröder Materialien vor extremen Herausforderungen. Beim Schweißen werden hohe Prozesstemperaturen benötigt und die induzierten thermischen Spannungen führen meist zu irreversiblen Schäden.

Eine Alternative bietet das Laserschweißen unter Einsatz ultrakurzer Laserpulse. Hierbei wird die Laserstrahlung in den Bereich der Kontaktfläche fokussiert (Abb. 1). Aufgrund der kurzen Interaktionszeiten ( $t < 10^{-11}$  s) und reduzierten Strahlungsenergien von wenigen Mikrojoule liegen die thermischen Lasten deutlich unter denen herkömmlicher Laserschweißprozesse. Folglich können Materialverspannungen reduziert und dauerhafte Schweißverbindungen erzeugt werden.

The permanent joining of dissimilar materials is an essential work step for the fabrication of countless products. Various processes such as clamping, gluing, soldering, or welding are available for this purpose. However, it might often be preferable to avoid the usage of additives such as adhesives or solder, for example if the connections are exposed to extreme environmental conditions. In this case, for example, chemical reactions, aging, or outgassing must be avoided.

The ideal solution would often be direct welding without additives. However, this entails extreme challenges, especially when brittle materials are used. As welding requires high process temperatures, the induced thermal stresses usually lead to irreversible damage.

Laser welding using ultrashort laser pulses (USP) offers an alternative solution. Here, the laser radiation is focused into the area of the contact surface (Fig. 1). Due to the short interaction times ( $t < 10^{-11}$  s) and reduced radiation energies of a few microjoules, the thermal loads are significantly lower than those of conventional laser welding processes. Consequently, strain can be reduced and durable joints produced. We were able to successfully weld different types of glass (borosilicate glass, quartz glass, Zerodur) onto metals such as copper, aluminum, or molybdenum using this novel process. (Fig. 2a, /1/). The weld seams produced exhibit tensile



### Authors

Gabor Matthäus  
Qinfeng Li  
Stefan Nolte

### Contact

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

Wir konnten durch dieses neuartige Verfahren unterschiedliche Glastypen (Borosilikatglas, Quarzglas, Zerodur) auf Metalle wie Kupfer, Aluminium oder Molybdän erfolgreich schweißen (Abb. 2a, /1/). Die erzeugten Schweißnähte weisen Zugfestigkeiten oberhalb von 10 MPa auf, wobei unter Berücksichtigung weiterer zukünftiger Optimierungsschritte noch deutlich höhere Festigkeiten zu erwarten sind. Unter Einsatz langwelliger Laserstrahlung im IR-Bereich konnten mit dieser Methode sogar erstmals Halbleiter, wie z. B. Silizium, auf Metalle geschweißt werden (Abb. 2b, /2,3/).

strengths above 10 MPa, and significantly higher strengths can be expected when further optimization steps are incorporated in the future. Using long-wave laser radiation in the IR range, it was even possible to weld semiconductors such as silicon onto metals for the first time using this method (Fig. 2b, /2,3/).

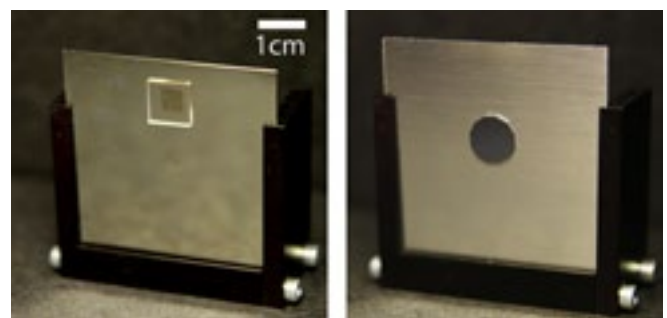
### Literatur / References

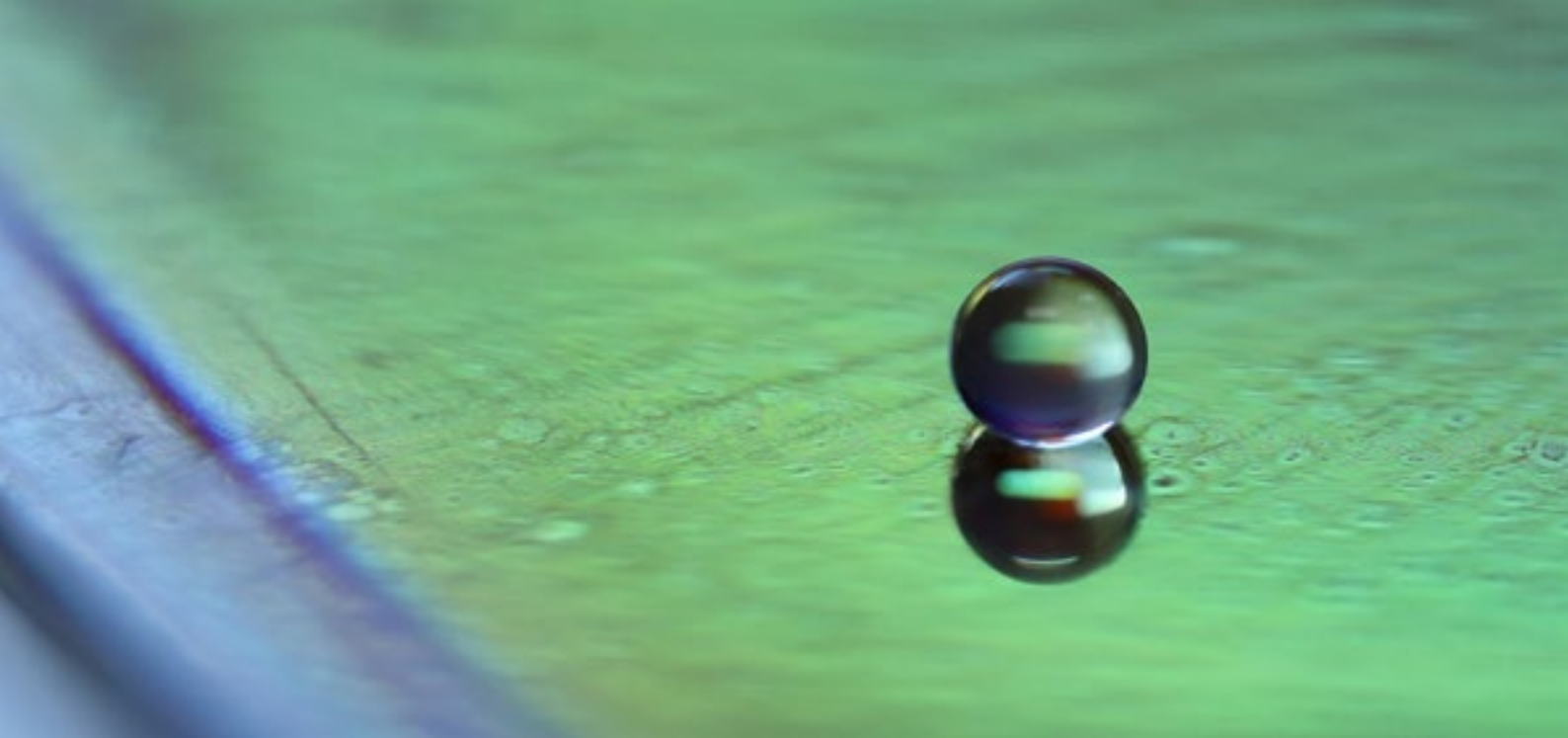
/1/ Q. Li et al.: Direct welding of glass and copper with a large gap by femtosecond laser pulse bursts, *Laser in Manufacturing, Proc.* 211 (2021).

/2/ M. Chambonneau et al.: Taming ultrafast laser filaments for optimized semiconductor-metal welding, *Laser & Photonics Reviews*, 15(2): 2000433 (2021).

/3/ M. Chambonneau et al.: Mastering micro-filamentation for semiconductor-metal ultrafast laser welding, 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), pp. 1–1 (2021).

[2] *Verbindung zweier ungleicher Materialien unter Verwendung von UKP-Laserschweißen. (a) Borosilikatglas auf Molybdän, (b) Silizium auf Aluminium. / Bonding of two dissimilar materials using USP laser welding. (a) Borosilicate glass on molybdenum, (b) silicon on aluminum.*





[1] Wassertropfen auf superhydrophober Oberfläche.  
Water droplets on superhydrophobic coating.

## Entwicklung einer lichtgesteuerten Mikrofluidikplattform Development of a light-driven microfluidic platform

Auf der Suche nach neuen Wirkstoffen gegen Infektionskrankheiten ist eine weitere Miniaturisierung und Automatisierung bestehender Labordiagnostik entscheidend. Hierbei ist die Handhabung einzelner Pikolitertropfen, welche Mikrobekulturen enthalten, notwendig. Diese werden beim Hochdurchsatz-Screening parallel vielen verschiedenen Wachstumsbedingungen ausgesetzt. Dadurch werden biochemische, genetische sowie pharmakologische Tests deutlich effizienter.

Im Projekt VersaDrop wird am Fraunhofer IOF eine mikrofluidische Plattform entwickelt, mit der in Wassertropfen gebundene Mikrobekulturen hochgenau manipuliert und analysiert werden können. Die Tropfen werden auf einer planen Oberfläche dosiert, bewegt, geteilt, zusammengeführt und gelagert. Zusätzlich ermöglicht die photonische und spektroskopische Analytik direkt auf der Plattform ein schnelles und effizientes Screening. Die Tropfenmanipulation erfolgt mittels Optoelectrowetting. Diese Methode nutzt den Effekt, dass sich das Benetzungsverhalten von Tropfen durch äußere elektrische Felder beeinflussen lässt. Auf einer fotoaktiven Oberfläche können die elektrischen Felder dann durch eine gezielte Beleuchtung eingestellt werden. Damit wird die Bewegung von Tropfen durch die selektive Beleuchtung einer fotoaktiven Oberfläche möglich. Für den Aufbau des Chips wird ein quadratisches Glassubstrat mit hydrogenisiertem amorphem Silizium durch plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung beschichtet. Für die elektrische Kontaktierung werden an den Rändern Silberelektroden mittels Tintenstrahlendruck

In the search for new active agents against infectious diseases, further miniaturization and automation of existing laboratory diagnostics is crucial. This requires the handling of individual picoliter drops, which contain microbial cultures. These are exposed to many different growth conditions in parallel during high-throughput screening. This makes biochemical, genetic, and pharmacological tests much more efficient.

In the VersaDrop project, a microfluidic platform, is being developed at Fraunhofer IOF to manipulate and analyze microbial cultures bound in water droplets with high precision. The droplets are dispensed, moved, divided, combined, and stored on a flat surface. In addition, photonic and spectroscopic analysis directly on the platform enables rapid and efficient screening. Droplet manipulation is performed using optoelectrowetting. This method uses the effect that the wetting behavior of droplets can be influenced by external electric fields. On a photoactive surface, the electric fields can then be adjusted by selective illumination. This enables the movement of droplets through the selective illumination of a photoactive surface.

To build the chip, a square glass substrate is coated with hydrogenated amorphous silicon by plasma-assisted chemical vapor deposition. For electrical contacting, silver electrodes are applied to the edges by inkjet printing. Tantalum pentoxide is then applied as electrical insulation by ion beam assisted deposition. The final layer is a hydrophobic layer applied by spin coating.





### Authors

Thomas Schönfelder  
Falk Kemper  
Maximilian Reif  
Erik Beckert

### Contact

Thomas Schönfelder  
Phone: +49 3641 807-127  
thomas.schoenfelder@  
iof.fraunhofer.de

aufgebracht. Anschließend wird Tantalpentoxid als elektrische Isolierung durch ionenstrahlgestützte Abscheidung appliziert. Den Abschluss bildet eine per Spincoating aufgebraachte hydrophobe Schicht.

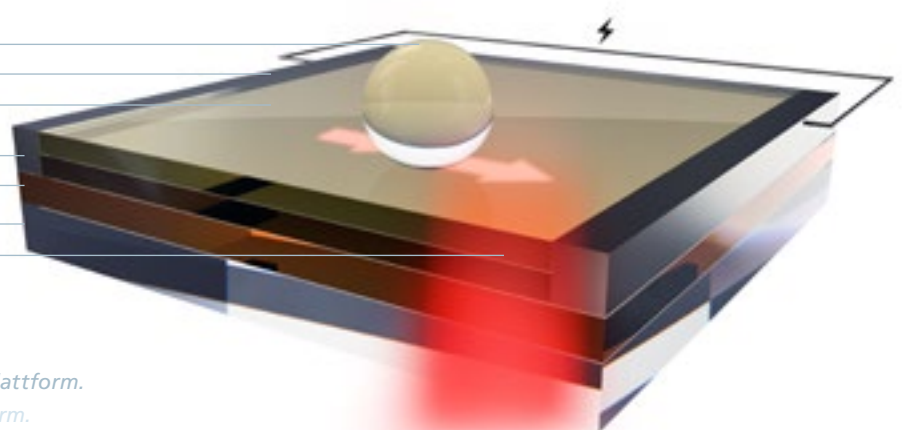
Durch Anlegung einer Wechselspannung zwischen den Elektroden sowie die punktuelle Beleuchtung direkt neben den zu bewegenden Tropfen erhöht sich die Leitfähigkeit an der beleuchteten Stelle. Damit wirkt eine größere elektrostatische Kraft auf den Tropfen, sodass dieser sich auf die beleuchtete Fläche bewegt. Durch Skalierung des Lichtpunktes lassen sich Tropfen in einem weiten Volumenbereich von wenigen Pikolitern bis einigen Mikrolitern bewegen. Die Geschwindigkeit beträgt bis zu 5 mm/s.

Die Entwicklung dieser lichtgesteuerten Mikrofluidikplattform ermöglicht die parallele Manipulation und Analyse kleinster Mengen verschiedener Mikrobekulturen und ermöglicht damit eine schnelle und ressourcenschonende Ergänzung der üblichen Labordiagnostik.

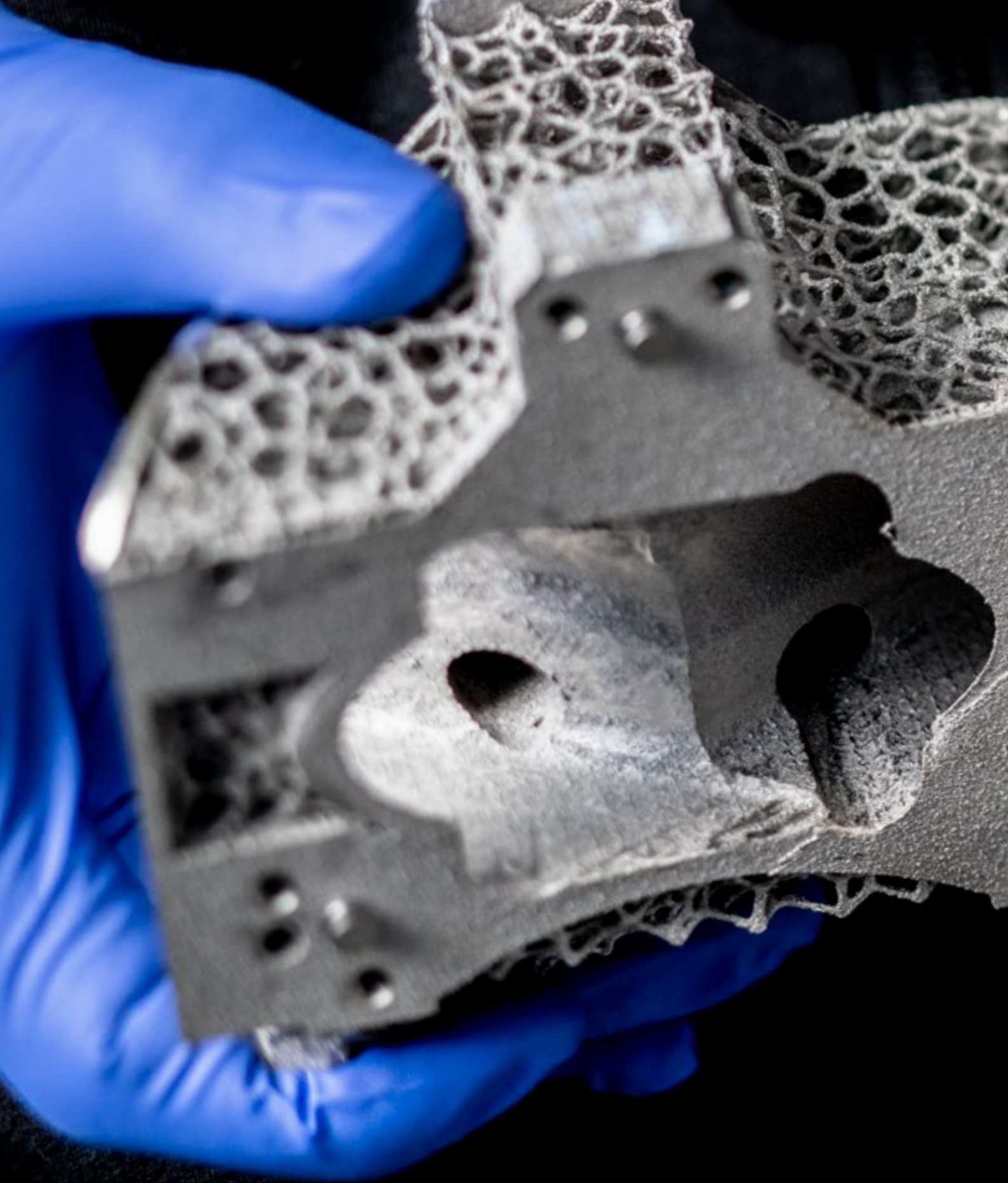
The application of an alternating voltage between the electrodes as well as spot illumination directly next to the droplets to be moved increases the conductivity at the illuminated spot. This causes a greater electrostatic force to act on the droplet, causing it to move onto the illuminated area. By scaling the light spot, drops can be moved in a wide volume range from a few picoliters to a few microliters. The speed is up to 5 mm/s.

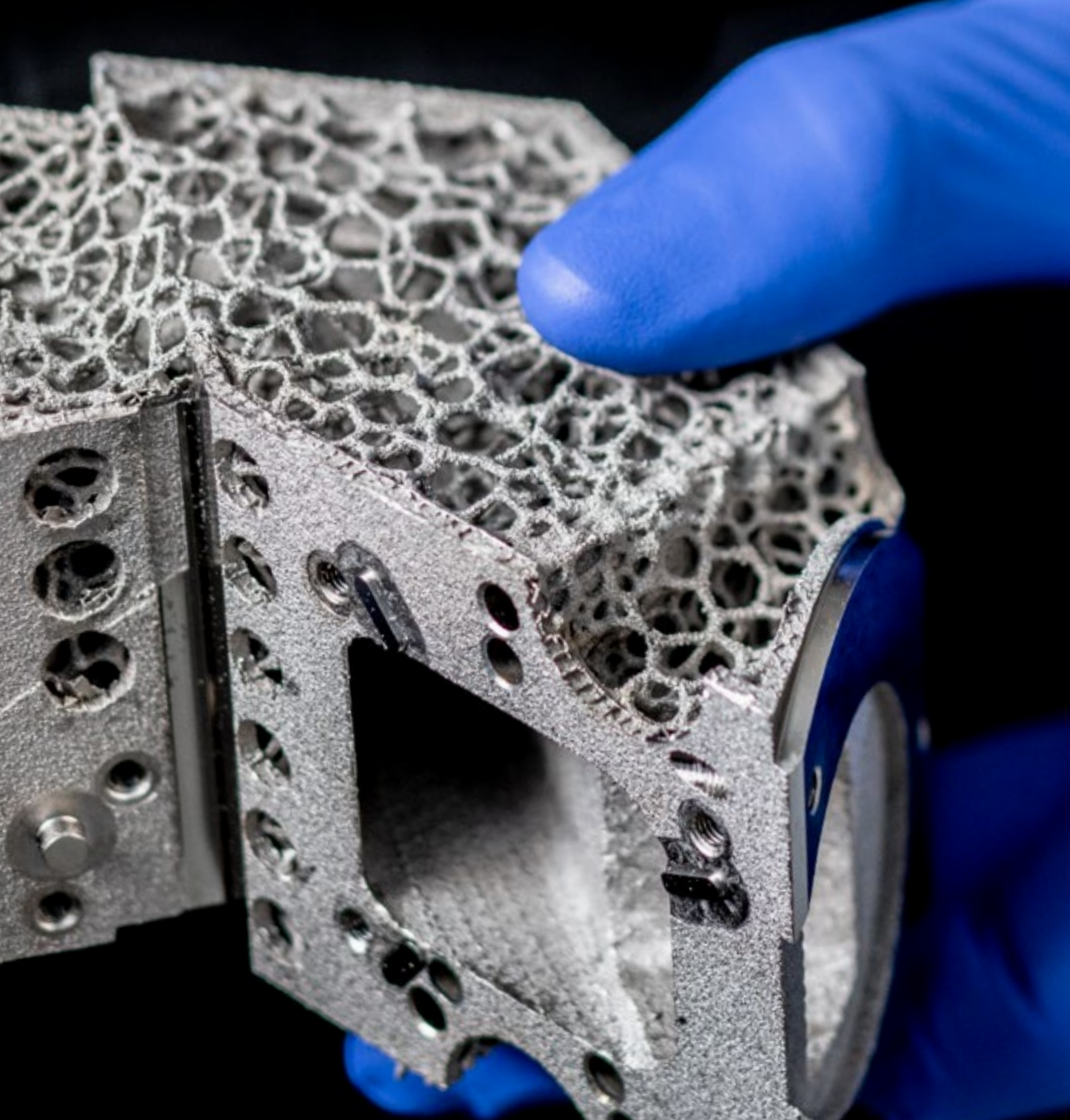
The development of this light-driven microfluidic platform enables the parallel manipulation and analysis of minute quantities of different microbial cultures, thus providing a rapid and resource-efficient addition to standard laboratory diagnostics.

- Water droplet
- Silver
- Hydrophobic coating
- Tantalumpentoxide
- Hydrogenated amorphous silicon
- Glass
- Light



[2] Prinzipskizze der lichtgesteuerten Mikrofluidikplattform.  
Schematic diagram of light-driven microfluidic platform.





Präzisionsoptische Komponenten und Systeme  
Precision Optical Components and Systems

---



[1] Vollständig aufgebauter 4-Kanal-Strahlteiler.  
Mounted 4-channel beamsplitter.

## Weltraumtaugliche Fügeverfahren optischer Baugruppen Space-capable joining technologies for optical assemblies

Die Aufbau- und Verbindungstechnik ist eine der wesentlichen Basistechniken für opto-mechanische Baugruppen. Polymerfreie Fügeverfahren ermöglichen feste Verbindungen selbst in harschen Umgebungsbedingungen wie dem Weltraum. Da die Verbindungen ohne (polymerhaltige) Hilfsstoffe auskommen, sind sie resistent gegen ionisierende Strahlung.

In der beobachtenden Astronomie sind Multikanal-Bildgebungsinstrumente von großem Interesse. Für ein Instrument zur Detektion von Gammablitzes im Spektralbereich von 800 nm - 1700 nm kommt ein 4-Kanal-Strahlteiler basierend auf drei Kieselglas-Kösters-Prismen zum Einsatz (Abb. 2). In Verbindung mit einem kompakten Teleskop, lässt sich das Instrument in einem Cubesat transportieren.

Im Rahmen einer Forschergruppe der Thüringer Aufbaubank bildeten theoretische Überlegungen zum Optik-Design und der thermomechanischen Simulation die Grundlage zur praktischen Umsetzung des 4-Kanal-Strahlteilers. Dafür werden drei Prismenpaare mit unterschiedlichen Strahlteiler-Beschichtungen durch das Plasma-aktivierte Bonden (PAB) verbunden, um die eingehende Strahlung in die entsprechenden Spektralbänder aufzuteilen.

Das PAB erfordert eine niedrige Rauheit (root mean square ~ 0,5 nm) bei gleichzeitig niedriger Oberflächenformabweichung ( $\lambda/10$  bei  $\lambda = 633$  nm). Die optischen Eigenschaften der Strahlteiler-Beschichtung erfordern eine Dicke der Beschichtungssysteme von bis zu 3  $\mu\text{m}$ . Mit der hohen Schichtdicke

Packaging is a fundamental technology for the realization of opto-mechanical systems. Polymer-free joining technologies provide strong bonds even in harsh environments like space. Due to their lack of additional material, the formed connections are resistant to ionizing radiation.

Multichannel imagers are of great interest for applications in the observing astronomy. For the detection of gamma ray bursts in a wavelength range of 800 nm to 1700 nm, a four-channel beamsplitter based on three Kösters prisms made of fused silica is used (Fig. 2). In combination with a compact telescope, the instrument fits into a Cubesat.

Within a research group of the Thüringer Aufbaubank, theoretical studies on the optical and mechanical design provided the fundamentals for the experimental realization of the four-channel beamsplitter. Therefore, three prism pairs with different coating systems for beam splitting are joined by plasma-activated bonding (PAB) to separate the incoming radiation into the specific photometric bands.

PAB requires low roughness (root mean square ~ 0.5 nm) and low surface figure deviation from a plane ( $\lambda/10$  at  $\lambda = 633$  nm). The optical performance of the whole system necessitates a coating thickness of up to 3  $\mu\text{m}$ . Thick coatings result in a rough surface. Chemical mechanical polishing of the coatings before bonding is therefore crucial to decrease the surface roughness. In this way, the three prism pairs were joined successfully.



### Authors

Carolin Rothhardt  
Kevin Grabowski  
Britta Satzer  
Ralph Schlegel  
Sebastian Schmidl

### Contact

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

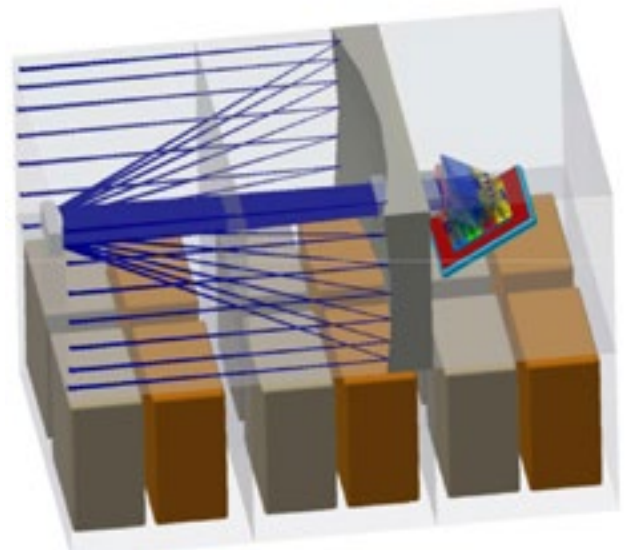
geht eine Aufrauung der Probenoberfläche einher. Durch eine Politur der Strahlteilerschichten vor dem Fügen wird die Oberflächenrauheit auf das für das PAB notwendige Maß reduziert. So wurden drei Prismenpaare mit jeweils unterschiedlichen optischen Schichteigenschaften versehen und anschließend erfolgreich gefügt.

Die Toleranzanalyse ergab hohe Anforderungen an die Positionierung der Prismenpaare zueinander (z. B. Parallelität des Luftspalts von  $0,1^\circ$ ). Die drei Prismenpaare wurden daher silikatisch auf eine Glas-Platte gefügt. Hierbei verbindet eine anorganische (silikatische) FügeLösung die Fügepartner unter Bildung eines Silikatnetzwerks und erlaubt gleichzeitig eine genaue Positionierung der einzelnen Glasbauteile.

Im Rahmen der mechanischen Simulation wurden die zu erwartenden mechanischen und thermischen Belastungen der Glaskomponenten bei einem Raketenstart und im Weltraum simuliert. Die erzielten Festigkeiten der Fügeverbindungen von 50 MPa (~ 50 % der Festigkeit eines massiven Glaskörpers) sind dabei deutlich größer als die zu erwartenden mechanischen Spannungen. Darüber hinaus zeigten Probekörper, die kryogenen Bedingungen ausgesetzt waren, keine Einschränkungen der mechanischen Festigkeit und der optischen Eigenschaften.

Tolerance analysis revealed high requirements on the positioning of the three prism pairs (e.g., air gap parallelism up to  $0.1^\circ$ ). Therefore, mounting of the three prism pairs was realized by silicate bonding in high precision mechanical fixtures. Here, an inorganic silicate solution is used to join the partners under formation of a solid silicate network.

Mechanical and thermal loads during rocket launch and in space were estimated by finite element modelling. The achieved mechanical strength of ~ 50 MPa (50 % of bulk glass) with both joining technologies is resistant to these high loads. The connections remained mechanically stable and the optical properties were not altered after exposing test samples to cryogenic temperatures.



[2] Schema von Teleskop und 4-Kanal-Strahlteiler im Cubesat-Gehäuse. / Telescope and 4-channel beamsplitter within a cubesat.



[1] Integration Teleskop. / Telescope integration.

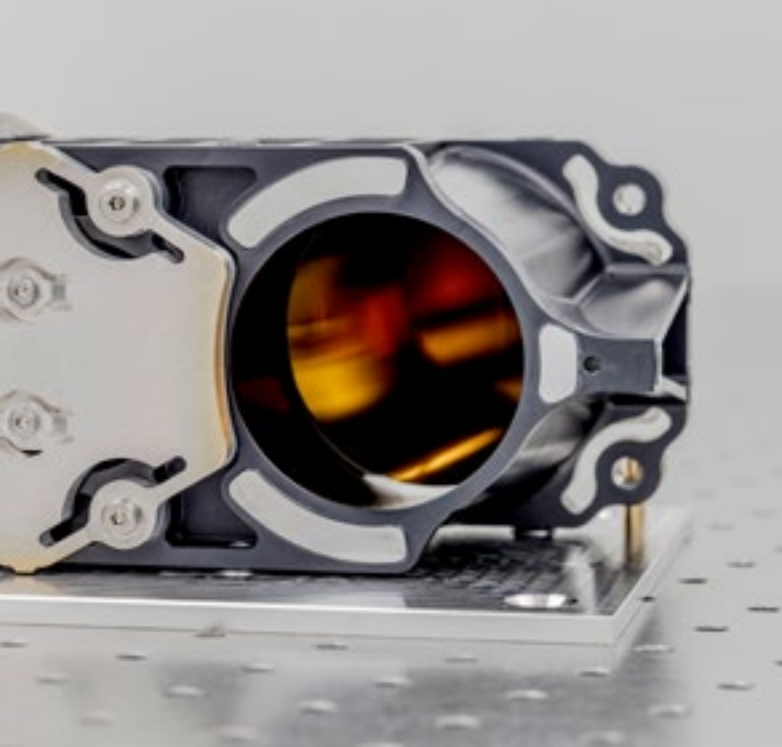
## Entwicklung eines Teleskops für die Erdbeobachtung von der ISS / Development of a telescope for Earth observation from the ISS

Der Klimawandel stellt uns vor riesige Herausforderungen. Der Umgang mit der Ressource Wasser ist eine davon. Um in Zukunft ein ressourcenschonenderes Wirtschaften, insbesondere in der Landwirtschaft, zu ermöglichen, hat das Fraunhofer IOF in Kooperation mit dem Fraunhofer EMI aus Freiburg und den Unternehmen SPACEOPTIX und ConstellR – beides Ausgründungen aus der Fraunhofer-Gesellschaft – ein neuartiges Spiegelteleskop entwickelt. Das Teleskop ist Teil eines Messinstruments, dessen Entwicklung vom Fraunhofer EMI und ConstellR durchgeführt wurde und künftig von der Internationalen Raumstation ISS aus den Wasserkreislauf unseres Planeten vermessen wird. Dabei werden mit Hilfe einer Thermalinfrarotkamera Temperaturdaten der Erdoberfläche generiert. Das Messinstrument ist der Vorläufer einer von ConstellR geplanten Konstellation von sogenannten Mikrosatelliten. Mit dieser Konstellation ist eine hohe räumliche und zeitliche Datengenerierung von jedem Punkt der Erde möglich.

Das opto-mechanische Design des Teleskopes basiert auf moderner Freiform-Technologie und wurde vom Fraunhofer IOF entwickelt, welches über einen großen Erfahrungsschatz in der Entwicklung von Hochleistungsoptiken und deren Einsatz im Weltraum verfügt. Das mechanische Design war getrieben durch ein sehr begrenztes Masse- und Platzbudget. Gleichzeitig müssen die enormen Belastungen beim Raketenstart überstanden werden und die mikrometeregenaue Justage der

Climate change presents huge challenges. Dealing with resource water is one of them. In order to enable a more resource-efficient economy in the future, especially in agriculture, Fraunhofer IOF has developed a novel mirror telescope in cooperation with Fraunhofer EMI in Freiburg and companies SPACEOPTIX and ConstellR – both spin-offs from the Fraunhofer-Gesellschaft. The telescope is part of a measuring instrument developed by Fraunhofer EMI and ConstellR, which will measure the water cycle of our planet from the International Space Station ISS. For this purpose, temperature data of the Earth's surface will be generated with the help of a thermal infrared camera. The measuring instrument is the forerunner of a constellation of so-called microsattellites planned by ConstellR. With this constellation, a high spatial and temporal data generation is possible from any point on Earth.

The opto-mechanical design of the telescope is based on modern freeform technology and was developed by Fraunhofer IOF, which has many years' experience in developing high-performance optics for space application. The mechanical design was driven by a limited mass and envelope budget. At the same time, the enormous loads of the rocket launch must be withstood, and the components must be aligned with one another with micrometer accuracy. In orbit, the 45-minute alternation between solar and shadow phases puts high thermal stresses on the assembly. With a so-called athermal



[2] ConstellR Teleskop. / ConstellR telescope.

#### Authors

Henrik von Lukowicz  
Lucas Zettlitzer  
Marius Bierdel<sup>1</sup>  
Matthias Beier<sup>2</sup>  
Max Gulde<sup>3</sup>

#### Contact

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

Bauteile zueinander erhalten bleiben. Im Orbit angekommen wirken durch den 45-minütigen Wechsel von Sonnen- und Schattenphasen hohe thermische Belastungen auf die Baugruppe. Durch die Verwendung eines sogenannten athermalen Designs können die optischen Eigenschaften des Systems über Temperaturbereiche von - 200 °C bis 100 °C konstant gehalten werden und die Leistungsfähigkeit des Systems bleibt unabhängig von der Umgebungstemperatur bestehen.

Die Fertigung und Integration des Teleskopes wurde von der Firma SPACEOPTIX GmbH durchgeführt, welche sich auf die Serienfertigung von metalloptischen Systemen spezialisiert hat. Nach der Integration des Gesamtsystems durch das Fraunhofer EMI und die ConstellR GmbH sowie anschließenden erfolgreich absolvierten Umwelt- und Funktionstests wurde das System im Dezember 2021 an die NASA übergeben. Im Frühjahr 2022 startete das Messinstrument zur ISS. Mit seinen Messungen leistet es einen wichtigen Beitrag beim Kampf gegen den Klimawandel und dessen Auswirkungen.

Gefördert wurde das Vorhaben zur Entwicklung des Teleskops vom Pilotprojekt »Digital Innovation Hub Photonics« (DIHP), einer vom Freistaat Thüringen geförderten Initiative zur Förderung von Gründungsvorhaben im Bereich Optik und Photonik.

design, the optical properties of the system can be kept constant over temperature ranges from – 200 °C to 100 °C and the performance of the system remains independent of the ambient temperature.

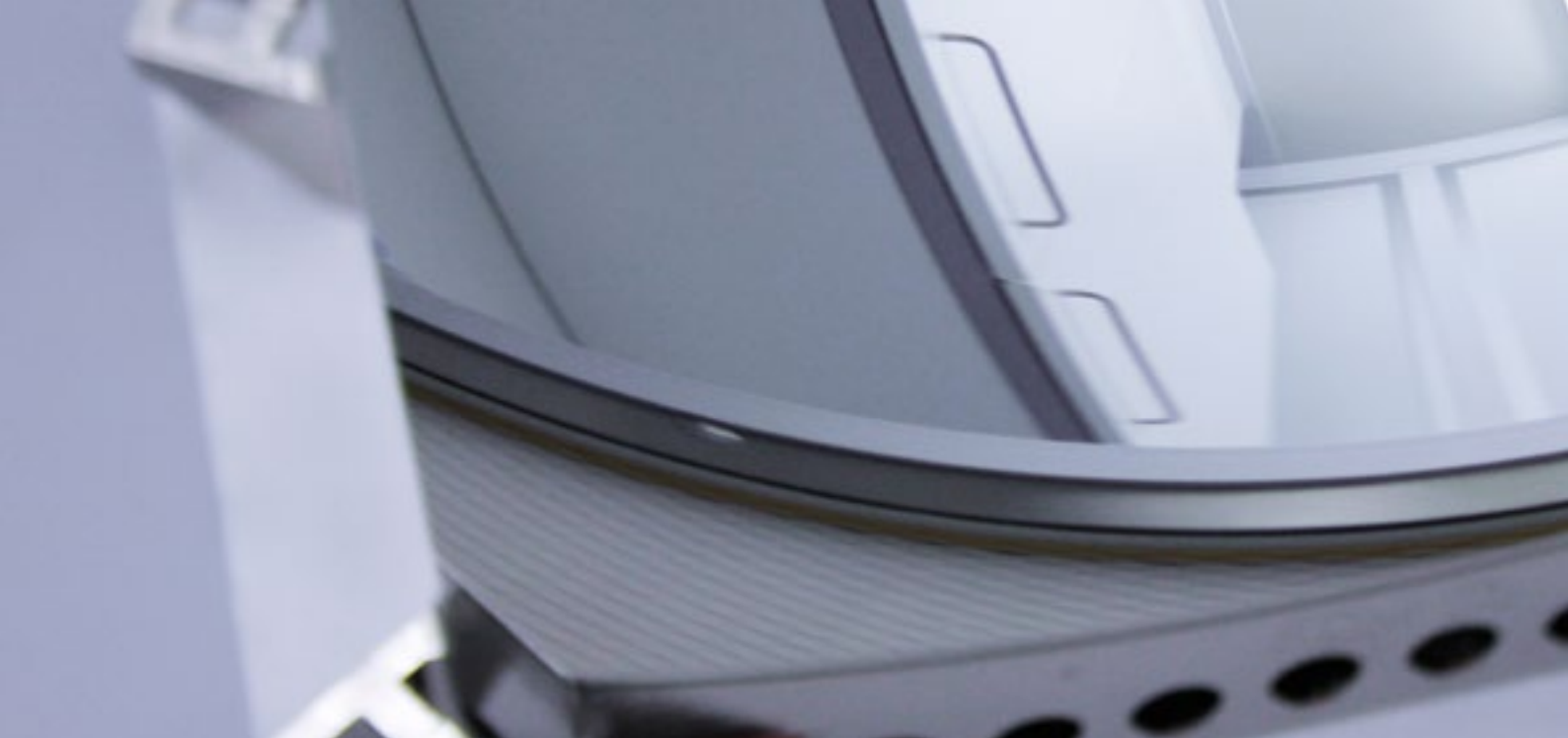
The manufacturing and integration of the telescope was carried out by SPACEOPTIX GmbH, which specializes in the series production of metal optical systems. After the integration of the complete system by Fraunhofer EMI and ConstellR GmbH and subsequent successful environmental and functional tests, the system was given to NASA in December 2021. The measuring instrument was launched to the ISS in spring 2022. With its measurements, it makes an important contribution to the fight against climate change and its effects.

The project to develop the telescope was funded by the pilot project "Digital Innovation Hub Photonics" (DIHP), an initiative supported by the Free State of Thuringia to promote start-up projects in the field of optics and photonics.

<sup>1</sup> Fraunhofer EMI

<sup>2</sup> SPACEOPTIX GmbH

<sup>3</sup> ConstellR GmbH



[1] Beschichteter Spiegel FLEX LRM1/2. / Coated mirror FLEX LRM1/2.

## Metallspiegel mit stark reduzierten mittelfrequenten Fehlern / Metal mirrors with strongly reduced mid spatial frequency errors

Metalloptiken sind aufgrund ihrer Temperaturbeständigkeit und ihrer Stabilität sehr gut für den Weltraumeinsatz geeignet und seit einigen Jahren dort etabliert /1,2,3,4/. Im Rahmen der FLEX-Mission, in deren Verlauf quantitative Messungen der sonneninduzierten Fluoreszenz der Vegetation auf der Erde zur Beurteilung der Photosyntheseaktivität durchgeführt werden sollen, wird im genutzten FLORIS-Instrument ein Spektrometer mit zwei Kanälen: LR (Low Resolution) und HR (High Resolution) benötigt. Der Hauptspiegel im LR-Kanal ist eine Metalloptik aus feinkörnigem Aluminium RSA 6061 mit einer Nickelphosphor-Dickschicht und wurde am Fraunhofer IOF entwickelt, gefertigt und vergütet. Der Spiegel ist sphärisch-konkav und stellt eine gemeinsame Optikfläche für zwei Reflektionen des Strahlengangs im Spektrometer bereit. Deshalb und aufgrund des sehr kleinen Fehlerbudgets musste die Fertigung unter Einhaltung engster Formtoleranzen bezüglich Radientoleranz und Formgenauigkeit sowie hochfrequenter und mittelfrequenter Rauheit (HSFR und MSFR) durchgeführt werden. Durch die Nutzung fortgeschrittener Referenzierungssysteme am Spiegel und der dadurch möglichen Durchführung der Fertigung mit wenigen Spannvorgängen kann eine sehr hohe Bezugsgenauigkeit der Optikfläche zu den Referenzen erreicht werden, womit sich die Messung und Integration deutlich vereinfacht. Die Form- und Rauheitsvorgaben wurden sehr erfolgreich bei dem zu liefernden Flugmodell eingehalten ( $\Delta R < 0,005$  mm, Mikrorauheit 2,5x-Objektiv 0,60 nm +/- 0,03 nm RMS und 40x-Objektiv

Due to their mechanical and temperature stability, metal optics are well suited and established for space applications /1,2,3,4/. As part of the FLEX mission, for quantitative measurements of sun-induced fluorescence of plants on the Earth to assess their photosynthesis activity, the FLORIS instrument contains a spectrometer that consists of two channels: LR (low resolution) and HR (high resolution). The main mirror in the LR channel is a fine-grained aluminum RSA 6061 optic with a nickel phosphorus layer, which was developed, manufactured, and further processed at Fraunhofer IOF. The mirror is concave with a spherical shape and provides a common optical surface for two reflections of the beam in the spectrometer. Therefore, the manufacturing had to be performed within very tight tolerances in terms of surface shape, radius of curvature, as well as high frequency and mid frequency roughness. By using advanced reference systems for the mirror, the manufacturing can be performed with a reduced number of mounting steps. Therefore, the optical surface is precisely aligned with respect to the mechanical references, which ultimately simplifies measurement and integration. Surface form and roughness specifications were successfully achieved for the flight model. These are  $\Delta R < 0.005$  mm, micro roughness with 2.5x objective 0.60 nm +/- 0.03 nm RMS, and with the 40x objective 0.16 nm +/- 0.02 nm RMS. The goal specification of the maximum slope error of 1  $\mu$ rad was fulfilled in a limited manner, but it is still exceeded in some surface areas. Nevertheless, the





### Authors

Johannes Hartung  
Mathias Rohde  
Sandra Müller  
Stefan Risse

### Contact

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

0,16 nm +/- 0,02 nm RMS). Die Ziel-Spezifikation des maximalen Anstiegsfehlers von 1  $\mu$ rad wurde nur eingeschränkt erfüllt: In einzelnen Bereichen der Oberfläche wird der Anstiegsfehler überschritten. Die erreichten Qualitätsmerkmale erfüllen dennoch die Anforderungen der FLEX-Mission und sind als extrem gut einzustufen. Abschließend wurde der Spiegel mit einer geschützten Silberbeschichtung hochreflektierend beschichtet ( $R > 96\%$  im adressierten Spektralbereich VIS-NIR). Aufgrund der extremen Anforderungen gegenüber Streueffekten sind neben superpolierten Oberflächen auch die Sauberkeit durchgehend sicherzustellen. Der Spiegel wird derzeit im Instrument integriert und wird ab 2024 im erdnahen Orbit im Einsatz sein.

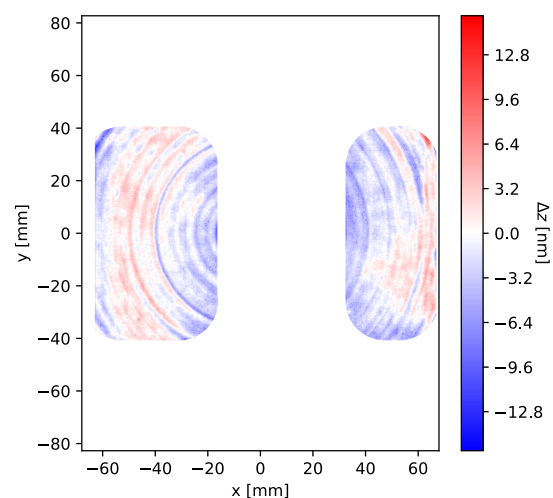
Die Autoren danken den Mitarbeitenden von OHB, insbesondere Paolo Sandri und Yann Gerome, für ihre Unterstützung. Das Projekt wurde im Rahmen des ESA-Projekts FLEX, Vertragsnummer FLEX FLX-CO-OHB-INS-0003 (in Leonardo S.p.A contract No. 4000118350/FLEX B2-CD/OHB), durchgeführt.

### Literatur / References

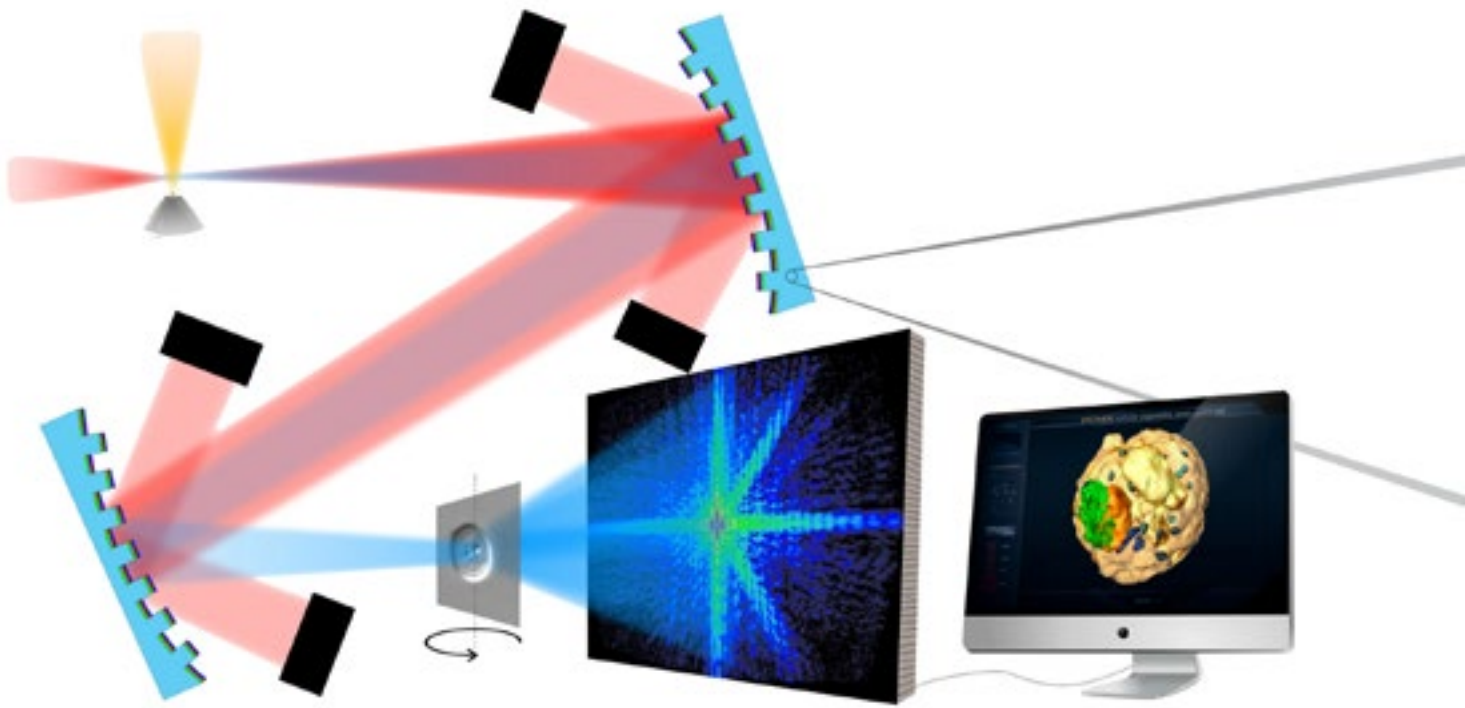
- /1/ T. Peschel et al.: Integration and testing of an imaging spectrometer for Earth observation, SPIE Proceedings Volume 11180, 267–273, International Conference on Space Optics – ICSO 2018, Chania, Greece (2019).
- /2/ S. Risse et al.: Ultraprecise flat mirrors for the pointing unit of the DESIS instrument on board of the ISS, Proc. SPIE 11101, 1110106 (2019).
- /3/ T. Zeh et al.: MERTIS - The Thermal Infrared Imaging Spectrometer Onboard of the Mercury Planetary Orbiter, SPIE Proceedings Volume 10564, 498 – 505, International Conference on Space Optics - ICSO 2012, Ajaccio, Corsica, France (2017).
- /4/ A. Gebhardt et al.: MERTIS: optics manufacturing and verification, Proc. SPIE 7808, 78080Q (2010).

quality measures of the mirror correspond very well to the performance requirements of the FLEX mission and are very well rated. At the end, the mirror was coated with a high reflective protected silver coating ( $R > 96\%$  in the spectral range VIS-NIR). Due to the extreme demands on stray light, both super polished surfaces and cleanliness are necessary in the entire process chain. The mirror is now in the integration stage and is expected to be deployed in a low Earth orbit in 2024.

The authors are very grateful for the support by OHB, especially from Paolo Sandri and Yann Gerome. This work has been performed under ESA contract for the project FLEX FLX-CO-OHB-INS-0003 (in Leonardo S.p.A contract No. 4000118350/FLEX B2-CD/OHB).



[2] *Finale Messung des Spiegels in den zwei CAs.*  
*Final measurements of the mirror within the two distinct CAs.*



[1] Vision der neuartigen Bildgebung biologischer Proben.  
 Vision of novel imaging of biological samples.

## Hochleistungsoptiken für (kohärente) weiche Röntgenstrahlung / High power optics for (coherent) soft X-rays

Der extrem ultraviolette Spektralbereich (EUV bzw. XUV) ist in vielerlei Hinsicht interessant zur Erzeugung, Manipulation und Analyse kleinster Strukturen und rückt zunehmend in den Fokus der Wissenschaft. Angeregt durch wissenschaftlich-technische Anforderungen erarbeitete die Nachwuchsforschergruppe HOROS Grundlagen zur Entwicklung optischer Komponenten und Bildgebungsverfahren für EUV- und XUV-Anwendungen. Zur Realisierung von Hochleistungsoptiken für Laboranwendungen wurden grundlegend vier technologische Zielstellungen bearbeitet: (i) Technologiekette superpolierter Oberflächen von reflektiven Metalloptiken; (ii) Strukturierungstechnologie zur Beugung bzw. Minimierung störender IR-Strahlung; (iii) hochreflektierende Multilayer-Schichten für verschiedene Wellenlängen; (iv) Evaluierung von Hardware und Entwicklung software-gestützter Auswertalgorithmen zur 3D-Bildgebung zur Untersuchung biologischer Zellen (auch Krebszellen).

Durch die Erzeugung hoher Harmonischer mit Hochleistungsfaserlasern können leistungsfähige Strahlquellen für kohärente EUV- und XUV-Strahlung realisiert werden, welche die technologische Grundlage zur Bildgebung darstellen. Daraus ableitend ergeben sich Anforderungen bzgl. der Freiform-Metalloptiken mit einer hohen Reflektivität im adressierten Spektralbereich und eine effiziente Unterdrückung der IR-Strahlung.

Die metalloptischen Substrate wurden durch Politur- und Korrekturverfahren mit Mikrorauheiten  $\leq 0,15$  nm RMS (AFM,

The extreme ultraviolet spectral range (EUV or XUV) is interesting in many respects for the generation, manipulation, and analysis of the smallest structures and is increasingly becoming the focus of science. Inspired by scientific and technical requirements, the junior research group HOROS worked out basic principles for the development of optical components and imaging methods for EUV and XUV applications. For the realization of high-performance optics for laboratory applications, four fundamental technological objectives were addressed: (i) technology chain for superpolished surfaces of reflective metal optics; (ii) structuring technology for diffraction or minimization of interfering IR radiation; (iii) highly reflective multilayer coatings for different wavelengths; (iv) evaluation of hardware and development of software-based evaluation algorithms for 3D imaging for the investigation of biological cells (including cancer cells).

By generating high harmonics with high-power fiber lasers, powerful beam sources for coherent EUV and XUV radiation can be realized, which represent the technological basis for imaging. This results in requirements for freeform metal optics with high reflectivity in the addressed spectral range and efficient suppression of IR radiation.

The metallic substrates were realized by polishing and correction methods with microroughness  $\leq 0.15$  nm RMS (AFM,  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ) and surface shape deviations  $\leq 6$  nm RMS ( $\varnothing 10$  mm). A grating efficiency of 2500 (IR vs. XUV radiation) was achieved with lithographically generated diffractive



1  $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ) und Oberflächenformabweichungen  $\leq 6 \text{ nm}$  RMS ( $\varnothing 10 \text{ mm}$ ) realisiert. Mit lithographisch erzeugten diffraktiven Strukturen konnte eine Gittereffizienz von 2500 (IR- vs. XUV-Strahlung) erreicht werden. Für Applikationen mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 3,1 \text{ nm}$  wurde auf Basis von Cr/Sc-Schichtsystemen eine Reflexion von 27,0 % und für Applikationen mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 4,4 \text{ nm}$  auf Basis von Cr/C-Schichtsystemen mit  $\text{B}_4\text{C}$ -Barrieren eine Reflexion von 15,6 % erreicht.

Zur Charakterisierung der erzielten Fokusspots auf der sub- $\mu\text{m}$  Skala wurde ein neues Verfahren entwickelt. Es basiert auf einer Amplitudenmaske, die im Fokus platziert wird. Die Amplituden- und Phasenfunktion der einfallenden Lichtwelle kann aus einem einzigen Beugungsbild hinter dieser Maske gewonnen werden /1/.

Zur Bildgebung im adressierten Wellenlängenbereich wurde ein linsenloses Bildgebungsverfahren speziell für breitbandige Kurzpulsquellen im XUV entwickelt /2/. Hierbei wird die Bildinformation mit 34 nm Auflösung durch inverse Fourier-Transformation und angepasste Frequenzfilter gewonnen.

Die Nachwuchsforschergruppe HOROS erarbeitete Grundlagen für Pionierexperimente zur hochauflösenden XUV-Bildgebung/-Mikroskopie im Labormaßstab und dankt dem Europäischen Sozialfond (ESF) und der Thüringer Aufbaubank (TAB) für die finanzielle Förderung (FKZ:2017FGR0076).

Authors	Contact
Dr. Jan Kinast Anja Schöneberg Wilhelm Eschen Dr. Sergiy Yulin Dr. Jan Rothhardt	Dr. Jan Kinast Phone: +49 3641 807-364 jan.kinast@iof.fraunhofer.de

structures. For applications with a wavelength of  $\lambda = 3.1 \text{ nm}$ , a reflectance of 27.0 % was achieved based on Cr/Sc layer systems, and for applications with a wavelength of  $\lambda = 4.4 \text{ nm}$ , a reflectance of 15.6 % was achieved based on Cr/C layer systems with  $\text{B}_4\text{C}$  barriers.

A new method was developed to characterize the obtained focal spots on the sub- $\mu\text{m}$  scale. It is based on an amplitude mask placed in the focus. The amplitude and phase function of the incident light wave can be obtained from a single diffraction image behind this mask /1/.

For imaging in the addressed wavelength range, a lensless imaging method was developed especially for broadband short-pulse sources in the XUV /2/. Here, image information with 34 nm resolution is obtained by inverse Fourier transformation and matched frequency filters.

The junior research group HOROS developed fundamentals for pioneering experiments on high-resolution XUV imaging/microscopy on a laboratory scale and would like to thank the European Social Fund (ESF) and the Thüringer Aufbaubank (TAB) for financial support (FKZ:2017FGR0076).

## Literatur / References

/1/ W. Eschen et al.: Single-shot characterization of strongly focused coherent XUV and soft X-ray beams, *Opt. Lett.* 45, 4798–4801 (2020).

/2/ W. Eschen et al.: Towards attosecond imaging at the nanoscale using broadband holography-assisted coherent imaging in the extreme ultraviolet, *Commun. Phys.* 2021 41 4(1), 1–7 (2021).





Funktionelle Oberflächen und Schichten  
Functional Surfaces and Coatings

---



[1] Dielektrischer PEALD-Spiegel.  
Dielectric PEALD mirrors.

## Dielektrische PEALD-Spiegel für Hochleistungslaseranwendungen / Dielectric PEALD mirrors for high power laser applications

Optische Komponenten wie dielektrische Spiegel auf komplexgeformten Optiken sind von steigendem Interesse. Diese müssen eine hohe Reflexion, hohe Laserzerstörungsschwellen (LIDT), hohe mechanische und Klimabeständigkeit sowie gute Homogenität aufweisen. Atomlagenabscheidung (ALD) ermöglicht eine präzise Kontrolle der Schichtdicke sowie konforme Beschichtungen auf 3D-Substraten. Plasma-gestützte ALD (PEALD) setzt energetische Plasmaspezies ein, um Beschichtungen bei niedriger Temperatur zu ermöglichen. Darüber hinaus können die Ionenenergien im Plasma angepasst werden, um Dünnschichtigenschaften wie Brechungsindex, Dichte, mechanische Spannung und elementare Zusammensetzung durch Anwendung einer Substratvorspannungstechnik zu modifizieren [1,2]. Dielektrische Spiegel für Laserwellenlängen bei 355 nm und 532 nm wurden bei 100 °C unter Verwendung einer Substratvorspannungstechnik in PEALD abgeschieden.  $\text{HfO}_2$  und  $\text{SiO}_2$  wurden als Schicht mit hohem bzw. niedrigem Brechungsindex verwendet. Das unter Verwendung von Resonator-Ring-Down-Spektroskopie für den Spiegel bei 355 nm (Abb. 2a) und 532 nm (Abb. 2a) gemessene Reflexionsvermögen betrug 99,93 % bei der Designwellenlänge. Die Absorption von Spiegeln bei 355 nm, die mit photothermischer Common-Path-Interferometrie (PCI) und laserinduzierter Ablenkung (LID) gemessen wurde, betrug ~70 ppm bzw. ~87 ppm. Die Absorption von Spiegeln bei 532 nm, gemessen mit PCI- und LID-Techniken, betrug ~10 bzw. ~6 ppm. Die am Spiegel bei einer Wellenlänge von 532 nm

Demand for dielectric mirrors on strongly curved optics for high power laser applications is increasing. These must have a high reflectivity at the design wavelength, high laser induced damage threshold (LIDT), high mechanical and environmental stability as well as good homogeneity. Atomic layer deposition (ALD) enables precise thickness control as well as conformal coatings on 3D substrates. Plasma enhanced atomic layer deposition (PEALD) applies energetic plasma species to deposit coatings at low deposition temperature. Furthermore, ion energies in the plasma can be tailored to modify thin film properties such as refractive index, mass density, mechanical stress, and elemental composition by applying a substrate biasing technique [1,2].

Dielectric mirrors for 355 nm and 532 nm laser wavelengths were deposited using  $\text{HfO}_2$  and  $\text{SiO}_2$  as high and low refractive index layers. The reflectance measured using cavity ring-down spectroscopy were 99.93 % at both design wavelengths (Fig. 2). Absorption of a mirror at 355 nm measured using photothermal common-path interferometry (PCI) and laser induced deflection (LID) techniques were ~70 ppm and ~87 ppm respectively. Absorption of mirrors at 532 nm measured using PCI and LID techniques were ~10 and ~6 ppm respectively. The scattering measured on mirror at 532 nm wavelength was as low as 0.8 ppm (in transmission) and 2.8 ppm (in reflection). The residual transmission from the mirror at 532 nm was 500 ppm. The mirrors were mechanically stable with tensile stress lower



### Authors

Vivek Beladiya  
Sven Schröder  
Adriana Szeghalmi

### Contact

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

gemessene Streuung betrug nur 0,8 ppm (in Transmission) und 2,8 ppm (in Reflexion). Die Resttransmission des Spiegels bei 532 nm betrug 500 ppm.

Die Spiegel waren bei einer Zugspannung von weniger als 120 MPa und bei einer Dicke von bis zu 2,33  $\mu\text{m}$  mechanisch stabil und zeigten keine Risse. Die Spiegel waren umweltstabil, da nach dem Feuchtigkeitstest keine Delaminierung beobachtet wurde. Schließlich wurden die Spiegel Hochleistungslaserpulsen bei 355 nm und 532 nm ausgesetzt, um LIDT in einem R-on-1-Verfahren zu testen (10 Pulse pro Fluenz bei Layertec GmbH und 10000 Pulse pro Fluenz bei RhySearch). Der Spiegel bei 355 nm und 532 nm zeigte einen fehlerfreien LIDT von 60 bis 80  $\text{J}/\text{cm}^2$ . Während defektgetriebene LIDT-Werte zwischen 19 und 25  $\text{J}/\text{cm}^2$  lagen. Wir haben gezeigt, dass die Substratvorspannung während des Plasmapulses eine Möglichkeit bietet, die physikalischen Aspekte der Ionenenergien im PEALD-Prozess auszunutzen und dadurch die Filmeigenschaften anzupassen. Außerdem wird diese Technik verwendet, um umwelt- und mechanisch stabile Spiegel mit einem LIDT-Wert herzustellen, der mit denen vergleichbar ist, die durch PVD-Techniken abgeschieden werden.

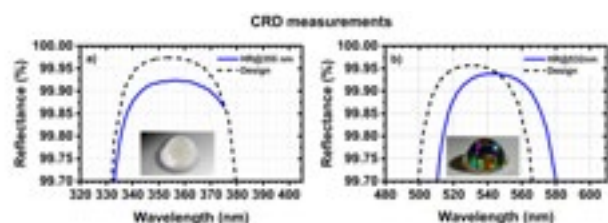
### Literatur / References

/1/ V. Beladiya et al.: Effect of electric field during deposition of silicon dioxide thin films by plasma enhanced atomic layer deposition: experimental and computational study, *Nanoscale* 12, 2089–2102 (2020).

/2/ V. Beladiya et al.: Plasma enhanced atomic layer deposition of  $\text{HfO}_2$  with substrate biasing: thin films for high reflective mirrors, *ACS Applied Materials Interfaces* 14, 14677–14692 (2022).

than 120 MPa with thickness up to 2.33  $\mu\text{m}$  and showed no cracks. The mirrors were environmentally stable as no delamination was observed after the humidity test. Finally, the mirrors were subjected to high power laser pulses at 355 nm and 532 nm to test LIDT in a R-on-1 method (10 pulses per fluence at Layertec GmbH and 10,000 pulses per fluence at RhySearch). The mirror at 355 nm and 532 nm showed defect free LIDT of 60 to 80  $\text{J}/\text{cm}^2$ , whereas defect driven LIDT values were between 19 and 25  $\text{J}/\text{cm}^2$ .

We have shown that substrate biasing during the plasma pulse has provided a means to exploit the physical aspects of ion energies in PEALD process and thereby tailor film properties. Further, this technique is used to produce environmentally and mechanically stable mirrors with LIDT values comparable to those deposited by PVD techniques.



[2] Reflexionsspektren hochreflektierender (HR) Spiegel, abgeschieden mit Substratvorspannung in PEALD bei den Designwellenlängen (a) 355 nm und (b) 532 nm. Designs für beide Spiegel sind in gestrichelten Kurven dargestellt.

Reflectance spectra of high reflective (HR) mirrors deposited with substrate biasing in PEALD at design wavelengths (a) 355 nm and (b) 532 nm. Designs for both the mirrors is shown in dashed curves.



[1] Konforme Metall-Beschichtung von stark gekrümmten Spiegeln.  
Conformal metal coating of highly curved mirrors.

## Thermisch stabile Iridium ALD-Spiegel für Infrarot-Anwendungen / Thermally stable Iridium ALD mirrors for infrared applications

Metallische Beschichtungen sind wichtige funktionelle optische Schichten für Spiegel in zahlreichen optischen Komponenten und Systemen. Diese werden z. B. in der Spektroskopie, Sensorik, Astronomie und Beleuchtung verwendet. Aufgrund ihres hohen und breitbandigen Reflexionsvermögens im infraroten (IR) Spektralbereich kommen meist Spiegelschichten aus Silber (Ag) und Gold (Au) zum Einsatz. Allerdings müssen diese Metallspiegel mit aufwändigen Schutzschichten versehen werden, um die empfindliche Oberfläche vor Degradation zu schützen. Diese Schutzschichten mindern jedoch das Reflexionsvermögen der Metallspiegel im IR-Bereich aufgrund von Schwingungsbanden. Zudem ist die thermische Stabilität dieser Schichtsysteme limitiert. Das Fraunhofer IOF hat daher stabile Iridium (Ir)-Spiegelschichten ohne Schutzschichten entwickelt, welche hohen Temperaturen und Umwelteinflüssen widerstehen und gleichzeitig eine hohe Reflexion bieten [1].

Die Reflexion von ungeschütztem Iridium ist ab einer Wellenlänge von ca. 3  $\mu\text{m}$  nahezu gleich zum geschützten Silber und Gold (Abb. 3). Bei Silber und Gold wird das Reflexionsvermögen im IR-Spektralbereich durch Absorptionsbanden der dielektrischen Schutzschichten gemindert. Die stabilen Iridium-Spiegelschichten wurden mittels Atomlagenabscheidung (ALD) ohne zusätzliche Oxidschichten hergestellt. Diese Beschichtungsmethode beruht auf sequenziellen, selbstlimitierenden Oberflächenreaktionen und ermöglicht qualitativ hochwertige sowie

Metallische Beschichtungen sind wichtige funktionelle optische Schichten für Spiegel in zahlreichen optischen Komponenten und Systemen. Diese werden z. B. in der Spektroskopie, Sensorik, Astronomie und Beleuchtung verwendet. Aufgrund ihres hohen und breitbandigen Reflexionsvermögens im infraroten (IR) Spektralbereich kommen meist Spiegelschichten aus Silber (Ag) und Gold (Au) zum Einsatz. Allerdings müssen diese Metallspiegel mit aufwändigen Schutzschichten versehen werden, um die empfindliche Oberfläche vor Degradation zu schützen. Diese Schutzschichten mindern jedoch das Reflexionsvermögen der Metallspiegel im IR-Bereich aufgrund von Schwingungsbanden. Zudem ist die thermische Stabilität dieser Schichtsysteme limitiert. Das Fraunhofer IOF hat daher stabile Iridium (Ir)-Spiegelschichten ohne Schutzschichten entwickelt, welche hohen Temperaturen und Umwelteinflüssen widerstehen und gleichzeitig eine hohe Reflexion bieten [1]. Figure 3 illustrates that the reflectivity of unprotected iridium and protected silver and gold coatings is similar for wavelengths above 3  $\mu\text{m}$ . For iridium, a stable reflectivity of about 96 – 98 % is obtained in a wavelength range from 3 – 20  $\mu\text{m}$ . In contrast, the reflectivity in the IR range for silver and gold is reduced due to absorption bands of the dielectric protective layers. The stable iridium mirror coatings were deposited using atomic layer deposition (ALD). This deposition technique is based on sequential, self-limiting surface reactions, enabling high-quality and conformal iridium coatings on planar, highly curved, or micro-structured substrate materials. In order to verify their thermal stability, the mirror coatings were treated sequentially at 200 °C, 400 °C, and 600 °C under vacuum for





[2] Testproben zur Charakterisierung struktureller Eigenschaften und thermischer Stabilität.  
Test specimens for characterization of structural properties and thermal stability.

#### Authors

Paul Schmitt  
Adriana Szeghalmi

#### Contact

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

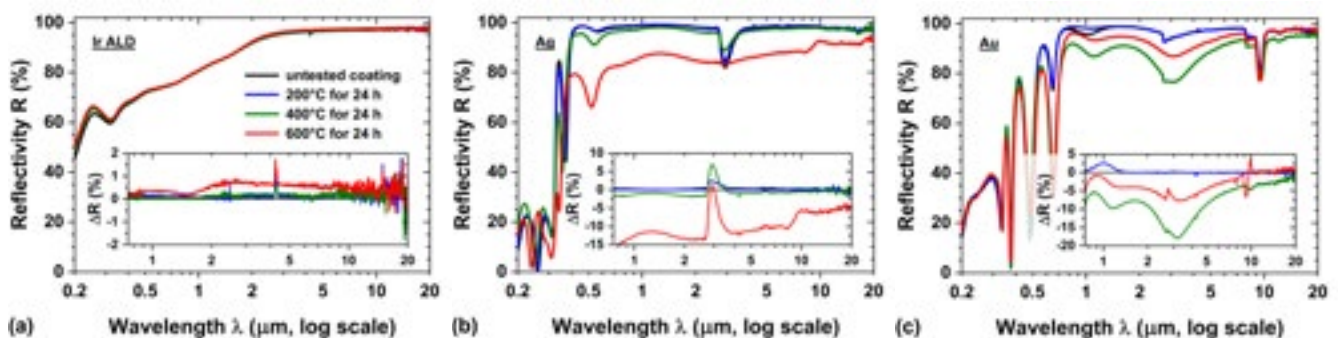
konforme Iridium-Dünnschichten auf planen, stark gekrümmten oder mikrostrukturierten Substratmaterialien.

Die thermische Stabilität der Spiegel wurde bis 600 °C untersucht. Während die Iridium ALD-Schichten bei 600 °C stabil sind, weisen die geschützten Silber- und Gold-Spiegelschichten bereits bei 400 °C signifikante Reflexionsverluste auf. Zusätzlich wurde deren Umweltbeständigkeit nach ISO 9211 3 untersucht: d. h. für Anwendungen von optischen Schichten bei normalen Umgebungsbedingungen im Freien und Reinigung ohne starken Abrieb und Kratzen. Die Iridium ALD-Spiegelschichten sind ebenfalls gegenüber Abrieb, Kälte, trockener Hitze, feuchter Hitze, langsamen Temperaturänderungen, Wasser und Lösungsmitteln stabil. Keine dieser Umwelteinflüsse führte zu Schichtdefekten oder signifikanten Reflexionsverlusten im IR-Bereich. Daher sind diese stabilen und hochreflektierenden Iridium ALD-Spiegelschichten eine vielversprechende Alternative zu den etablierten Metallspiegeln aus Silber oder Gold bei hohen Temperaturen oder Umwelteinflüssen im Freien.

24 h each. The iridium ALD coatings are stable up to 600 °C. In contrast, the protected silver and gold mirror coatings already exhibit significant reflectivity losses at 400 °C. In addition, their environmental stability with regard to the ISO 9211-3 norm was investigated, meaning for applications of optical coatings under normal outdoor ambient conditions and cleaning without severe abrasion and scratching. The iridium ALD mirror coatings are also stable against abrasion, cold, dry heat, damp heat, slow temperature changes, water, and solvents. None of these environmental influences resulted in coating defects or significant reflectance losses in the IR spectral range. Therefore, these stable and highly reflective iridium ALD coatings are a promising alternative to the established metal mirrors of silver or gold at high temperatures or outdoor ambient conditions.

#### References / Literatur

/1/ P. Schmitt et al.: Opt. Mater. Express 12, 545–559 (2022).



[3] Spiegelschichten Reflexionsspektren (a) Iridium, (b) ges. Silber und (c) ges. Gold nach Temperaturbehandlungen bis 600 °C.  
Reflectivity of mirror coatings of (a) iridium, (b) protected silver, and (c) protected gold after thermal treatments up to 600 °C.



[1] Deformierbarer Spiegel mit auswechselbarer Spiegeloptik.  
Deformable mirror with exchangeable optic.

## Deformierbare Spiegel mit exzellenten Streulichteigenschaften / Deformable mirrors with excellent scattering properties

Freiformoptiken sind unverzichtbar, wenn es um kompakte, lichtstarke und aberrationsfreie optische Systeme geht. Eine Herausforderung ist die Realisierung sehr guter Formeigenschaften in Kombination mit exzellenten Rauheits- und damit Streulichteigenschaften. Bei der Herstellung von High-End-Optiken fällt der Kompromiss in der Regel zu Gunsten der Oberflächenform aus, was zu sehr hohen Streulichtwerten im Vergleich zu konventionellen Optiken führt.

Ebene oder sphärische Oberflächen können hingegen auf extrem niedrige Rauigkeiten poliert werden /1/. Durch eine Verformung der Oberflächen können die hervorragenden Rauheits- und Streueigenschaften beibehalten und Freiformoberflächen erzeugt werden. Abbildung 1 zeigt solch einen deformierbaren Spiegel, der auf einem 6 mm dicken Quarzglassubstrat basiert und eine astigmatische Verformung mit einer Amplitude von 35  $\mu\text{m}$  erlaubt. Das mechanische Konzept ist so ausgelegt, dass der Spiegel ausgetauscht werden kann, falls dieser beschädigt wird oder seine Oberfläche degradiert. Im Vergleich zu konventionell hergestellten Freiformoberflächen ermöglicht die Verwendung aktiver Spiegel verschiedenste auf die Anwendung zugeschnittene Oberflächenformen /2/. Das opto-mechanische Design erlaubt dabei eine Langzeitstabilität über mehrere Wochen mit einer beugungsbegrenzten Abbildung.

Erstmals wurde ein solcher deformierbarer, streuungsarmer Spiegel in ein Scatterometer integriert, wodurch eine Reduzierung der Nahwinkelmessgrenze möglich wird. Abbildung 2 zeigt dies

Freeform optics are indispensable when it comes to compact, lightweight, and aberration-free optical systems. A challenge is the realization of exceptional form properties combined with excellent finishing and thus scattering properties. During the fabrication of high-end optics, the compromise is usually in favor of the surface shape, which leads to rather high scattering levels of freeform optics compared to conventional optics.

Plane or spherical surfaces, on the other hand, can be polished to extremely low surface roughness values /1/. Deforming such surfaces allows the excellent roughness and scattering properties to be preserved and a freeform surface shape to be achieved. This is illustrated in figure 1, which shows a deformable mirror that is based on a 6 mm thick fused silica substrate. The mirror enables astigmatic deformations with an amplitude of up to 35  $\mu\text{m}$ . The mechanical design also allows for easy replacement of the actual mirror if it should get degraded. Compared to conventionally machined freeform mirrors, the use of deformable or active mirrors enables different surface shapes for various applications to be realized /2/. Moreover, the opto-mechanical design ensures an excellent long-term stability over several weeks with a diffraction limited performance.

For the first time, such a deformable, low scattering mirror has been integrated into a scatterometer, which allows the reduction of the near angle measurement limit. This is illustrated



### Authors

Paul Böttner  
Matthias Goy  
Yusuf Sekman  
Marcus Trost

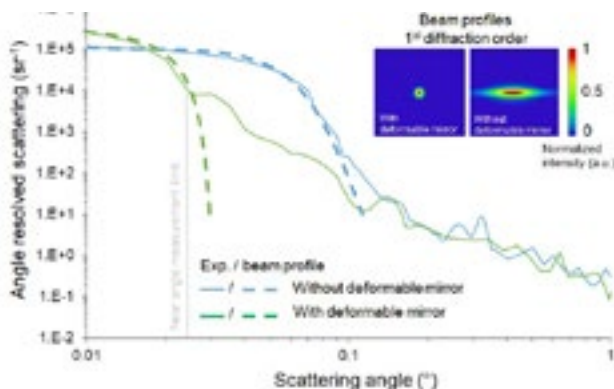
### Contact

Dr. Marcus Trost  
Phone +49 3641 807-242  
marcus.trost@iof.fraunhofer.de

anhand von winkelaufgelösten Streulichtmessungen an einem Gitter. Abhängig von der Beugungsordnung erzeugt das Gitter Abbildungsfehler, die zu einer Verbreiterung des Teststrahls führen. Dadurch sind Streulichtinformationen direkt neben den spekularen Strahlen, wie der Beugungsordnung, experimentell nicht zugänglich. Diese Aberrationen können jedoch durch deformierbare Spiegel kompensiert werden, wodurch Streulichtmessungen bei Streuwinkeln möglich werden, die bis vor kurzem noch unvorstellbar waren. So liegt die Nahwinkelgrenze für den gezeigten Anwendungsfall bei unter  $0.03^\circ$ . Die Aberrationskompensation mittels deformierbarer Spiegel lässt sich auch auf andere Gitter und gekrümmte Probengeometrien, wie Linsen oder Spiegel, übertragen. Diese experimentellen Streulichtdaten sind ein zentraler Eingangsparameter für nichtsequenzielle Ray-tracing-Algorithmen, um eine genaue Vorhersage von Streulicht und Geisterlicht in optischen Systemen zu ermöglichen.

in more detail in figure 2, which shows angle resolved light scattering measurements of a grating with and without a deformable mirror. Depending on the diffraction order, the grating introduces aberrations, which lead to a broadening of the test beam. Thus, light scattering next to the diffraction order becomes impossible to access. These aberrations can be compensated by the deformable mirror, allowing for extreme near angular light scattering measurements even below  $0.03^\circ$  to the diffraction order.

The same concept can also be applied to other gratings as well as curved sample geometries, such as lenses or mirrors, enabling direct light scattering measurements at scattering angles that were unimaginable until recently. This scattering data is an essential input parameter for non-sequential ray-tracing algorithms when it comes to accurate predictions of straylight and ghost light.



[2] Winkelaufgelöste Streulichtmessungen der ersten Beugungsordnung eines Transmissionsgitters mit und ohne deformierbaren Spiegel.

Light scattering measurements around first diffraction order of a transmissive grating with and without deformable mirror.

### References / Literatur

- /1/M. Trost et al.: Roughness characterization of EUV multilayer coatings and ultra-smooth surfaces by light scattering, Proc. SPIE 8501 (2012).
- /2/P. Böttner et al.: Design routine and characterisation of a biconic deformable metal mirror for focus shifting, Opt. Express 29, 2971–2983 (2021).



[1] Prisma mit Schwarzapertur und Entspiegelung innerhalb der Clear Aperture.  
Prism with black aperture and AR coating inside the clear aperture.

## Lateralstrukturierte AR- und Schwarzbeschichtungen Laterally structured AR and black absorber coatings

Streu- und Störlicht muss in Optikelementen unbedingt minimiert werden, da es die Funktion der Geräte beeinträchtigt. Schwarzaperturen, die das Licht außerhalb der Clear Aperture (CA) absorbieren, sind hierfür ein wirkungsvolles Mittel. Die Entwicklung und Herstellung derartiger Aperturbleden als direkt auf die optische Fläche eines Prismas aufgebracht und nachträglich strukturierte Interferenzbeschichtungen wurde am Fraunhofer IOF durchgeführt. Zusätzlich zu der Reflexunterdrückung im Bereich der Blende wurde innerhalb der CA eine Entspiegelungswirkung realisiert. Bedingt durch die geforderte Größen- und Positioniergenauigkeit der Blende ( $< 50 \mu\text{m}$ ), war ein Lithographieprozess für die Strukturierung notwendig.

Das AR-Coating wurde auf der Fläche der CA und dem Blendenbereich abgeschieden. Die Absorberbeschichtung wurde dann auf das AR-Coating abgeschieden und anschließend die CA bis zum AR-Coating freigelegt. Da die für die Absorberbeschichtung verwendeten Materialien in der Kombination nur sehr bedingt nasschemisch ätzbar sind, musste die CA durch einen Lift-off Prozess freigelegt werden.

Die optischen Anforderungen für die AR-Beschichtung ( $T > 97,5\%$ ) und die Absorberschicht ( $R < 4\%$  gegen Luft,  $R < 8\%$  gegen Glas) waren für hohe Lichteinfallswinkel (AOI  $50^\circ - 60^\circ$ ) und Wellenlängen in einem etwa  $100 \text{ nm}$  breiten Spektralbereich um  $1,6 \mu\text{m}$  spezifiziert. Für das Antireflex-Coating wurde hierfür ein Schichtdesign mit einer Kombination von zwei dielektrischen Materialien und Silizium entwickelt,

Scattered and stray light must be minimized in optical elements as it affects the function of such instruments. Black apertures, which absorb light outside the clear aperture (CA), are an effective tool for this purpose. The development and fabrication of such aperture diaphragms as interference coatings, directly deposited on the optical surface of a prism and subsequently patterned, was carried out at Fraunhofer IOF. In addition to the reflection suppression in the aperture area, an anti-reflection effect was to be realized within the CA. Due to the required size and positioning accuracy of the aperture ( $< 50 \mu\text{m}$ ), a lithography process was necessary for the structuring.

The AR coating was deposited on the surface of the CA and the aperture area. The absorber coating was then deposited on the AR coating and subsequently the CA was exposed up to the AR coating. Since the materials used for the absorber coating in combination can only be etched wet-chemically to a very limited extent, the CA had to be exposed by a lift-off process.

The optical requirements for the AR coating ( $T > 97.5\%$ ) and the absorber layer ( $R < 4\%$  against air,  $R < 8\%$  against glass) were specified for high angles of incidence (AOI  $50^\circ - 60^\circ$ ), and wavelengths in an approximately  $100 \text{ nm}$  wide spectral range around  $1.6 \mu\text{m}$ . For the anti-reflective coating, a layer design with a combination of two dielectric materials and silicon was developed, while the absorber coating consisted



### Authors

Peter Munzert  
Robert Leitel  
Stefan Schwinde

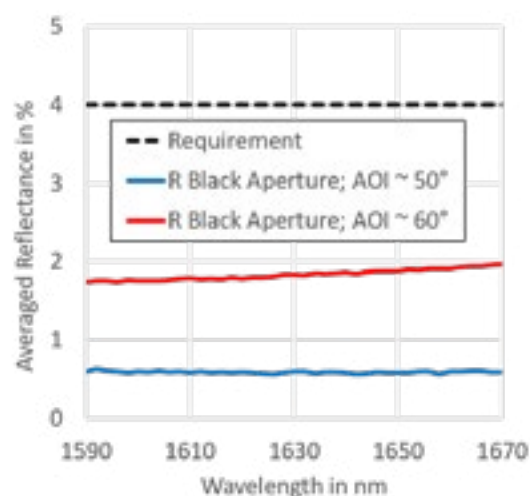
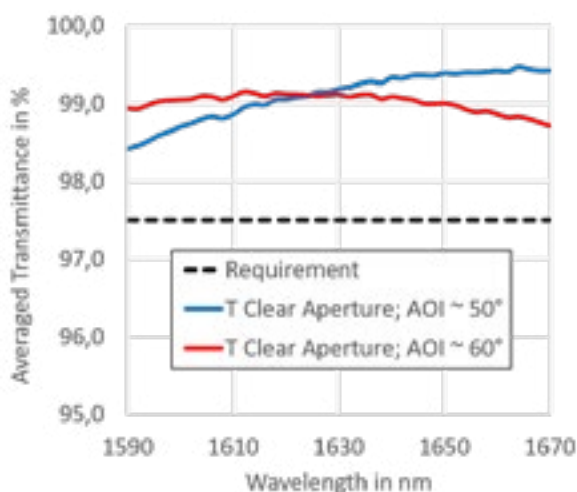
### Contact

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

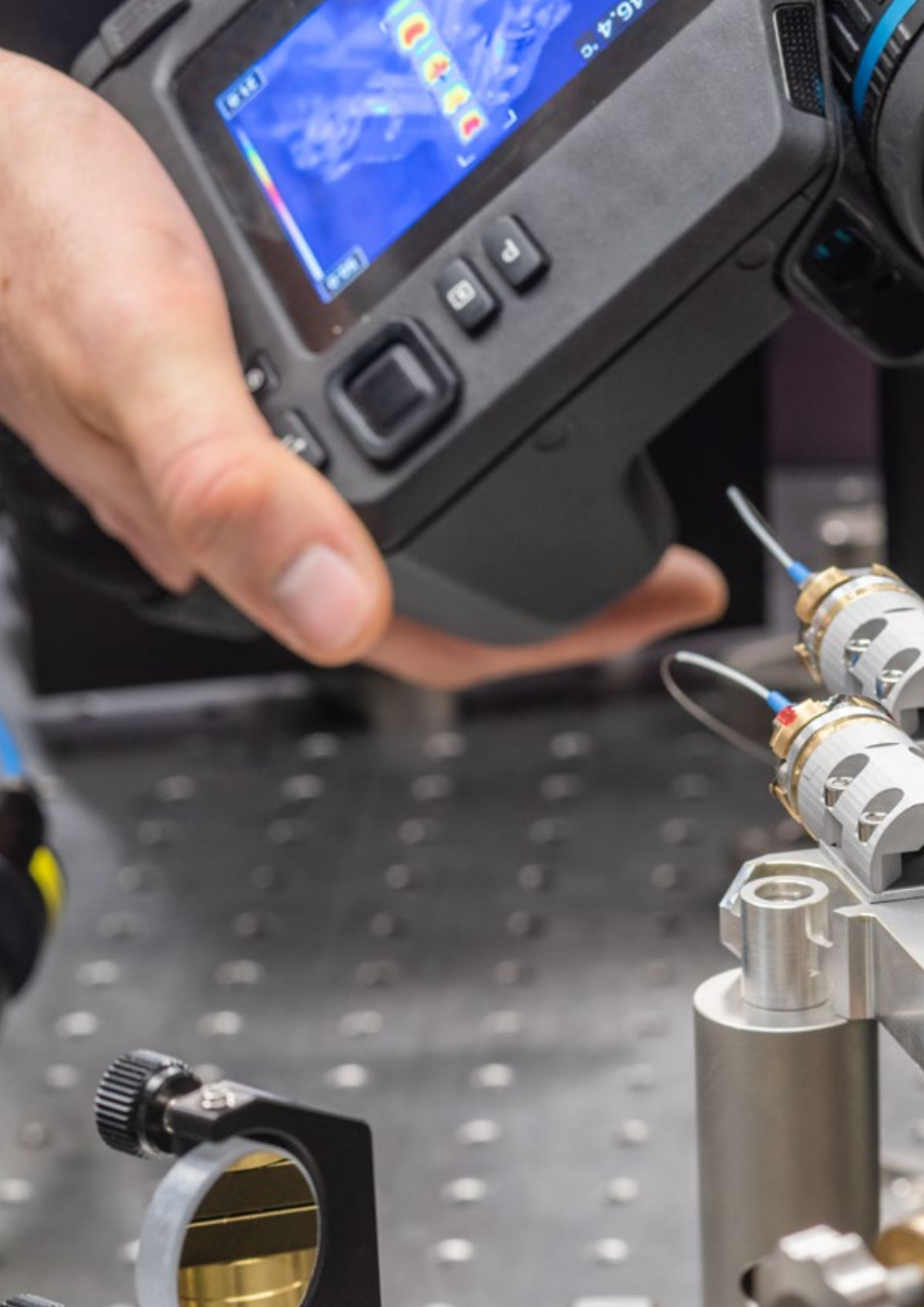
während die Absorber-Beschichtung aus verschiedenen Metallschichten, kombiniert mit einem dielektrischen Schichtmaterial, bestand. Die Reflexminderung bei dem Absorber-Coating basiert dabei auf einem Zusammenspiel von destruktiver Interferenz und interferenztechnisch verstärkter Absorption in dünnen Metallschichten. Aufgrund der erforderlichen Bi-Direktionalität der Absorberschicht (es musste die Reflexion sowohl auf der Luftseite als auch gegen Glas unterdrückt werden) war es notwendig, bei der Berechnung der Schichtabfolge für den Absorber auch die darunterliegende AR-Beschichtung zu berücksichtigen.

Derartig strukturierte Aperturblenden mit einer entspiegelten CA wurden entwickelt und bereits erfolgreich auf Prismenbauteilen abgeschieden.

of different metal layers combined with a dielectric layer material. The reflection suppression in the absorber coating is based on an interaction of destructive interference and interference-enhanced absorption in thin metal layers. Due to the required bi-directionality of the absorber layer (reflection had to be suppressed both on the air side and against glass) it was necessary to take the underlying AR coating into account when calculating the layer sequence for the absorber. Such structured aperture diaphragms with an anti-reflective CA were developed and have already been successfully deposited on prism components.



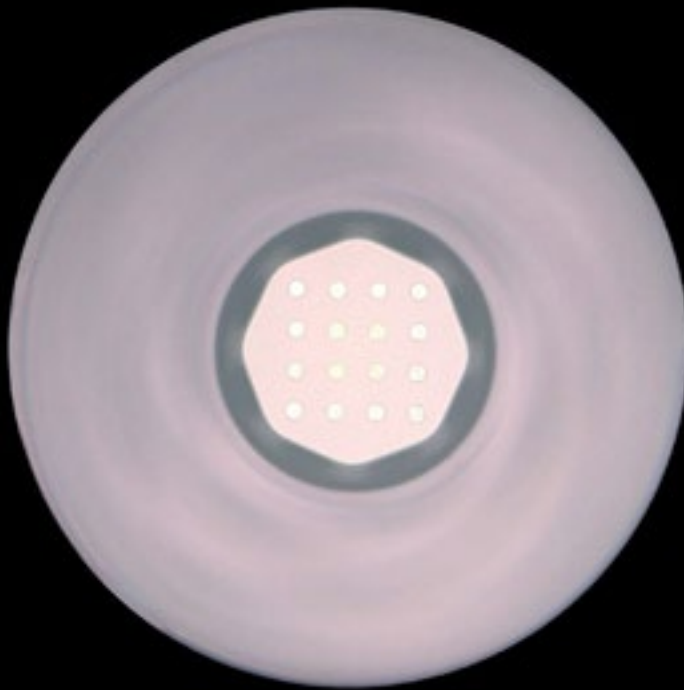
[2] Gemessene spektrale Transmission des AR-Coatings (links) sowie die gemessene Reflexion der Schwarzschrift gegen Luft (rechts).  
Measured spectral transmittance of the AR coating (left) and measured reflectance of the black absorber coating (right).





Laser- und Fasertechnologie  
Laser and Fiber Technology

---



[1] Rod-Type-Multikernfaser mit 16 Kernen für die Verstärkung und integrierter oktogonaler Führung für das optische Pumplicht. / Rod-type multicore fiber with 16 cores for amplification and integrated octagonal guidance for the optical pump light.

## kW-Klasse Multikern-Faserlasersystem kW-class multicore fiber laser system

Die Parallelisierung der Verstärkung von ultrakurzen Laserpulsen in optischen Fasern hat in den letzten Jahren zu einer deutlichen Erhöhung der Leistungsfähigkeit geführt. Dies hat die Anwendungsmöglichkeit solcher Systeme in Industrie und Forschung deutlich erweitert. Ein Schwerpunkt der aktuellen Forschung lag auf der Verringerung der Komplexität solcher Systeme. Grundsätzlich geht es hierbei darum, Duplizierungen von Komponenten pro Kanal zu vermeiden und anstelle dessen diese direkt als diskrete Multikanalkomponenten auszuführen.

Die wichtigste Komponente solcher Systeme stellen sogenannte Multikernfasern dar, die mehrere Verstärkerkanäle in einer einzigen Faser integrieren. Um eine mit mehreren Einzelkernfasern vergleichbare Leistungsfähigkeit zu erreichen, ist es wichtig fortschrittliche Faserdesignelemente auch hier zu integrieren. Diese beinhaltet u. a. die Auslegung der Faser in einer sogenannten Rod-Type-Geometrie und die ausschließliche Verwendung von Quarzglas als optisches Basismaterial. Es wurde eine solche Faser mit 4x4 Kernen und einer integrierten Führung für die Emission der Laserdiode zur Erzeugung der optischen Besetzungsinversion realisiert.

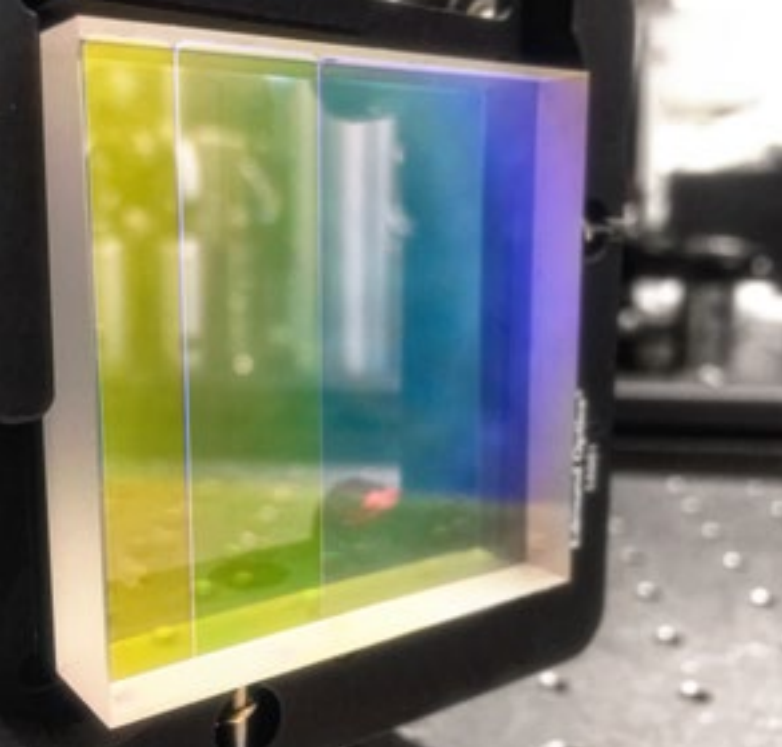
Diese Faser wurde in einem Aufbau für die Strahlteilung und -kombination eingebettet, welcher sogenannte segmented-mirror-splitter (SMS) verwendet. Um die Kombination der Ausgangsstrahlen der Faser in einem einzelnen Strahl zu ermöglichen, ist eine Kontrolle der Phasenlage der

The parallelization of amplification of ultrashort laser pulses in optical fiber has led to a drastic increase in their performance capabilities in recent years. This has extended the possible applications of such systems in industry and research. Recently, the focus has been on decreasing their complexity. In general, the aim is to reduce multiplication of components with the number of amplifier channels and instead directly realize them as discrete multi-channel components.

The most important components of such systems are so-called multicore fibers which integrate multiple amplification channels into a single fiber. To achieve competitive performance compared to multiple single-core fibers, the integration of advanced fiber design elements is of great importance. This includes the realization of the fiber in a rod-type geometry and the exclusive use of fused silica as the optical base material. A fiber with 4x4 cores and an integrated guidance mechanism for the emission of the optical pump diode that creates the optical inversion has been realized.

This fiber was embedded into a setup for beam splitting and combination that uses so-called segmented-mirror-splitter (SMS) elements. In order to achieve a coherent combination of the output beam, it is necessary to control the phases of each beam with a precision of well below the wavelength of light of 1  $\mu\text{m}$ . This is achieved by using a multi-channel phase stabilization system.





[2] SMS-Element für einen Strahlteilungs- oder Kombinationsaufbau. / SMS element for a beam splitting or combination setup.

#### Authors

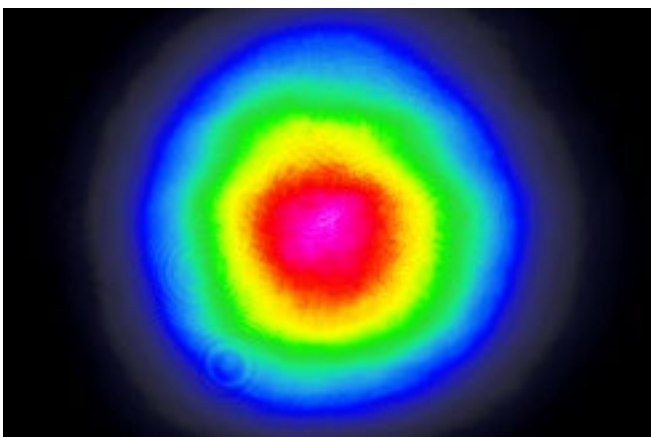
Arno Klenke  
Albrecht Steinkopff  
Johannes Nold  
Nicoletta Haarlammert  
Jens Limpert

#### Contact

Prof. Dr. Jens Limpert  
Phone: +49 3641 9-47811  
jens.limpert@uni-jena.de

einzelnen Strahlen mit einer Genauigkeit von deutlich unter der Wellenlänge des Lichtes von  $1\ \mu\text{m}$  erforderlich. Dies wird über eine Multikanalphasenstabilisierung erreicht.

Mit Hilfe dieses Verstärkerbaus wurde ein Lasersystem mit bis zu  $0,5\ \text{kW}$  Durchschnittsleistung aus einer einzelnen dieser Multikernfasern realisiert. Zusätzlich konnten Pulsenergien von bis zu  $600\ \mu\text{J}$  erreicht werden. Damit ist man in die Leistungsklasse heutiger, wesentlich größerer Lasersysteme vorgestoßen. Durch Weiterentwicklung dieser Technologie, vor allem durch Erhöhung der Kernanzahl in einer Faser, wird sich die Möglichkeit bieten, höchste Leistungsfähigkeit mit den Vorteilen der Fasertechnologie zu verknüpfen. Theoretische Betrachtungen konnten bereits zeigen, dass sich Durchschnittsleistungen von über  $10\ \text{kW}$  in Verbindung mit über  $100\ \text{mJ}$  Pulsenergie so realisieren lassen werden.



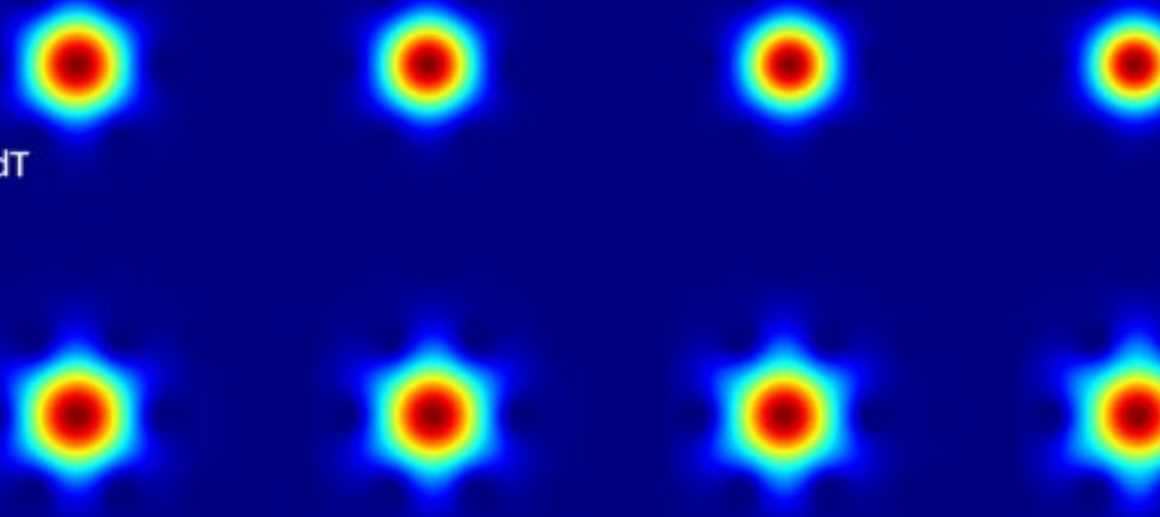
[3] Bild des kombinierten Ausgangsstrahls bei  $0,5\ \text{kW}$  Durchschnittsleistung. / Image of the combined output beam at  $0.5\ \text{kW}$  average power.

Using this amplifier setup, a laser system emitting up to  $0.5\ \text{kW}$  of average power from a single one of these multi-core fibers was realized. In addition, pulse energies of up to  $600\ \mu\text{J}$  were achieved. Performance characteristics of much larger laser systems have thus been reached. Further development of this technology, especially by increasing the number of cores in the fibers, will allow the combination of the highest laser performance with the advantages of fiber technology. Theoretical simulations have already demonstrated that average powers above  $10\ \text{kW}$  in combination with more than  $100\ \text{mJ}$  pulse energy will be achievable.

#### References / Literatur

/1/ A. Klenke et al.:  $500\ \text{W}$  rod-type  $4\times 4$  multi-core ultrafast fiber laser, submitted to Opt. Lett.

/2/ A. Steinkopff et al.: The impact of thermo-optical effects in coherently-combined multicore fiber amplifiers, Opt. Express 28, 38093–38105 (2020).



$\text{SiO}_2 \text{ dn/dT}$

Optimised  $\text{dn/dT}$

[1] Modenfläche einer optischen Faser im Laserbetrieb mit konventionellem (rot) und athermalem Design (blau). / Mode area of an optical fiber in laser operation with conventional (red) and athermal design (blue).

## Athermale laseraktive Fasern

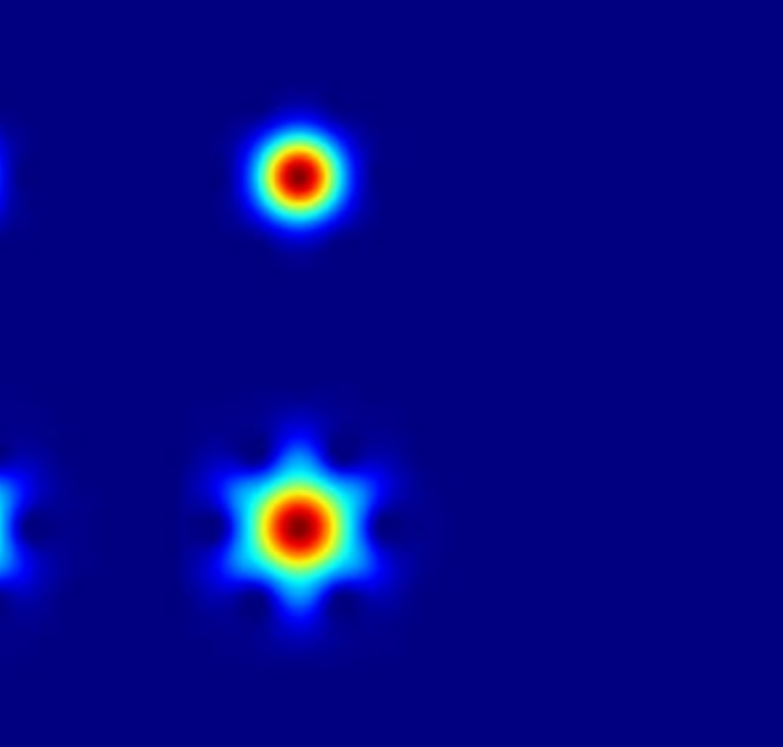
### Athermal laser-active fibers

Mit dem Laserprozess ist immer eine intrinsische Wärmeentwicklung verbunden. Bei allen Laserkonzepten führt diese intrinsische Wärmequelle durch Änderungen der Laserstrahlparameter zu Grenzen bei der Leistungsskalierung. Diesem Problem wird bisher durch Minimierung des Wärmeeintrags, Optimierung der Laserarchitektur zu thermisch robusten Designs, Optimierung der Wärmeanbindung und Kühlkonzepte sowie die Implementierung aktiver Stabilisierungen entgegengewirkt. Ytterbium-dotierte Faserlaser halten den Rekord für die höchste mittlere Laserleistung mit exzellenter Strahlqualität im Wellenlängenbereich von  $1 \mu\text{m}$ . Ursache für diese herausragenden Eigenschaften ist die Wellenleiterstruktur, die eine effiziente Verstärkung und ein ideales Wärmemanagement erlaubt. Dennoch ist eine Stagnation der maximal erreichten Leistung mit exzellenter Strahlqualität bei  $\sim 5 \text{ kW}$  schon seit mehr als zehn Jahren zu verzeichnen, obwohl der Markt nach weiter gesteigerten Leistungen verlangt.

Das Fraunhofer IOF hat eine Strategie entwickelt, athermale Laserfasern zu designen, deren relevante Laserstrahlparameter trotz intrinsischer Wärmequelle konstant bleiben. Ansatzpunkt dafür ist die Entwicklung von temperaturunempfindlichen Materialien: Durch die Reduzierung des thermo-optischen Koeffizienten ( $\text{dn/dT}$ ), z. B. durch Co-Dotierung mit Bor oder Phosphor, wird die temperaturabhängige Veränderung des Wellenleiters reduziert und so eine leistungsunabhängige Lichtführung realisiert. In Abbildung 1 ist zu sehen, wie sich die Grundmode der neu entwickelten athermalen Faser im

A laser process is always associated with intrinsic heat generation. In every laser process, the presence of this intrinsic heat source changes the laser parameters, leading to limitations in the output power scaling. This problem has been tackled thus far via reduction of the generated input heat, optimization of the laser architecture towards robust designs, optimization of the thermal coupling and cooling, and implementation of active stabilization of the laser itself. Ytterbium-doped fiber lasers hold the record for the highest average laser power with excellent beam quality in the wavelength range of  $1 \mu\text{m}$ . The reason for these outstanding properties is the waveguide structure of the laser gain medium, which allows efficient amplification and ideal thermal management. Nevertheless, the output power has stagnated for the last ten years to approximately  $5 \text{ kW}$  with excellent beam quality despite market demand for higher powers.

The Fraunhofer IOF has developed a strategy to design athermal fiber designs whose relevant laser parameters remain unchanged despite the intrinsic heat source. The starting point consists of the development of temperature-insensitive materials: by reducing the thermo-optical coefficient ( $\text{dn/dT}$ ), for instance via co-doping with boron or phosphorus, the temperature-dependent change of the waveguide is reduced and thus a power-independent light guiding is achieved. Figure 1 shows the behavior of the fundamental mode of the novel developed fiber in comparison to a standard fiber in laser operation. While the mode area of the conventional fiber is



### Authors

Gonzalo Palma-Vega  
 Stefan Kuhn  
 Johannes Nold  
 Nicoletta Haarlammert  
 Thomas Schreiber

### Contact

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

Vergleich zu einer konventionellen Faser im Laserbetrieb verhält. Während die Modenfläche der konventionellen Faser sich bei zunehmender Wärmelast durch den Laserbetrieb immer weiter reduziert, bleibt diese bei der athermalen Faser auch bei hohen Ausgangsleistungen nahezu konstant. Eine Reduzierung der Modenfeldfläche erhöht die Licht-Material-Wechselwirkung, wodurch sich Grenzen für die Leistungskalierung ergeben. Ein weiterer wichtiger Parameter zur Realisierung exzellenter Strahlqualitäten ist die Unterdrückung weiterer Fasermoden. Dies gelingt durch minimale Überlappung dieser Moden mit dem Verstärkungsbereich, sodass nur die Grundmode effizient verstärkt wird. Die diesbezüglichen Vorteile des athermalen Designs im Vergleich zum konventionellen Design sind in Abbildung 2 illustriert.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Entwicklung der Faserdesigns ist die Möglichkeit der Realisierung. Die neuartigen Designs beruhen ausschließlich auf einer Dotierungsmodifikation des Faserkerns und sind so durch die am Fraunhofer IOF etablierten Technologien realisierbar. Die Strategie lässt sich universal auf eine Vielzahl von Laserfasern anwenden.

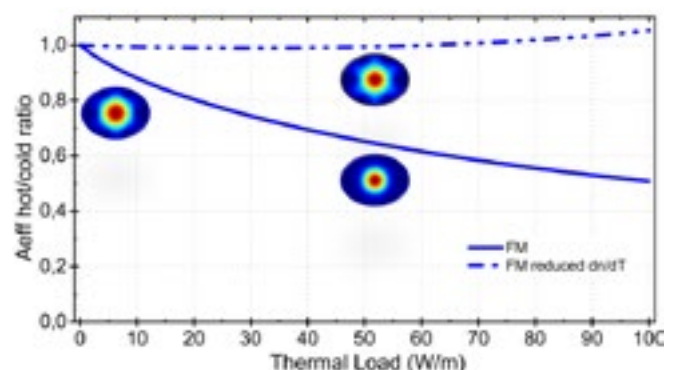
Die neu entwickelten athermalen Faserdesigns eröffnen einen Weg zur weiteren Leistungskalierung hin zu neuen Rekordleistungen.

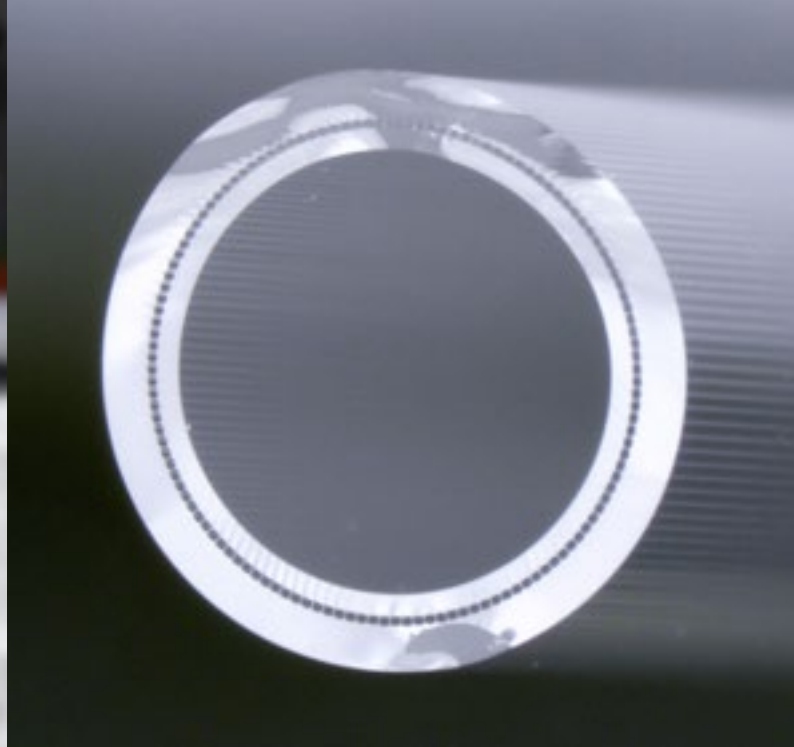
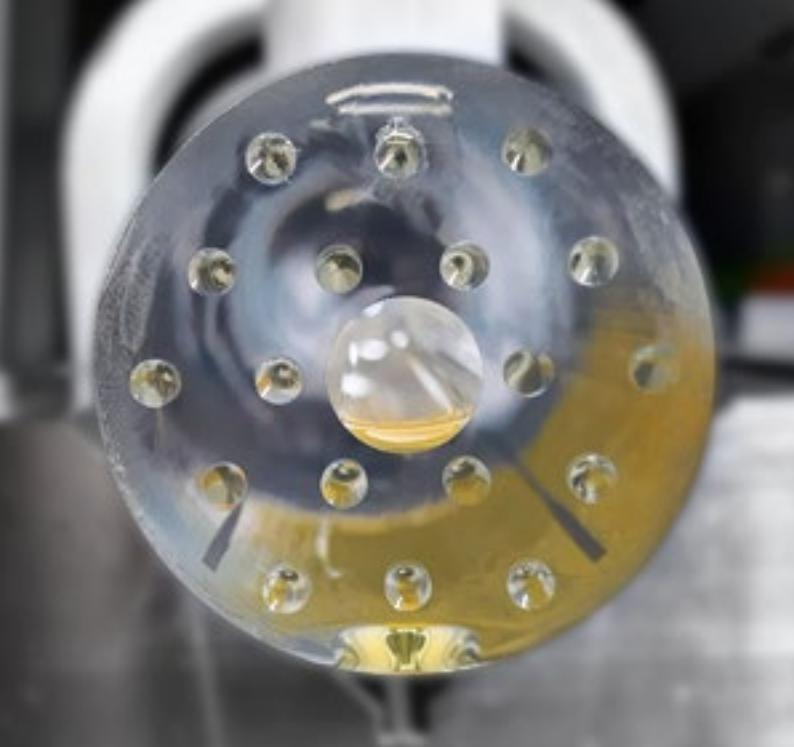
[2] Überlappung von Moden höher Ordnung im Laserbetrieb mit konventionellem (rot) und athermale Design (blau).  
 Overlap of high order modes with conventional (red) and athermal design (blue).

reduced with increasing heat load, the athermal fiber mode area remains unchanged. A reduction of the mode area increases the light-matter interaction, imposing limits in the power scaling. Another important parameter for designing fibers with excellent beam quality is the suppression of additional fiber modes. This is achieved by reducing the overlap of such modes with the doped core, so that only the fundamental mode is amplified. The benefit of using an athermal fiber with this goal is illustrated in figure 2.

A key aspect for the development of the fiber designs is the feasibility of its manufacturing. The new designs are solely based on the modification of the doping core concentration, which is achievable using standard technologies established at Fraunhofer IOF. This strategy can be universally applied to a wide range of fibers for laser applications.

The newly developed athermal fiber designs pave the way for further power scaling towards new record performances.





[1] Links: Quarzglasstab mit gebohrten Löchern; Mitte: Airclad-Canes aus zwei Quarzglasrohren, durch 100 Stege verbunden; Rechts: Mikroskopaufnahme Faser mit aktiv dotiertem Kern. / Left: Rod with drilled holes; center: air-clad cane consisting of two tubes connected by 100 struts; right: microscope image of rod-type fiber with active doped core.

## Vereinfachte Herstellungstechnologie für Spezialfasern Simplified manufacturing technology for specialty fibers

Glasfasern sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Ihr größtes Anwendungsfeld heutzutage ist die Datenübertragung. Hierfür wurde in den letzten Jahrzehnten viel Entwicklung betrieben, um relevante Fasereigenschaften wie geringe Dämpfung und Dispersion zu perfektionieren. Aufgrund ihres vielfältigen Funktionalitätspotenzials spielt die Glasfaser für immer mehr Anwendungsgebiete eine wichtige Rolle: u. a. in der Sensorik, für Überwachungssysteme, in der medizinischen Bildgebung, als aktive Faser in Lasern, in der Quantenbildgebung und in der Quantenkommunikation. All diese Anwendungen erfordern Fasern mit speziell designten Eigenschaften bzgl. ihrer Dispersion, nichtlinearen Eigenschaften, Verluste in speziellen Wellenlängenfenstern, Polarisierungseigenschaften sowie exzellenter Strahlqualität insbesondere in Großkernfasern. Das Strukturieren von Fasern, z. B. durch Kombination verschiedener Materialien oder Einbringen von Luftlochstrukturen, erweitert die Designfreiheiten und erhöht die Vielfältigkeit für Funktionalitäten. Ein bei führenden Faserherstellern etabliertes Verfahren zur Herstellung strukturierter Fasern ist der manuelle Aufbau einer makroskopischen strukturierten Faservorform aus Glasstäben und Glaskapillaren. Diese Vorform wird anschließend in einem Faserziehprozess verschmolzen und auf die Faserdimensionen verjüngt. Neben diesem manuellen additiven Herstellungsverfahren wurde am Fraunhofer IOF ein weiteres automatisches subtraktives Herstellungsverfahren weiterentwickelt. Dieses subtraktive Verfahren basiert auf einem Tieflochbohrprozess in Glassubstrate. Im

Optical fibers are used as the backbones of our modern everyday life as nowadays their largest area of application is data transmission. In order to reach this point, significant research and development has been devoted in recent decades to optimizing their properties, such as attenuation and dispersion. Due to their manifold potential, optical fibers are becoming an important player in many areas of applications, for example sensor technology, monitoring systems, medicine, active medium for lasers, quantum imaging, and quantum communication. Each of these requires fibers with specially designed properties, e.g., dispersion, nonlinearity, attenuation in selected transmission windows, polarization, and beam quality, especially for very large mode area fibers. Structuring the cladding of optical fibers, either by incorporation of air holes or other materials, extends the possibilities of engineering dedicated fibers, thus enhancing their field of use by enabling new functionalities. In the past, leading manufacturers and research institutes established the manual stacking process for the creation of macroscopic structured preforms, which relies on placing rods and capillaries in a stack, and jacketing this with another tube. This entire assembly is then fused and drawn to fiber dimensions. Besides this manual additive procedure, a subtractive manufacturing process for structured preforms was developed at Fraunhofer IOF. This process is based on deep hole drilling in fused silica. Last year, this approach was integrated into the process chain for the manufacturing of specialty fibers, therefore increasing the possibilities for



#### Authors

Johannes Nold  
Christian Hupel  
Stefan Kuhn  
Nicoletta Haarlammert  
Thomas Schreiber

#### Contact

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

letzten Jahr ist es gelungen, den Tieflochbohrprozess in die Prozesskette der Spezialfaserherstellung am Fraunhofer IOF zu etablieren. Die Qualität dieses Prozesses wurde an verschiedenen Fasern, wie Mehrkernfasern und Großkernfasern, erfolgreich demonstriert.

Das Tieflochbohren bietet für einige Faserstrukturen ein vereinfachtes, Defekt reduziertes, effizientes Herstellungsverfahren. Darüber hinaus ist in Abbildung 1 (rechtes Bild) am Beispiel einer Großkernfaser mit pentagonaler Luftlochstruktur (LPF) und einem äußeren AirCladding dargestellt, dass beide Herstellungsverfahren (additiv und subtraktiv) in einer Faser kombinierbar sind. In diesem Beispiel wurde die pentagonale Struktur subtraktiv mittels Tieflochbohren realisiert (Abb. 1, links). Die filigrane Struktur des AirCladdings wurde durch additives Zusammenfügen eines Rings aus Kapillaren hergestellt (Abb. 1, Mitte). Dieses Beispiel demonstriert, wie durch die Erweiterung der Technologie um den Tieflochbohrprozess in Faservorformen in Kombination mit dem traditionellen Stacken die Vorteile beider Verfahren kombiniert werden können. Das Stacken bietet sich insbesondere zur Realisierung filigraner Strukturen und zur Homogenisierung von Materialien an. Das Tieflochbohren besticht neben der Automatisierung des Prozesses, was den Prozess effizient und volumentauglich macht, zusätzlich durch flexible Designrealisierungen durch große Freiheit bei der Anordnung der Strukturen, hohe Positionsgenauigkeit und reduzierte Oberflächen, was das Risiko für Defekte reduziert.

structured, and thus tailored, fibers. The high quality of the subtractive manufacturing process was successfully demonstrated by realizing different types of fibers, e.g., multicore and large mode area fibers.

Deep hole drilling in fused silica offers a simplified, defect reduced, and economically efficient manufacturing process for many fiber structures. Moreover, as depicted in figure 1 (right image), the additive and subtractive processes can be combined to yield the final fiber structure. Here, the pentagonal hole structure within the cladding was manufactured using the deep hole drilling process (Fig. 1, left image), whereas the filigree air-clad, which is used as a pump guiding structure, was built by additively stacking thin walled capillaries (Fig. 1, center image). This example demonstrates how the successful integration of deep hole drilling into the process chain enables new types of fibers by using the advantages of either technology. Stacking is the choice for realizing filigree structures and homogenization of materials, whereas deep hole drilling allows for automation, rendering this the cost-efficient alternative for high volume production. In addition, the fiber design flexibility is enlarged, as the structured pattern does not need to be on a regular grid, positioning accuracy of cores is enhanced, and surfaces are heavily reduced, lowering the risk for defects.



[1] Faserlaser für Wind-LIDAR. / Fiber laser for wind LIDAR.

## Faserlaser für Wind-LIDAR Fiber laser for wind LIDAR

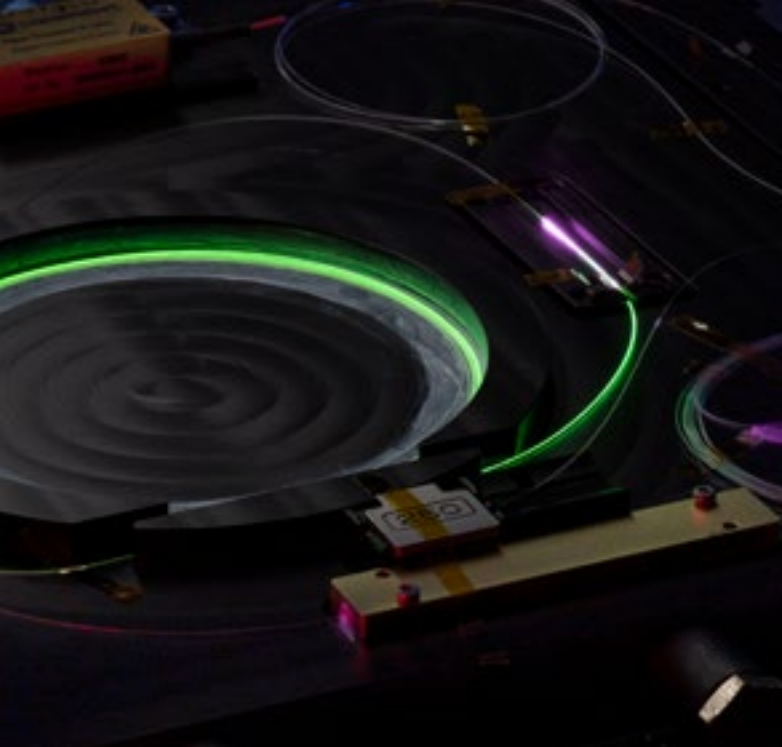
In der Windenergiebranche erlangt die lastenreduzierende Regelstrategie, insbesondere mit wachsender Anlagengröße, eine zunehmende Bedeutung. Einfallende Windböen stellen hohe mechanische Belastungsspitzen für die Rotorblätter und den Antriebsstrang dar und können zum vorzeitigen Ausfall der Anlage führen. Um diese Effekte zu minimieren, entwickelt das Fraunhofer IOF gemeinsam mit dem Fraunhofer IWES und der Hochschule Bremerhaven ein laserbasiertes Messsystem, um eine prädiktive Regelung der Windenergieanlage (WEA) zu ermöglichen. Hierzu ist es notwendig, die Windgeschwindigkeit und vor allem deren Änderung vor der Anlage zu erfassen, um im Fall einer Windböe den Anstellwinkel der Rotorblätter zu ändern und somit die Last beim Einfall der Böe auf die Anlage kurzzeitig zu reduzieren.

Das Fraunhofer IOF konzentriert sich innerhalb des Projekts iBOW (BMW, FKZ 0324340B) auf ein kosteneffizientes alternatives laserbasiertes Windmesssystem verglichen mit am Markt etablierten Doppler-Lidar-Systemen. Hierzu wird eine Laserquelle mit maßgeschneiderter Kohärenz, eine präzise ausgelegte Verzögerungsstrecke sowie ein Verstärkermodul entwickelt und in Kooperation mit den Verbundpartnern getestet. Ausgehend von dem etablierten frequenzmodulierten LIDAR-Messverfahren wird ein kleiner Teil der kohärenten Laserquelle abgekoppelt und über eine Glasfaser zeitlich verzögert. Diese Verzögerung entspricht dabei der Laufzeit des Lichts für die doppelte zu messende Strecke und legt somit die Entfernung des zu vermessenden Raumsegmentes fest. Ein von den in der

In the wind energy industry, the load-reducing control strategy is becoming increasingly important, especially with growing turbine size. Incoming wind gusts represent high mechanical load peaks for the rotor blades and the drive system and can lead to premature failure of the turbine. To minimize these effects, Fraunhofer IOF, together with Fraunhofer IWES and Bremerhaven University of Applied Sciences, is developing a laser-based measurement system to enable predictive control of the wind turbine (WT). For this purpose, it is necessary to record the wind speed and especially its change in front of the turbine in order to change the angle of attack of the rotor blades in case of a gust of wind and thus reduce the load on the turbine for a short time.

Within the project iBOW (BMW, FKZ 0324340B), Fraunhofer IOF focuses on a cost-efficient alternative laser-based wind measurement system compared to established Doppler LIDAR systems on the market. For this purpose, a laser source with tailored coherence, a precisely designed delay line as well as an amplifier module will be developed and tested in cooperation with the association partners.

Based on the established frequency-modulated LIDAR measurement method, a small part of the coherent laser source is decoupled and delayed in time via an optical fiber. This delay corresponds to the propagation time of the light for twice the distance to be measured and thus determines the distance of the space segment to be measured. A portion



### Authors

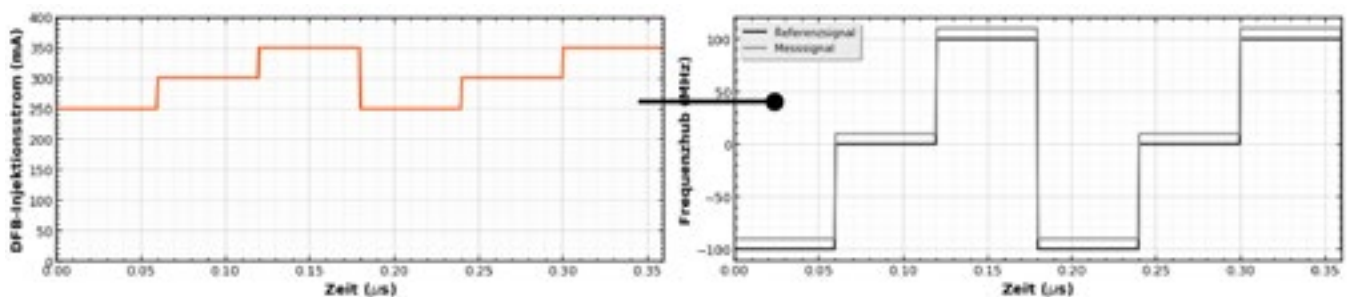
Matthias Heinzig  
Oliver DeVries  
Till Walbaum  
Thomas Schreiber

### Contact

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

Luft enthaltenen Aerosolen rückgestreuter Anteil des Lichtes wird wieder aufgesammelt und mit dem verzögerten Signal zur Interferenz gebracht. Das hieraus entstehende Schwebungssignal wird vermessen und gibt Rückschluss auf die wind-induzierte Dopplerverschiebung. Wird die laterale Ausdehnung des Raumsegmentes maßgeblich durch die Abbildungsoptik festgelegt, bestimmt die Kohärenz des Signals dessen longitudinale Ausdehnung. Kernaufgabe dieses Projektes ist es, diese Kohärenzlänge des ausgesendeten Strahls gezielt festzulegen. Hierzu wird die Laserquelle mit einem maßgeschneiderten Stromsignal angesteuert, wodurch sich ihre Emissionsfrequenz treppenförmig modulieren lässt (Abb. 2). Ein an dem gesamten Strahlweg rückgestreutes Signal weist in der Deduktion einen auf dem Dopplereffekt basierenden geringen Frequenzhub auf. Dieser leichte Frequenzunterschied führt zu einem messbaren niederfrequenten Schwebungssignal und gibt somit Rückschluss auf die Aerosol- bzw. Windgeschwindigkeit. Absolute Genauigkeiten dieser Geschwindigkeiten, Richtungen sowie räumliche Auflösung sind allerdings nicht erforderlich und führen auf ein kompaktes kostengünstiges Systemkonzept.

of the light backscattered by the aerosols contained in the air is collected again and brought to interference with the delayed signal. The resulting beat signal is measured and provides an indication of the wind-induced Doppler shift. If the lateral extent of the spatial segment is determined mainly by the imaging optics, the coherence of the signal determines its longitudinal extent. The core task of this project is to determine the coherence length of the emitted beam. For this purpose, the laser source is controlled with a tailored current signal, which allows its emission frequency to be modulated in a staircase fashion (Fig. 2). A signal backscattered along the entire beam path exhibits a small frequency deviation in the deduction based on the Doppler effect. This slight frequency difference leads to a measurable low-frequency beat signal and therefore provides information on the aerosol or wind velocity. However, absolute accuracies of these velocities, directions, and spatial resolution are not required and lead to a compact low-cost system concept.



[2] Strommodulation zur Frequenzmodulation und schematische Darstellung von Referenz- und Messsignal bei gegebener Dopplerverschiebung durch windinduzierte Rückstreuung. | Current modulation for frequency modulation and schematic representation of reference and measurement signal at given Doppler shift due to wind-induced backscatter.



[1] Spiegelkompressor welcher bei höchsten Durchschnittsleistungen betrieben wird.  
Chirped mirror compressor operating at highest demonstrated average powers.

## 10 mW kohärente XUV-Quelle bei 1 MHz Repetitionsrate 10 mW coherent XUV source at 1 MHz repetition rate

Die Erzeugung hoher Harmonischer (engl. High Harmonic Generation, HHG) und deren Anwendungen werden seit mehr als drei Jahrzehnten untersucht. Dies ermöglicht kompakte extreme UV (XUV) Anwendungen in unterschiedlichsten Wissenschaftsfeldern wie Physik, Biologie und Chemie /1/. Nahezu alle diese Anwendungen würden von einem höheren Photonfluss profitieren, was sich z. B. in einer kürzeren Messzeit und besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnissen äußert.

Im Prinzip kann die Effizienz des HHG-Prozesses maximiert werden, indem möglichst kurze Pulse und kleine Wellenlängen genutzt werden. Dies erlaubt es den HHG-Prozess mit höheren Intensitäten zu treiben und maximiert die Rekombinationswahrscheinlichkeit des lasergetriebenen Elektrons, was die XUV-Emission verursacht /1/. Eine weitere Steigerung des XUV-Photonenflusses kann durch die Erhöhung der fundamentalen Durchschnittsleistung erreicht werden. Die Kombination von ultrakurzer Pulsdauer, kleiner Wellenlänge und hoher Durchschnittsleistung stellt Herausforderungen an die Laserarchitektur dar, welche bisher noch nicht demonstriert wurden.

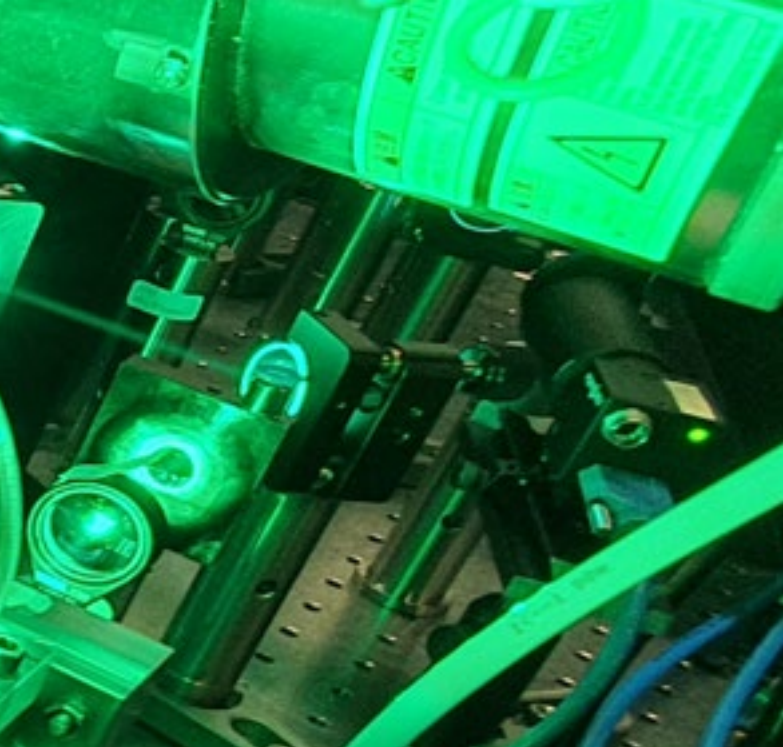
Diese Herausforderungen können gemeistert werden, indem ein nachkomprimierter und frequenzverdoppelter Femtosekunden-Yb-Faserlaser genutzt wird. Dies liefert die einzigartige Kombination aus kleiner Wellenlänge (515 nm) und ultrakurzer Pulsdauer (18.6 fs) bei einer Rekorddurchschnittsleistung von 51 W /2/, was einer Steigerung von einem Faktor fünf verglichen mit anderen Systemen entspricht /3/. Die ersten beiden

High harmonic generation (HHG) and its applications have been studied for more than three decades, enabling table-top extreme-ultraviolet (XUV) applications in fields as diverse as physics, biology, and chemistry /1/. Nearly all of these applications would benefit from a higher XUV average power to decrease measurement times and increase signal to noise ratios, for example.

In principle, the efficiency of the HHG process is maximized by using a driving laser with very short pulse duration and small wavelength. This allows the driving of the phase-matched HHG process with higher intensities and maximizes the recombination probability of the laser-driven electron, which causes the XUV emission /1/. An up-scaling of the XUV average power can be achieved by e.g., increasing the average power of the driving laser. The combination of ultra-short pulse duration, short wavelength, and high average power poses challenges to the driving laser architecture and has not yet been demonstrated.

These challenges can, however, be met by a frequency doubled and post compressed femtosecond Yb-fiber laser system, which has been developed for this purpose. The laser delivers a unique combination of short wavelength (515 nm) and short pulse duration (18.6 fs) at a record-high average power of 51 W /2/, surpassing previous demonstrations by a factor of five /3/. The first two parameters are responsible for an exceptionally high HHG conversion efficiency of  $2.5 \times 10^{-4}$ ,





### Authors

Robert Klas  
Jan Rothhardt  
Jens Limpert

### Contact

Prof. Dr. Jens Limpert  
Phone: +49 3641 9-47811  
jens.limpert@uni-jena.de

Parameter sind verantwortlich für eine extrem hohe HHG-Konversionseffizienz von  $2,5 \times 10^{-4}$  [2], was zu den höchsten jemals demonstrierten Werten gehört. Des Weiteren treibt die hohe Durchschnittsleistung des fundamentalen Lasers den XUV-Photonenfluss zu bisher unerreichten Werten von  $3 \times 10^{15}$  ph/s (13 mW) bei einer Photonenenergie von 26,5 eV [2], eine Größenordnung höher als vorherige Demonstrationen (Abb. 2).

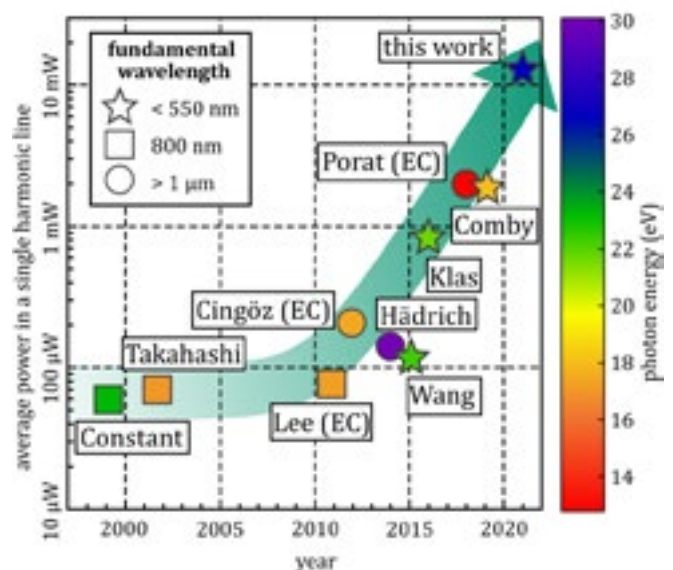
Zusammenfassend wurde eine neue Klasse von kohärenten XUV-Laserquellen gezeigt. Diese kompakte Quelle, welche auf einen optischen Tisch passt, öffnet die Tür zu neuartigen Photonen-hungrigen Anwendungen im XUV, wie z. B. kohärente Bildgebung, XUV-Ablation und XUV-Pump XUV-Probe Experimente.

### Literatur / References

- /1/ Z. Chang, Fundamentals of Attosecond Optics (2016).
- /2/ R. Klas et al., PhotonIX 2, 4 (2021).
- /3/ D. Descamps et al., Opt. Lett. 46, 1804 (2021).

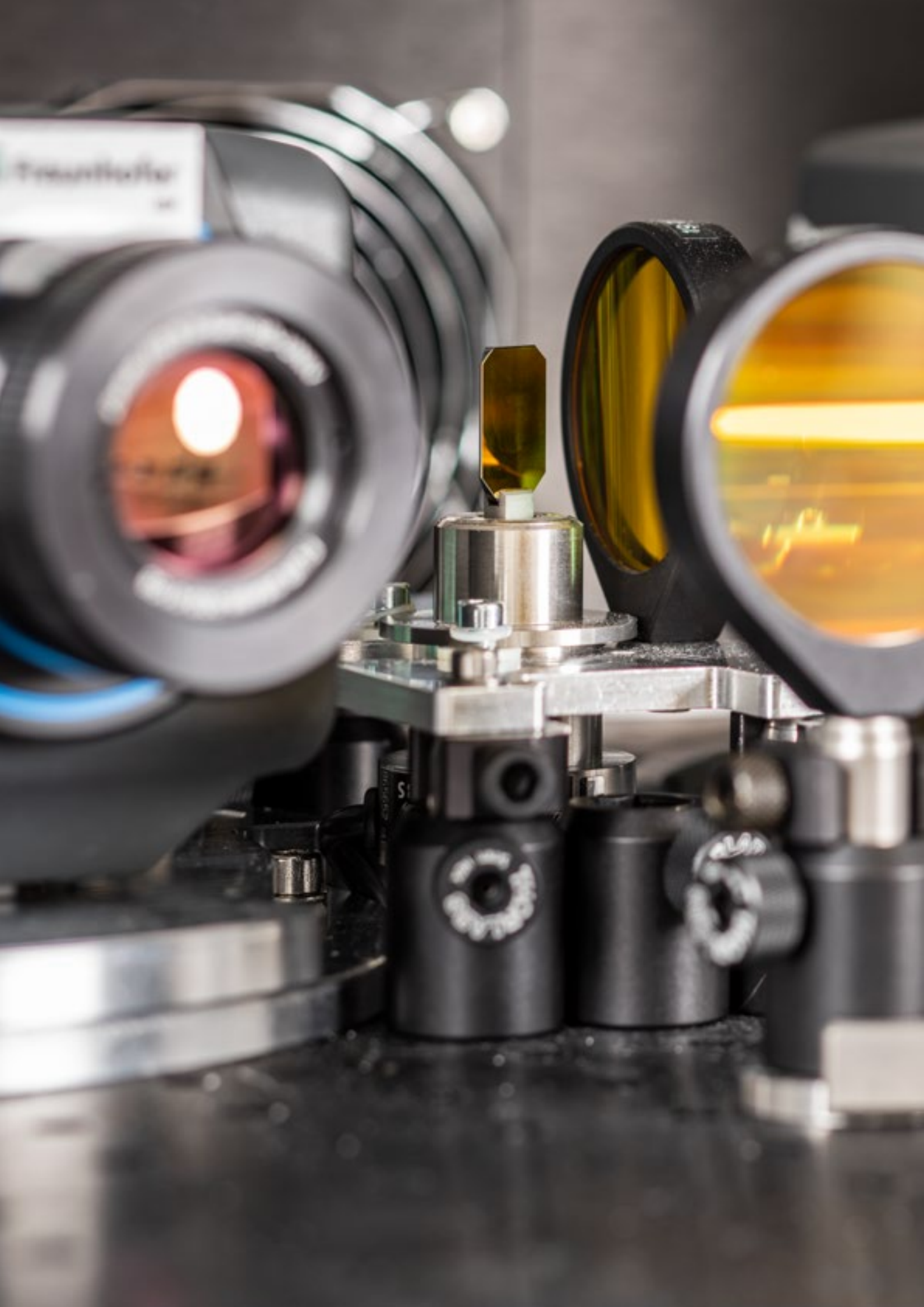
which is among the highest demonstrated [2]. Furthermore, the high average power boosts the available photon flux to unprecedented levels, resulting in  $3 \times 10^{15}$  ph/s (13 mW) in a single harmonic line at 26.5 eV [2]. This power level is an order of magnitude higher than the state-of-the-art (Fig. 2).

In conclusion, a new class of XUV light source has been demonstrated. This compact source, which fits on an optical table, opens up new opportunities in the growing field of photon hungry applications in the XUV, such as coherent diffractive imaging, ablation, and pump-probe experiments.



[2] Entwicklung modernster HHG-Quellen über eine Zeitspanne von 1999 bis heute.

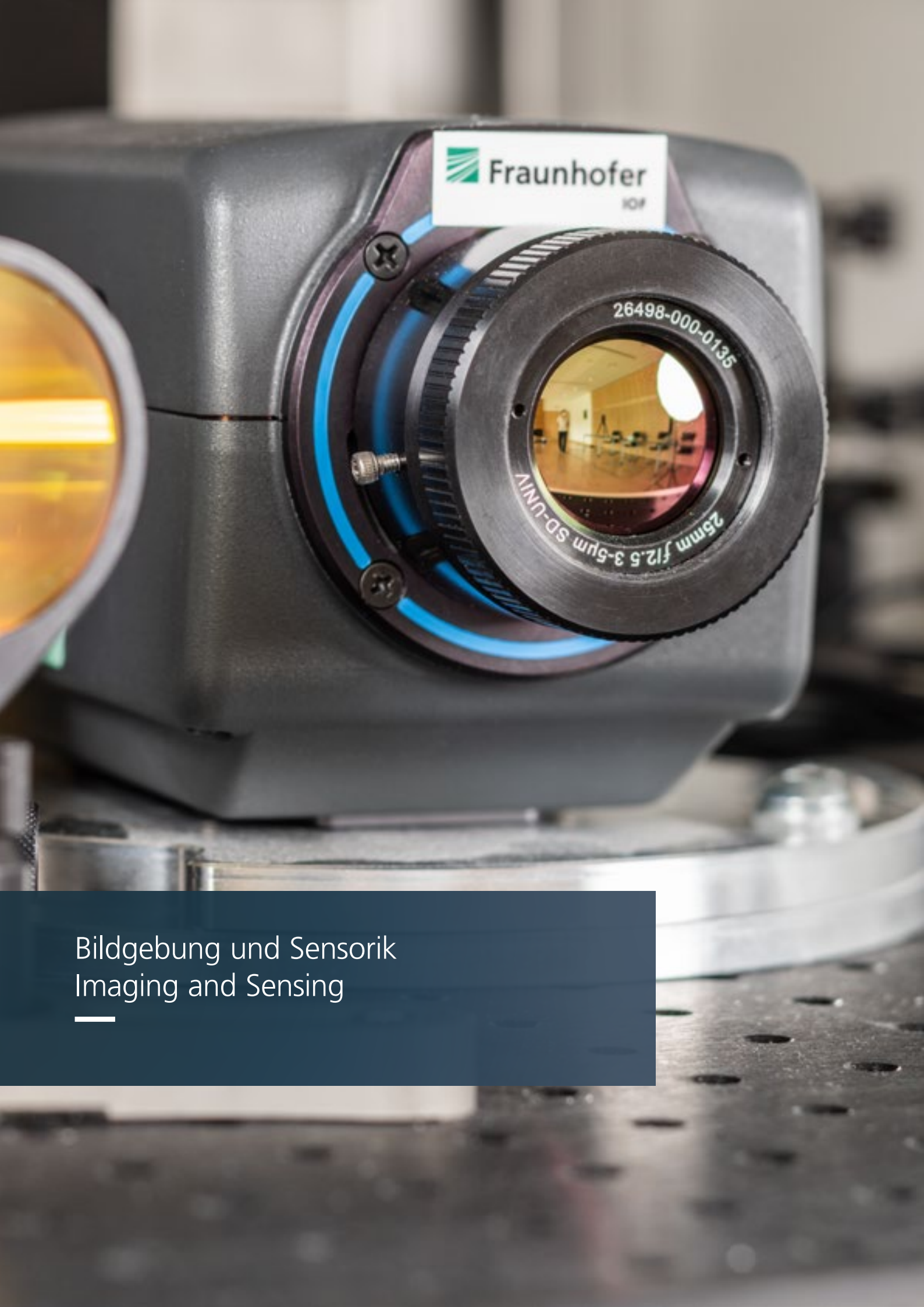
State-of-the-art HHG sources from 1999 to today.



Trenthofer

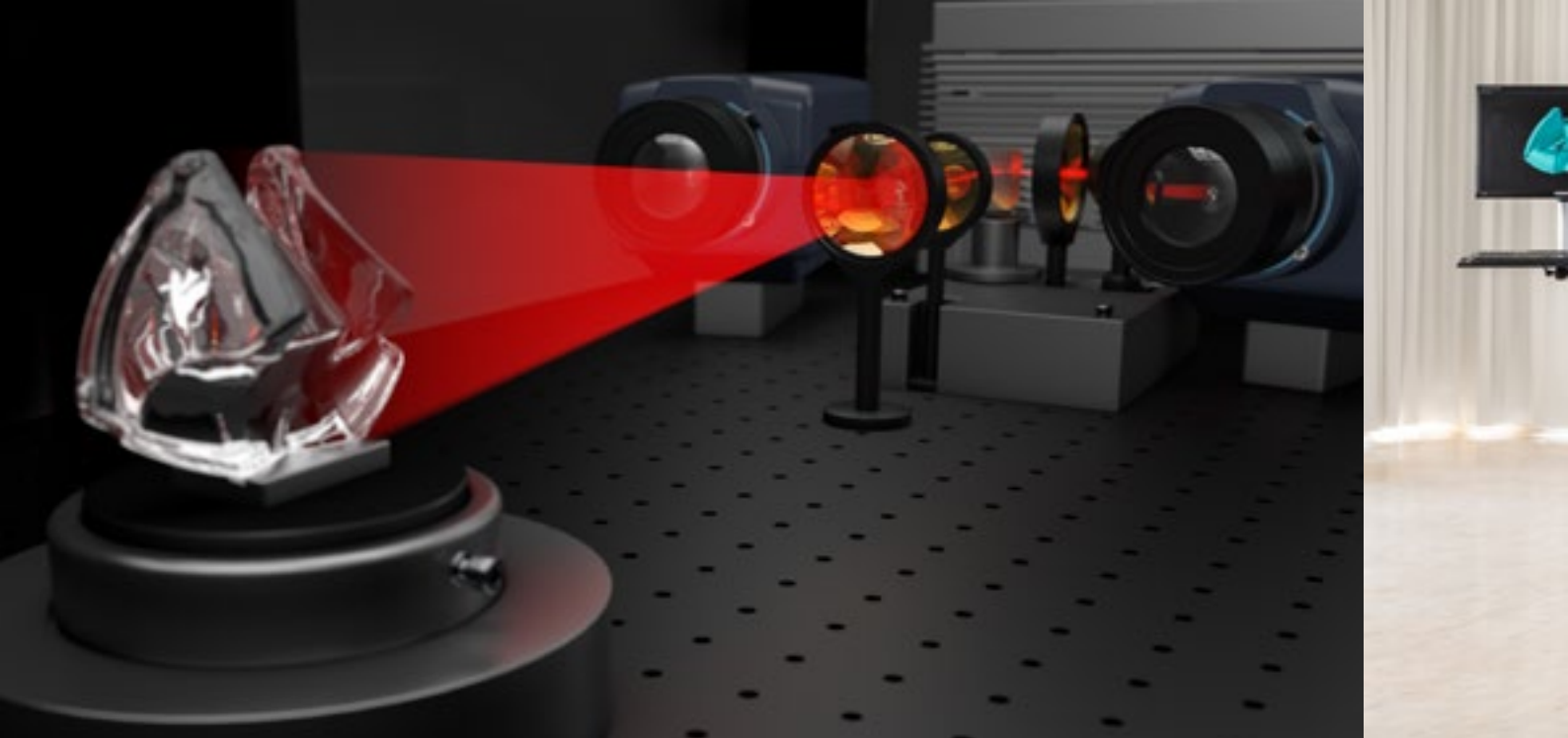
ST

PLAN



Bildgebung und Sensorik  
Imaging and Sensing

---



[1] Blick in den Sensor mit IR-Laserlinie.  
View into the sensor with IR laser line.

## Rundum-3D-Formvermessung transparenter Objekte All-round 3D shape measurement of transparent objects

Optische 3D-Formvermessung ist in der Qualitätssicherung, besonders bei der Digitalisierung komplexer Freiformflächen oder in der Robotik, nicht mehr wegzudenken. Nicht-kooperative, d. h. transparente, reflektierende oder schwarze, Oberflächen sind aber mit konventionellen optischen Messsystemen im sichtbaren Spektralbereich nur ungenau bis gar nicht dreidimensional erfassbar. Möchte man solche Oberflächen dennoch genau vermessen, müssen sie zunächst mit einer weißen streuenden Beschichtung überzogen werden, welche nach der Messung meist wieder entfernt werden muss.

Eine Neuentwicklung der Arbeitsgruppe 3D-Sensorik des Fraunhofer IOF macht diese zeitaufwendigen und ungewünschten Bearbeitungsschritte in Zukunft überflüssig. Das innovative Messprinzip basiert auf der »Shape from Heating«-Methode, bei der das Messobjekt mittels eines im thermischen Infrarot (IR) operierenden Projektors strukturiert erwärmt wird (zerstörungsfrei um wenige Kelvin) und die von der Objekt-oberfläche emittierten Muster mit Wärmebildkameras beobachtet werden.

Durch den Übergang von flächenhafter auf linienhafte IR-Streifenprojektion ist es den Forschenden nun gelungen, gegenüber bisherigen »Shape from Heating«-Systemen, sowohl die Messzeit von bislang mehr als einer halben Minute in den Bereich einer Sekunde und darunter zu reduzieren als auch die Messqualität drastisch zu steigern. Dazu wird die verwendete CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung in einen schmalen Streifen geformt und

Optical 3D shape measurement has become essential in quality assurance, in the digitization of complex freeform surfaces, or in the field of robotics. However, non-cooperative, i.e., transparent, reflective, or black, surfaces cannot be measured reliably in three dimensions with conventional optical measurement systems in the visible spectral range. To still measure such surfaces accurately, they must first be sprayed with a diffusely reflective coating, which usually must be removed again after the measurement.

A new development by the 3D Sensors group at Fraunhofer IOF is making these time-consuming and undesirable processing steps obsolete in future. The innovative measurement principle is based on the "Shape from Heating" approach. In this method, the measured object is structurally heated (non-destructively by a few Kelvin) by means of a projector operating in the thermal infrared (IR) and the patterns emitted by the object surface are observed with thermal cameras.

By changing the IR projection from areal to locally strongly restricted areas, the researchers have now succeeded in both significantly reducing the measurement time from more than half a minute to the range of one second and below, as well as to drastically increasing the measurement quality compared to previous "Shape from Heating" systems. For this purpose, the CO<sub>2</sub> laser beam used is shaped into a narrow fringe and scanned sequentially over the object's surface. Compared to areal patterns, the irradiation times drop from



[3] goQUALITY3D-Demonstrator für Rundum-3D-Formvermessung. / goQUALITY3D demonstrator for all-round 3D shape measurement.

#### Authors

Martin Landmann  
Stefan Heist  
Peter Kühmstedt  
Gunther Notni

#### Contact

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

sequenziell über die Objektoberfläche gescannt. Im Vergleich zur flächenhaften Bestrahlung sinkt die Bestrahlungsdauer vom Sekunden- in den Millisekundenbereich und eine zu starke thermische Diffusion wird vermieden. Der dadurch erhöhte Temperaturkontrast ermöglicht eine bislang unerreichte 3D-Messqualität innerhalb einer um mehr als eine Größenordnung reduzierten Messzeit /1/.

Das neuartige Verfahren wurde innerhalb kürzester Zeit von der Arbeitsgruppe 3D-Sensorik in einem mobilen Demonstrator für Rundum-Vermessung transparenter Objekte umgesetzt. Um ein vollständiges 3D-Modell zu erstellen, wird das Objekt auf einem Drehtisch positioniert und in mindestens vier Einzelansichten, welche jeweils um 90° zueinander rotiert sind, aufgenommen. Typische Messzeiten für Einzelansichten liegen zwischen 0,5 und 4 Sekunden.

Mit ihrer Neuentwicklung konnten die Forschenden eine Lösung für das seit Jahrzehnten bestehende Problem der schnellen und genauen 3D-Erfassung von Objekten mit nicht-kooperativen Oberflächen präsentieren. Von der Zeitschrift »inVISION« – dem führenden Fachmagazin für die Themen Bildverarbeitung, Embedded Vision und Messtechnik in Deutschland – wurde die neue 3D-Messtechnik im thermischen IR als »inVISION Top Innovation 2021« ausgezeichnet.

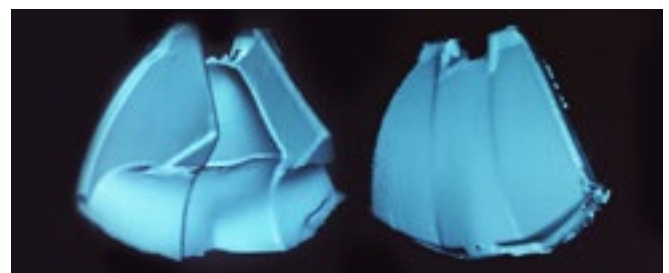
#### Literatur / References

/1/M. Landmann et al.: High-resolution sequential thermal fringe projection technique for fast and accurate 3D shape measurement of transparent objects, Appl. Opt. 60, 8, 2362–2371 (2021).

the seconds to milliseconds range and excessive thermal diffusion is avoided. The resulting increased temperature contrast enables a previously unattained 3D measurement quality within a measurement time reduced by more than an order of magnitude /1/.

Within a very short time, the novel method was implemented by the 3D Sensors working group in a mobile and trade fair-compatible demonstrator for all-round measurements of transparent objects. To create a complete 3D model, the object is positioned on a turntable and recorded in at least four individual views, each rotated by 90° to the other. Typical measurement times for single views are between 0.5 and 4 seconds.

With their innovation, the researchers were able to present a solution to the decades-long problem of fast and accurate 3D detection of objects with non-cooperative surfaces. The magazine "inVISION" – the leading journal for image processing, embedded vision, and measurement technology in Germany – awarded the new 3D measurement technology in the thermal IR as "inVISION Top Innovation 2021".



[2] 3D-Modell einer Glasoptik. / 3D model of a glass lens.



[1] Messzelle mit Roboter. / Assembly cell with robot.

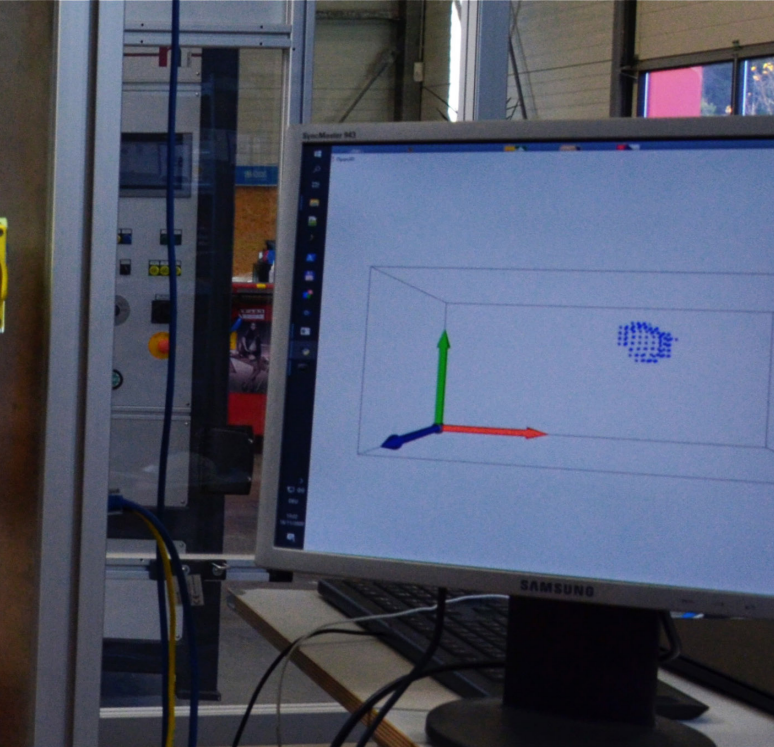
## Kollaboration von Mensch und Roboter bei der gemeinsamen und sicheren Montage Collaboration of human and robot at common and safe assembly of industrial parts

Für die sichere gemeinsame Arbeit zwischen Menschen und Robotern werden in bestimmten Industriebereichen sogenannte kollaborative Roboter (kurz: Cobots) eingesetzt. Da sie ihre relative Ungefährlichkeit im Wesentlichen durch langsame Bewegungen erreichen und nicht für hohe Lasten ausgelegt sind, eignen sie sich für viele Anwendungen im Produktionsprozess nicht oder nur unzureichend. Wünschenswert wäre es, wenn die Positionen der arbeitenden Personen bekannt wären und der Roboter seine Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zu den Menschen anpasst. Die notwendige Bestimmung des Abstands zwischen Menschen und Roboter muss hierfür ultraschnell, d. h. mit möglichst geringer Latenz, erfolgen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts KOMERO wurde am Fraunhofer IOF in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie eine Messzelle entwickelt, innerhalb der ein schneller Industrieroboter und eine menschliche Arbeitskraft gleichzeitig gefahrlos arbeiten können. Ein aus vier Kameras bestehendes Sensorsystem ermittelt die Position des Menschen und berechnet den Abstand zum Roboter. Basierend auf dieser Information kann der Roboter seine Geschwindigkeit anpassen oder komplett anhalten. Das Arbeitsvolumen hat eine Größe von 500 mm x 500 mm x 1100 mm. Die Latenzzeit bis zur

For safe collaboration between humans and robots in industrial environments, so-called cobots are used. They are explicitly designed for cooperation with humans and are safe because of their slow movements and suitability only for light loads. Cobots are therefore not, or only minimally, suitable for applications in the production process. For effective deployment, it would be preferable to use fast industrial robots in collaboration with humans in a safe manner, e.g., by automatically maintaining a safe distance from the worker. Hence, an ultrafast determination of the distance between human and robot is necessary.

At Fraunhofer IOF, a measurement cell was realized along with several industrial enterprises in the KOMERO project. A fast industrial robot and a human should work safely together in this cell. A sensor system consisting of four cameras determines the position of the worker and rapidly calculates the distance to the robot. Using this information, the robot should change its velocity or stop completely. The realized working volume is 500 mm x 500 mm x 1100 mm, and the latency until determination of 3D object data is below 20 ms and below 50 ms to robot reaction.



### Authors

Patrick Dietrich  
Christian Bräuer-Burchardt  
Florian Siegmund

### Contact

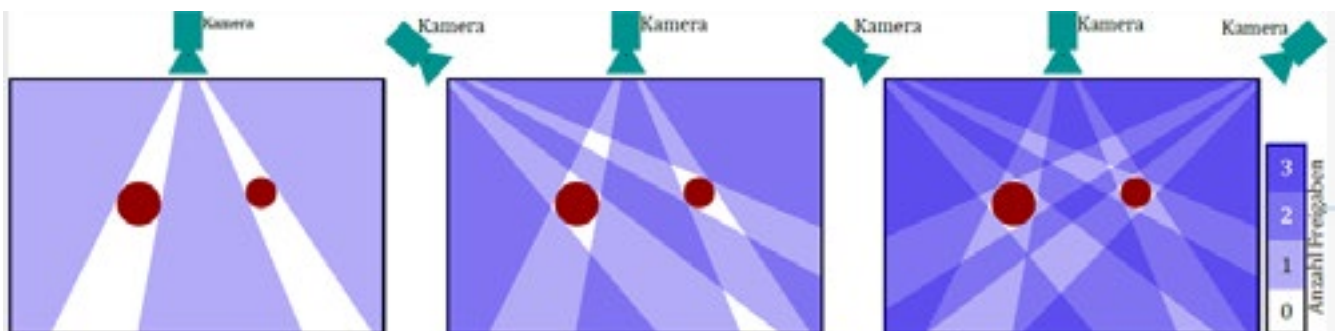
Dr. Peter Kühmstedt  
Phone +49 3641 807-230  
peter.kuehmstedt@  
iof.fraunhofer.de

Bereitstellung der 3D-Messdaten beträgt unter 20 ms, die Gesamtlatenz bis zur Reaktion des Roboters weniger als 50 ms. Zur Realisierung der ultraschnellen Abstandsberechnung wird das Messvolumen in Voxel unterteilt und von vier Kameras aus unterschiedlichen Richtungen simultan beobachtet. Durch die vorab erfolgte Kalibrierung ist für jedes Voxel bekannt, auf welchem Bereich des Kamerasensors es abgebildet wird. Jede der Kameras nimmt bei Systemstart ein Hintergrundbild auf, welches anschließend mit jedem neu aufgenommenen Bild verglichen wird. Tritt eine Bildveränderung auf, bedeutet dies, dass sich ein Objekt zwischen Hintergrund und Kamera befindet. Ist dagegen der Hintergrund sichtbar, befindet sich kein Objekt im Sichtstrahl. Voxel, bei denen mindestens eine Kamera freie Sicht auf den Hintergrund hat, werden als »frei« markiert. Voxel, die von keiner Kamera freigegeben werden, werden als »belegt« angenommen (Abb. 2).

Das Sensorsystem wurde als Demonstrator realisiert und wird in einer Montagezelle für Steckdosen zusammen mit einem Industrieroboter eingesetzt (Abb. 1).

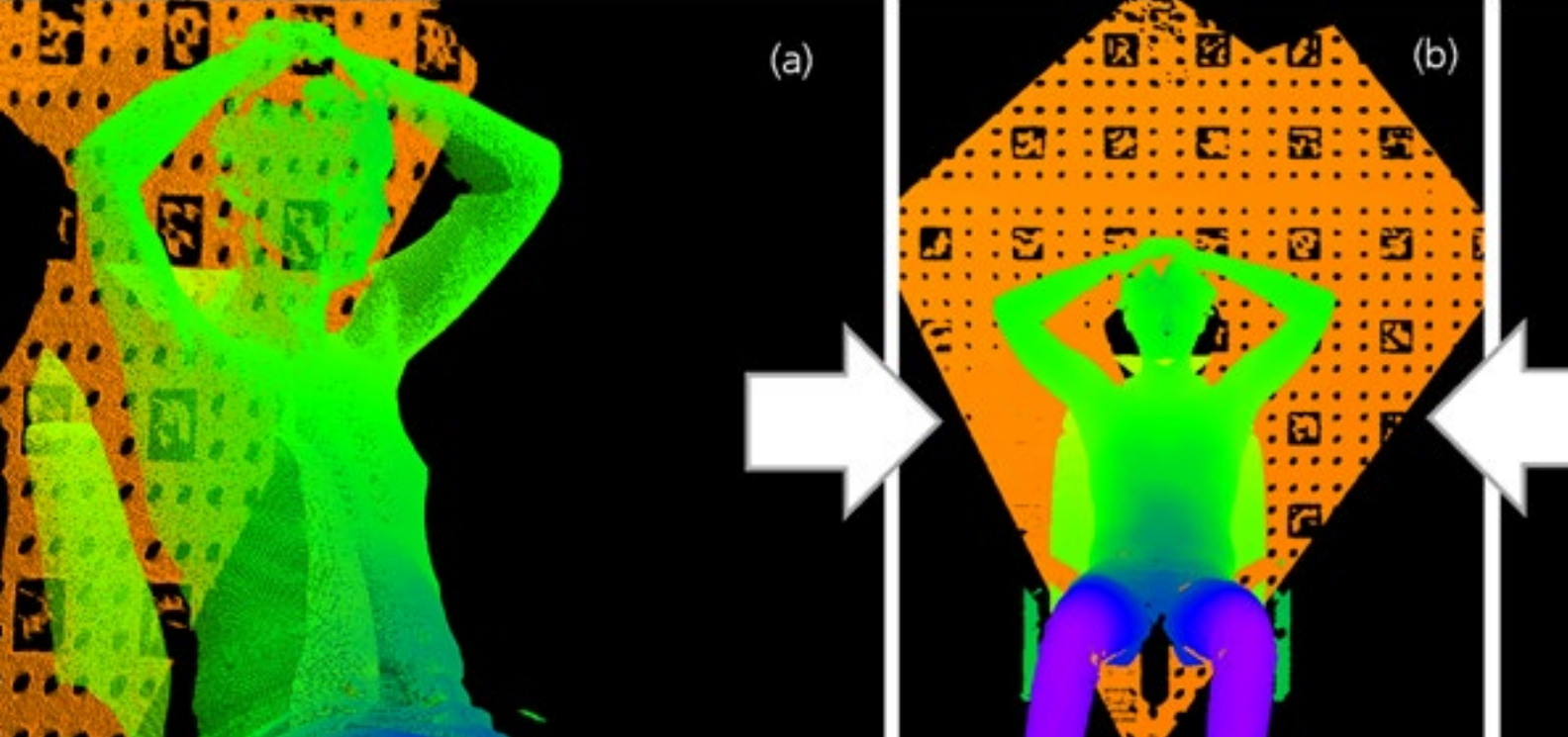
In order to achieve a fast determination on distance, the working volume is separated in voxels (volume elements) and simultaneously observed from different directions by four cameras. Via a-priori performed camera calibration, it is known for every voxel to which pixel it corresponds. Every camera first records a background image. Then, every new image is compared to this background image. Every significant change of the image content indicates the appearance of an object. Conversely, if the background is visible, no object is in the region of the vision ray. Voxels where at least one camera has a clear view of the background are marked as "free", while the others are marked as "occupied" (Fig. 2).

The sensor system was realized as a demonstrator and is used in an assembly cell for sockets together with an industrial robot (Fig. 1).



[2] Schema zum Prinzip Messraumfreigabe: Weiße (und rote) Bereiche gelten als »belegt«, alle anderen in den verschiedenen Blauschattierungen als »frei«.

Principle of voxel marking: white (and red) areas are marked as "occupied", all others (blue shaded) as "free".



[1] Punktwolken aus dem kontinuierlichem Datenstrom: a) Messergebnis linker 3D-Sensor; b) Fusionierter 3D-Gesamtdatensatz; c) Messergebnis rechter 3D-Sensor.  
 3D point clouds from the continuous data stream: a) 3D measurement results from the left sensor; b) complete and unified 3D data set; c) 3D measurement results from the right sensor.

## Berührungslose Bestimmung des Tidalvolumens Contact-free determination of the tidal volume

Die Messung der biomechanischen Eigenschaften der Atmung, wie z. B. des Tidalvolumens, kann zur Beurteilung der Atmungsleistung und der Gesundheit der Atemwege von Personen verwendet werden. Ein zu geringes Atemvolumen ist u. a. ein häufiges Symptom der COVID-19-Erkrankung.

Das entwickelte 3D-sensorbasierte Messverfahren erlaubt es, die Atmung von Personen in Echtzeit zu verfolgen. Durch die frühzeitige Erkennung eines unzureichenden Atemvolumens können mögliche schwere Krankheitsverläufe u. a. von COVID-19 schneller erkannt und behandelt werden.

Moderne Methoden wie die Spirometrie oder die Körperplethysmographie erfordern im Gegensatz zur berührungslosen Variante ein Mundstück oder eine Gesichtsmaske. Neben Unbehagen steigt durch den Kontakt auch das Risiko einer Infektion durch aerosol-übertragene Krankheiten wie SARS-CoV-2.

Der kontaktfreie alternative Ansatz zur Messung des Atemzugvolumens besteht darin, die Veränderung der geometrischen Form des Rumpfes einer Person während der Atmung zu bestimmen. Durch die Erfassung dichter 3D-Punktwolken der Person mit einem 3D-Sensor im Nahinfrarotbereich (NIR) in Echtzeit können diese Veränderungen bequem berührungslos und ohne Irritationen gemessen werden. Darüber hinaus sind keine zusätzlichen Setup-Prozeduren, wie das Anbringen von Markern oder Sensoren an der zu

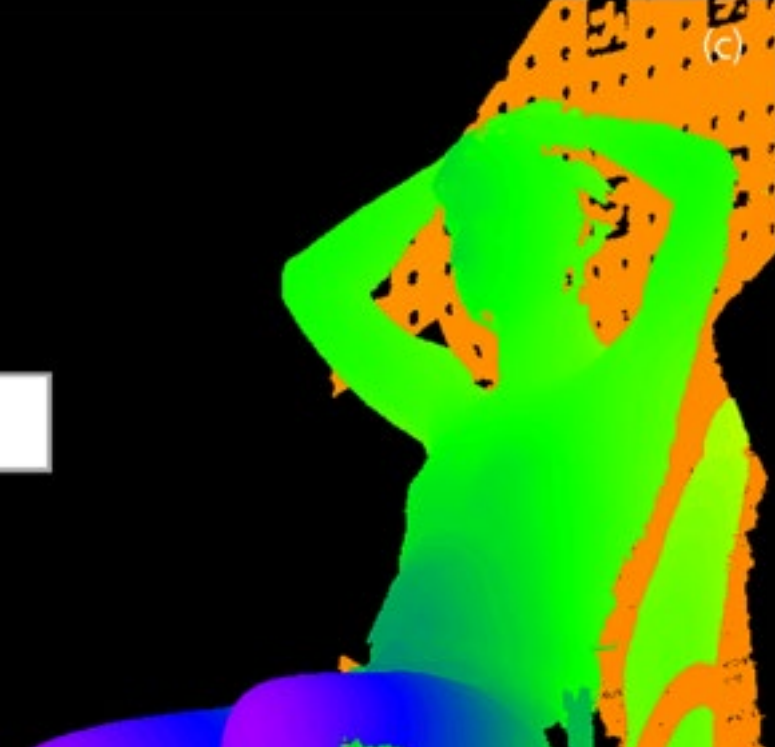
Measurement of respiratory biomechanical properties, such as tidal volume, can be used to assess respiratory performance and respiratory health in individuals. Unhealthy breathing is a common symptom of COVID-19 disease, among others.

The 3D sensor-based measurement method developed allows real-time tracking of the breathing of diseased individuals. By detecting unhealthy breathing at an early stage, possible severe disease progression of COVID-19, among others, can be detected and treated more quickly.

Modern methods such as spirometry or body plethysmography require a mouthpiece or face mask, in contrast to the non-contact version. In addition to discomfort, contact also increases the risk of infection from aerosol-borne diseases such as SARS-CoV-2.

The noncontact alternative approach to measuring respiratory volume is to determine the change in geometric shape of a person's torso during breathing. By capturing dense 3D point clouds of the subject with a near-infrared (NIR) 3D sensor in real time, these changes can be conveniently measured without contact or irritation. Furthermore, no additional setup procedures, such as placing markers or sensors on the patient or in the environment, are required. A continuously measuring 3D sensor system with structured light, which was specially developed for patient monitoring, is used. A stereo





#### Authors

Marc Preißler  
Christoph Munkelt  
Peter Kühmstedt  
Gunther Notni

#### Contact

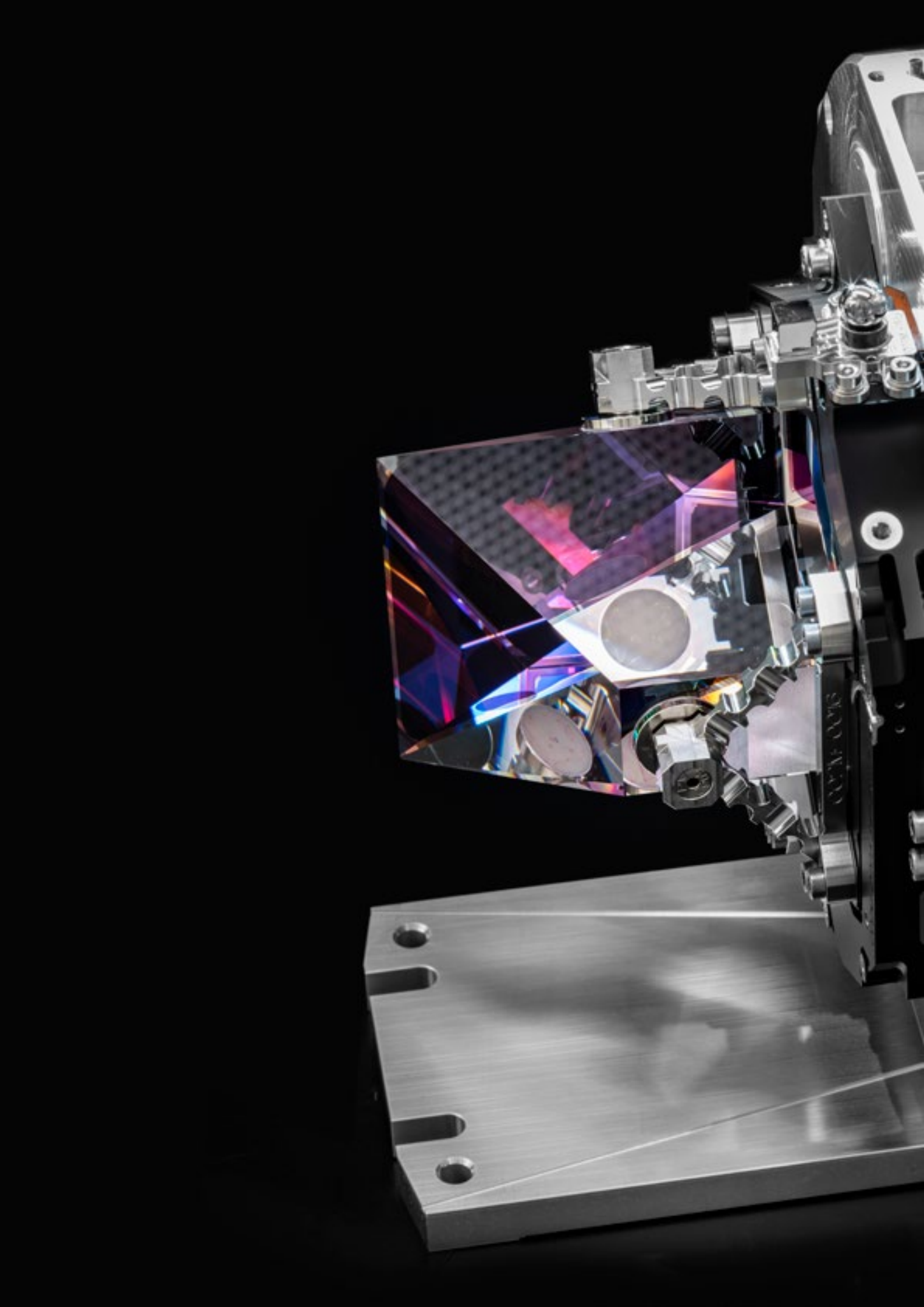
Dr. Peter Kühmstedt  
Phone +49 3641 807-230  
peter.kuehmstedt@  
iof.fraunhofer.de

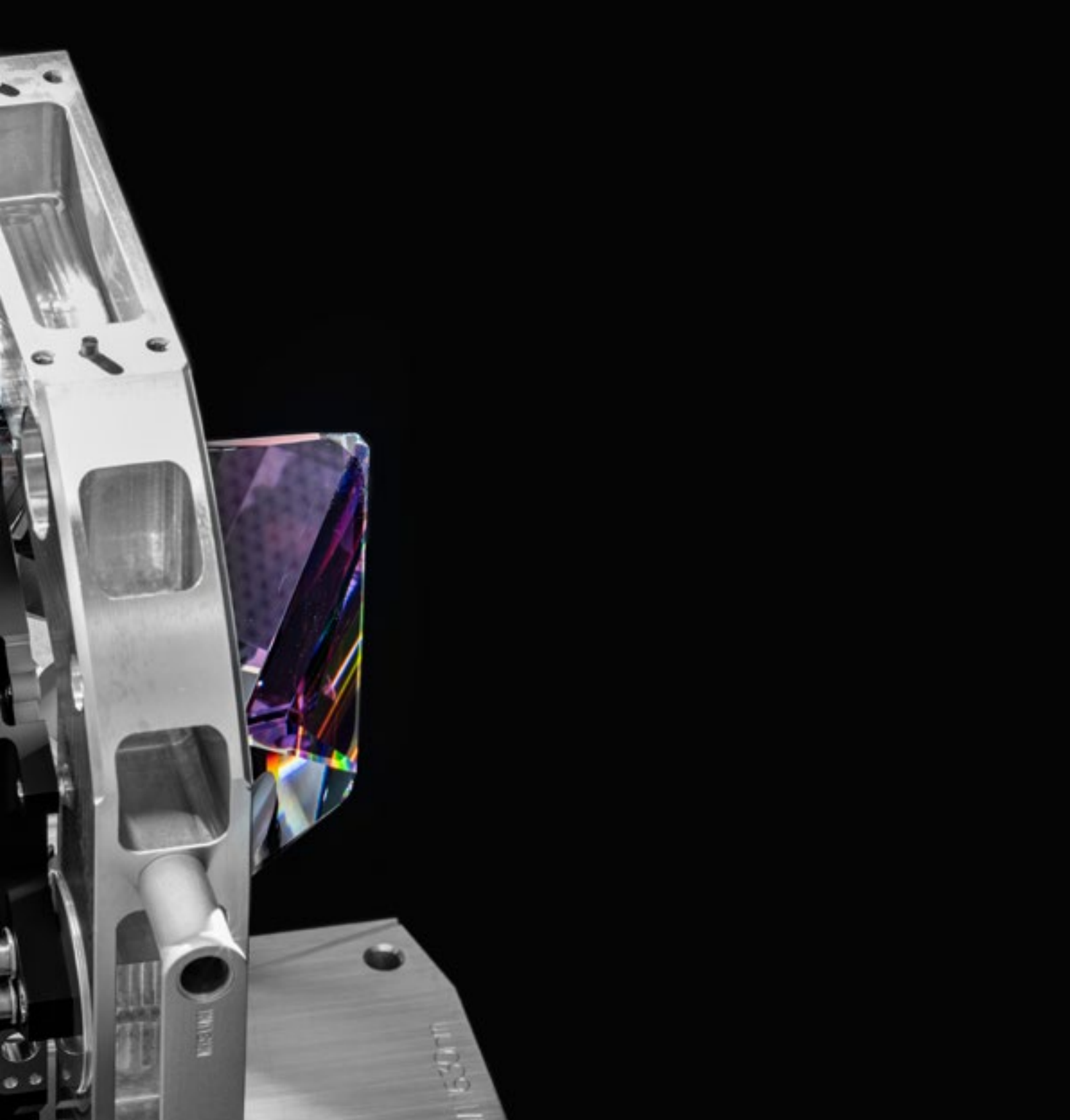
behandelnden Person oder in der Umgebung, erforderlich. Zur hochpräzisen Berechnung der 3D-Punktwolken wird eine Stereokamera in Kombination mit einem GOBO-basierten aperiodischen Sinusmusterprojektor mit einer Wellenlänge von 850 nm eingesetzt. Zwei dieser Sensoren erfassen gleichzeitig den oberen vorderen und seitlichen Torso der Testperson mit einer Bildrate von 200 Hz. Jede 3D-Punktwolke enthält etwa 100.000 Punkte mit einem seitlichen 3D-Punkt-Abstand von etwa 2 mm. Beide 3D-Scanner werden kalibriert und in einem Sensornetzwerk betrieben, so dass ein einheitlicher Datenstrom in einem globalen Koordinatensystem entsteht. Dies führt zu einer verbesserten Abdeckung und einer geringeren Verdeckung der Körperform der Testperson, was robuste Messungen selbst bei lockerer Kleidung und variierender Körperform ermöglicht.

Ein Algorithmus verfolgt das Volumen des Rumpfes der Testperson innerhalb weniger Atemzüge durch die Integration über die Körperoberfläche. Die Analyse der Referenz-Spirometriedaten mit den berechneten berührungslosen Daten zeigt eine hohe Korrelation ( $\approx 0,98$ ) und einen geringen mittleren Fehler für die absoluten Tidalvolumenwerte. Somit ist die Methode eine praktikable, kontaktlose und genaue Alternative zur Spirometrie und Plethysmographie.

camera in combination with a GOBO-based aperiodic sinusoidal pattern projector with a wavelength of 850 nm is used to calculate the 3D point clouds with high precision. Two of these sensors simultaneously capture the upper anterior and lateral torso of the subject at a frame rate of 200 Hz. Each 3D point cloud contains approximately 100,000 points with a lateral 3D point spacing of approximately 2 mm. Both 3D scanners are calibrated and operated in a sensor network, resulting in a uniform data stream in a global coordinate system. This results in improved coverage and less occlusion of the patient's body shape, allowing robust measurements even with loose clothing and varying body shape.

An algorithm tracks the volume of the subject's torso within a few breaths by integrating over the body surface. Analysis of the reference spirometry data with the calculated noncontact data shows a high correlation ( $\approx 0.98$ ) and a low mean error for the absolute tidal volume values. Thus, the method is a feasible, safe, and accurate alternative to spirometry and plethysmography.





Optisches und mechanisches Systemdesign  
Optical and Mechanical System Design

---



[1] Explosionsartige Darstellung der Einzelkomponenten mit möglichen Anwendungsbeispielen.  
 Exploded view of multispectral SWIR camera with prospective applications.

## Kompakte Multispektralkamera für den kurzwelligen Infrarot-Bereich / Compact multispectral camera for the shortwave infrared range

Der Einsatz berührungsloser, multispektraler Inspektionssysteme nimmt nicht nur im industriellen Umfeld stetig zu. So steigt die Nachfrage neben denen im visuellen Spektralbereich auch im kurzwelligen Infrarotbereich (SWIR), da insbesondere im Bereich der Präzisionslandwirtschaft, der Lebensmittelkontrolle und dem Recycling (z. B. Plastiksartierung) charakteristische Spektralsignaturen der entsprechenden Objekte auftreten. Klassische Lösungen für die multispektrale Bildgebung basieren auf scannenden Ansätzen (Punkt- oder Linienscanner und Filtrerräder), welche unter Bewegungsunschärfe und einem reduzierten Signal-Rausch-Verhältnis bei sich schnell verändernden Szenen leiden. Multispektrale Snapshot-Systeme bieten hingegen den Vorteil der zeitgleichen Aufnahme von räumlichen und spektralen Objektinformationen. Aktuelle Trends gehen außerdem hin zu echtzeitfähigen und miniaturisierten Systemen, z. B. speziell adaptiert für drohnengestützte Anwendungen.

Wir nutzen zur Realisierung ein Multiapertur-Abbildungssystem, kombiniert mit einem linearen Verlaufsfilter (gezeigt 2018 für VIS/NIR-Bereich [1]). Dieser Ansatz ist auf den SWIR-Bereich übertragbar, jedoch müssen aufgrund der verfügbaren Filter- und Bildsentechnologie (großer Pixelpitch, geringe Auflösung, Wellenlängenbereich) Anpassungen vorgenommen werden. Aus dieser Motivation heraus wurde ein multispektrales Snapshot-System zur Detektion

The impact of remote sensing multispectral inspection systems is rapidly growing in industry. Besides visible systems, the demand for shortwave infrared (SWIR) detection systems is increasing, especially in the field of precise agriculture, food control, and recycling (e.g., plastic sorting) due to emerging characteristic spectral signatures. Classical solutions for multispectral imaging are based on scanning approaches (point or line scanning as well as filter wheel), but these suffer from motion blur and a reduced signal-noise-ratio for dynamic scenes. However, multispectral snapshot systems offer the advantage of simultaneous capturing of spatial and spectral information from the object in a single shot.

We use a multi-aperture imaging system in combination with a linear variable filter (as shown in 2018 for the VIS-NIR range [1]). This approach is transferable to the SWIR-range. However, adaptations are required due to the available filter and image sensor technology (large pixel pitch, low resolution, wavelength range). Hence, we designed a multispectral snapshot system for the detection of 20 different wavelength bands in the range between 1050 and 1550 nm. The customized one-sided microlens array enables an f-number of 3.6 by using a high refractive index polymer and offers an entire diagonal field of view of 36° per channel. Each of the 20 spectral channels provides a spatial resolution of 128 x 128 pixels as the InGaAs-sensor has a full resolution of



### Authors

Elisabeth Montag  
Martin Hubold  
Robert Brüning

### Contact

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

von 20 verschiedenen Wellenlängenbändern im Wellenlängenbereich zwischen 1050 und 1550 nm ausgelegt. Das angepasste einseitige Mikrolinsenarray ermöglicht durch den Einsatz eines hochbrechenden Polymers eine Lichtstärke von  $F/3,6$  bei der Abbildung eines diagonalen Gesichtsfeldes von  $36^\circ$  pro Kanal. Jeder der 20 Spektralkanäle besitzt aufgrund des verwendeten InGaAs-Sensors mit  $512 \times 640$  Pixeln eine räumliche Auflösung von  $128 \times 128$  Pixeln mit  $15 \mu\text{m}$  Pixelgröße. Der Füllfaktor des Multiapertursystems wurde durch zwei speziell angepasste 3D-Blendenstrukturen verbessert, welche durch eine schwarze Plasma-Chemische-Oxidations-Beschichtung zusätzlich stark reflexionsmindernd wirken, um der Entstehung von Geisterbildern und optischen Übersprechens auf benachbarte Bildkanäle vorzubeugen. Das finale Optiksysteem weist gerade einmal eine Dicke von  $10,1 \text{ mm}$  exklusive der Sensorfläche und dessen Gehäuse auf.

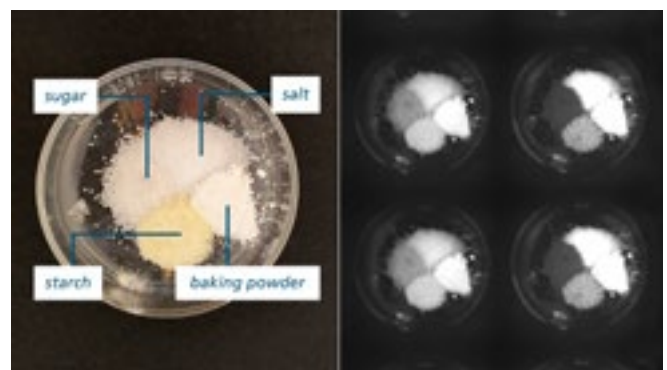
Die erfolgreiche Umsetzung dieses multispektralen Snapshot-Systems wurde abschließend an Lebensmitteln, wie bspw. Äpfeln, Salz, Zucker und Stärke, getestet. Zusätzlich erlauben die Einzelkanalbilder in Kombination mit einer guten Abbildungsqualität der Optik eine panchromatische Überlagerung der Kanäle mittels eines angepassten Super-Resolution Algorithmus. Dadurch kann die Auflösung bis zum dreifachen der Einzelkanalauflösung erhöht werden.

### Literatur / References

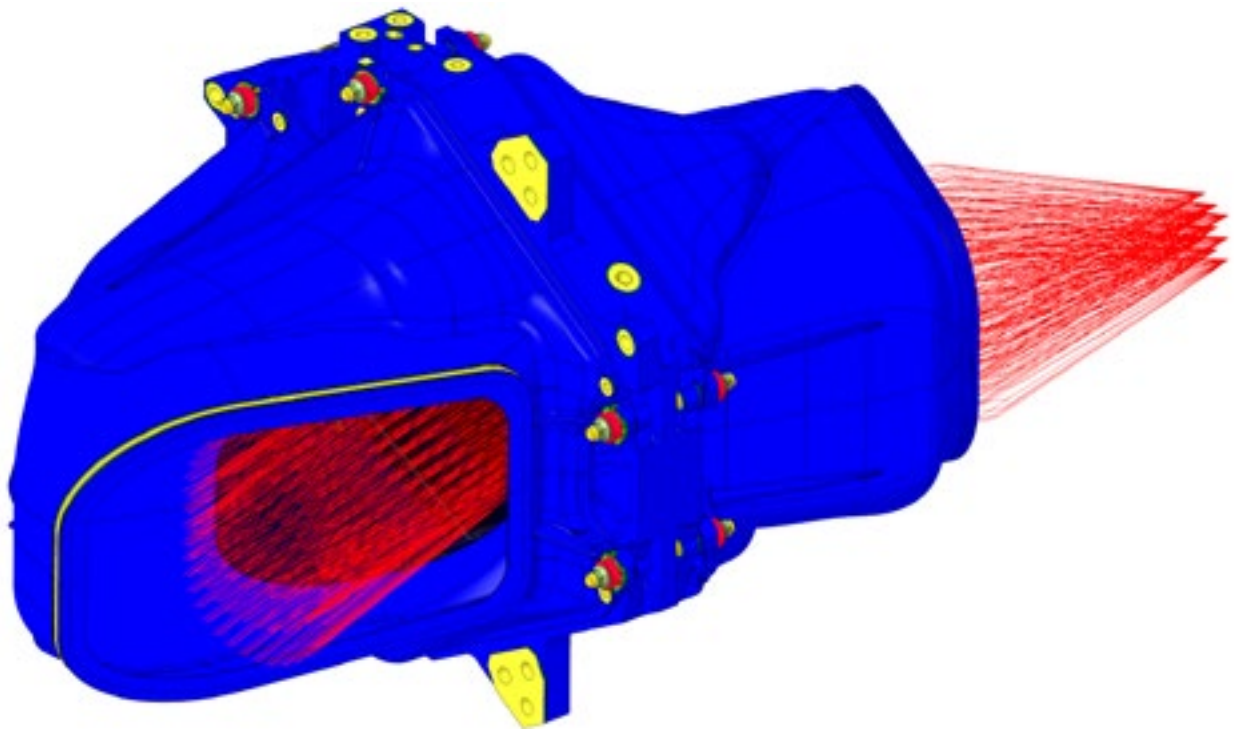
/1/ M. Hubold et al.: Multi-aperture system approach for snapshot multispectral imaging applications, *Opt. Express* 29, 7361–7378 (2021).

$512 \times 640$  pixels with a  $15 \mu\text{m}$  pixel pitch. The fill factor of the multi-aperture system has been improved by two specifically adapted 3D-aperture structures, which have a black and low reflective plasma chemical oxidation coating to prevent ghost images and suppress optical crosstalk into neighboring image channels. The final optical system has a thickness of just  $10.1 \text{ mm}$ , excluding the image sensor and its housing.

The successful realization of this multispectral snapshot camera was proven by application scenarios with food sorting, e.g., apples, salt, sugar, and starch. In addition, the individual channel images in combination with a good image quality of the optics allow a panchromatic overlay of the channels using an adapted super resolution algorithm. This allows the resolution to be increased up to three times compared to the single-channel resolution.



[2] Links: RGB-Bild verschiedener Zutaten. Rechts: Ausschnitt des Rohbilds der SWIR-Kamera, wobei Zucker eine starke spektrale Kontraständerung aufweist. / Left: RGB image of different ingredients. Right: Cropped section of the raw image from the SWIR camera of the scene, whereas sugar shows a high spectral contrast change.



[1] CAD-Modell des CO2M-SWIR1-PG+P-Assemblies mit und ohne SLM-gefertigten Cover.  
 CAD model of the CO2M-SWIR1-PG+P-Assemblies with and without SLM manufactured covers.

## Prisma-Gitter-Prisma Baugruppe für den Weltraumeinsatz Prism-Grating-Prism-Assembly for use in space

Erdbeobachtungsmissionen, wie die »Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring Mission« (CO2M-Mission), erfordern immer leistungsfähigere Spektrometer. Ein Ansatz, um die erhöhten optischen Anforderungen an die Dispersionsbaugruppen solcher Spektrometer zu erfüllen, ist die Verwendung von Prismen in Kombination mit Gittern (PG- und PG+P-Baugruppen). Die geforderte Komplexität, Größe und Masse solcher Anordnungen nahm im Verlauf der letzten Jahre immer weiter zu. War es beim PG-Assembly der Sentinel 5 Mission noch ein Prisma und ein Gitter mit einem Luftspalt dazwischen und einer Gesamtmasse der beiden optischen Komponenten von 0,34 kg, so werden derzeit am Fraunhofer IOF für die CO2M-Mission PG+P-Assemblies designt und aufgebaut, welche eine Masse der Optiken von jeweils bis zu 3,5 kg aufweisen.

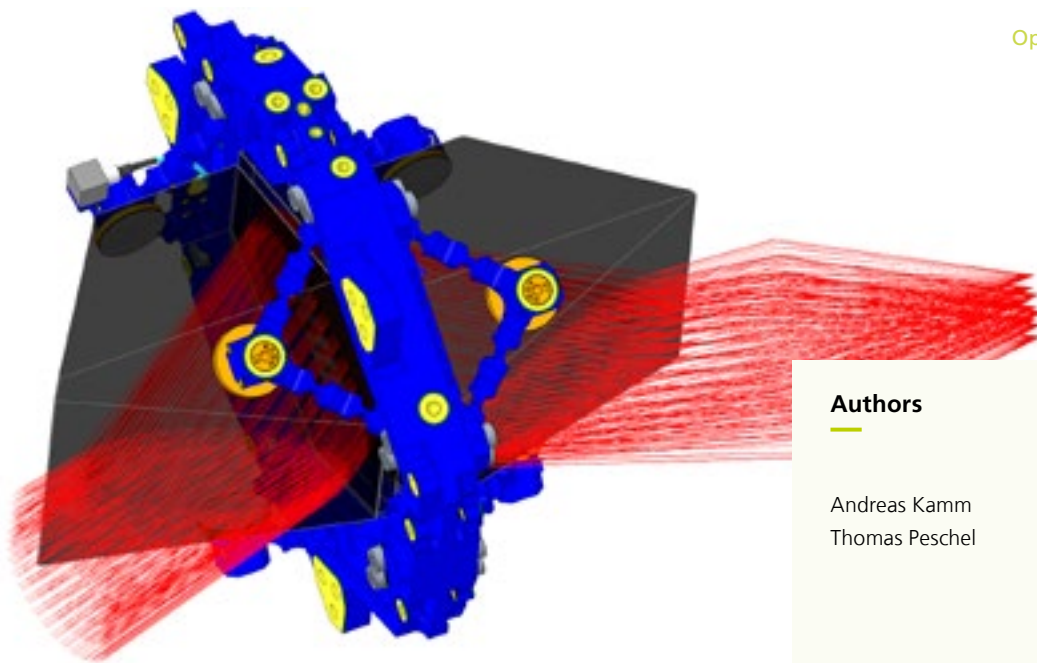
Um prismatische Bauteile genau zu justieren und sicher für Weltraummissionen zu halten, wurde bereits 2013, im Rahmen des Projekts »Sentinel 4 Grating Unit« eine kinematische Halterung inklusive Montagetechnologie für ein reflektives Gitter aus Quarzglas entwickelt. Für das Sentinel 5 PG wurde diese Technologie weiterentwickelt und kommt jetzt auch bei den PG+P-Assemblies der CO2M-Mission zum Einsatz.

Bei diesen Baugruppen wird das Gitter bereits vor der eigentlichen Integration durch ein spezielles Bondverfahren des Fraunhofer IOF an das erste Prisma gefügt /1/. Das so

Earth observation missions such as the "Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring Mission" (CO2M mission) require ever more efficient spectrometers. One approach to meet the increased optical requirements for the dispersion assemblies of such spectrometers is the use of prisms in combination with gratings (PG- and PG+P-assemblies). The required complexity, size, and mass of such arrangements has increased in recent years. While the PG-Assembly of the Sentinel 5 mission was a prism and a grating with an air gap in between and a total mass of the two optical components of 0.34 kg, for the CO2M mission, PG+P-Assemblies are currently being designed and built at the Fraunhofer IOF. Each has a weight of up to 3.5 kg for the optics.

To precisely adjust prismatic components and hold them securely for space missions, a kinematic mount including integration technology for a reflective grating made of quartz glass was developed as part of the "Sentinel 4 Grating Unit" project in 2013. This technology has been further developed for the Sentinel 5 PG and is now also used in the PG+P-assemblies of the CO2M mission.

With these assemblies, the grating is already joined to the first prism using a special bonding process at Fraunhofer IOF before the main integration /1/. The resulting PG and the second prism must then be adjusted and fixed in six degrees of freedom to the mechanical interface of the assembly. Each of the prisms is connected to the rigid basic structure by a kinematic mount consisting of three bipods. The specialty is



#### Authors

Andreas Kamm  
Thomas Peschel

#### Contact

Dr. Thomas Peschel  
Phone: +49 3641 807-335  
thomas.peschel@  
iof.fraunhofer.de

entstandene PG und das zweite Prisma müssen anschließend in jeweils sechs Freiheitsgraden zum mechanischen Interface der Baugruppe justiert und fixiert werden.

Jedes der Prismen wird durch eine kinematische Halterung, bestehend aus drei Bipods, an die steife Grundstruktur angebunden. Die Besonderheit besteht in der Reihenfolge der Integration. Die Bipods werden an die Grundstruktur geschraubt und erst danach werden die Prismen zwischen diesen eingesetzt und justiert. Der dafür notwendige Spalt wird anschließend durch spezielle Bolzen in einem zweistufigen Klebprozess geschlossen.

Da die Fixierung der Prismen erst als letzter Schritt erfolgt, werden alle vorher in die Baugruppe eingebrachten mechanischen Spannungen nicht an die Optik und die finale Klebung weitergegeben. Im Ergebnis ist eine sehr genaue, spannungsarme und langzeitstabile Halterung der Prismen möglich. Das gesamte optomechanische Design der Baugruppen ist auf diese Montagetechnologie ausgelegt und wird durch FEM-Analysen und Test verifiziert.

Zur Streu- und Störlichtunterdrückung werden die Prismen in zwei ultraleichte und geschwärzte Cover eingeschlossen, die mittels Selective Laser Melting (SLM) additiv am Fraunhofer IOF gefertigt werden /2/.

the order of integration. The bipods are screwed to the basic structure, then the prisms are inserted between them and adjusted. The gap required for this is then closed by special bolts in a two-step gluing process. As the prisms are only fixed as the final step, all mechanical stresses previously introduced into the assembly are not passed on to the optics and the final gluing. As a result, a very precise, low-stress, and long-term stable mounting of the prisms is possible.

The entire optomechanical design of the assemblies is based on this integration technology and is verified by FEM analyses and tests.

To suppress stray light and disturbance light, the prisms are enclosed in two ultra-light and blackened covers, which are additively manufactured at Fraunhofer IOF using Selective Laser Melting (SLM) /2/.

#### References / Literatur

/1/ T. Flügel-Paul et al.: All-dielectric prism-grating-prism component realized by direct hydrophilic bonding technology for optical applications in space, Proc. SPIE 11180:1118014 (2019).

/2/ N. Heidler et al.: Topology optimization and additive manufacturing of an optical housing for space applications, EPJ Web Conf. Volume 215 (2019).



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

## Wissenschaft – Kunst – Design: Immersives Lichtfelddisplay Science – Art – Design: Immersive lightfield displays

Im Rahmen eines interdisziplinären Kooperationsprojekts der Berliner Kunstschaaffenden Charlotte Dachroth und Ole Jeschonnek sowie dem Fraunhofer IOF wurden Lichtfelddisplays realisiert. Gezeigt werden verschiedene künstlerische Motive wie Kugeln oder Lichtstäbe, die scheinbar im Raum schweben, wodurch ein 3D-Erscheinungsbild eines 2D-Objekts entsteht.

Das Lichtfelddisplay besteht aus einem Mikrolinsenarray (MLA) und einem Objektmaskenarray (OMA) in dessen Brennebene. Durch das kanalweise Maßschneiden der Objektmasken werden reale und/oder virtuelle Bild projiziert, die sich scheinbar vor oder hinter dem Display befinden.

Hexagonal gepackte MLA mit Sichtfeldern (FOV) von 40° und 80° wurden entwickelt. Erstere bestehen aus konisch asphärischen Lenslets, für letztere besitzen die Lenslets individuell unterschiedliche Krümmungsradien in radialer bzw. tangentialer Richtung (gechirptes Array), abhängig von der radialen Position innerhalb des Arrays. Zwischen OMA und MLA wird eine Blendschicht aus kreisförmigen (40° MLA) und elliptischen Blenden (80° MLA) angeordnet, um die Qualität des projizierten Bildes weiter zu verbessern.

Durch automatisiertes Rückwärts-Raytracing der reell und/oder virtuell projizierten Motive durch die einzelnen Kanäle des MLA wird eine CAD-Datei zum Schreiben der Maskenstrukturen erzeugt.

As part of an interdisciplinary cooperation project between Berlin based artists Dachroth + Jeschonnek and Fraunhofer IOF, lightfield displays have been realized. Different artistic graphics such as spheres or sticks of light are shown, which appear to float in space thus giving a 3D appearance to 2D objects. The lightfield display device consists of a microlens array (MLA) with an object mask array (OMA) in its focal plane. By tailoring the positions of the objects channel-wise, a real or virtual image is projected that appears to be in front of or behind the display.

Hexagonally packed MLAs realizing fields of view (FOV) of 40° and 80° have been designed. The former consists of conic aspherical lenslets. For the latter, the lenslets are corrected individually leading to a chirped array, employing lenslets with slightly different radii of curvature in radial and tangential direction depending on their radial position within the array. An aperture layer consisting of circular (for 40° MLA) and elliptical apertures (for 80° MLA) is introduced between the OMA and the MLA to further improve image quality.

The CAD file for the mask structures is generated by automated backward ray-tracing from the real and virtual projected objects through the individual channels of the MLA.

The lenslets are mastered using reflow technology with a typical lenslet size of 300 µm and array pitches of 350 µm/500 µm. These masters are replicated onto 8" glass wafer stacks with buried apertures and overall thickness of





[2] Mikrooptikwafer für Lichtfelddisplay.  
Micro-optics wafer for lightfield display.

#### Authors

Rohan Kundu  
Simone Thau  
Peter Dannberg  
Peter Schreiber

#### Contact

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

Die MLA mit einer typischen Lenslet-Größe von  $300\ \mu\text{m}$  und Array-Pitches von  $350\ \mu\text{m}/500\ \mu\text{m}$  werden mittels Reflow-Technologie gemastert und auf 8-Zoll-Glaswafer-Stacks mit vergrabenen Aperturlayern und einer Gesamtdicke von ca.  $2,5\ \text{mm}$  repliziert /1/. Die Aperturstrukturen des OMA und des Aperturarrays werden in Black-Matrix-Resist kopiert.

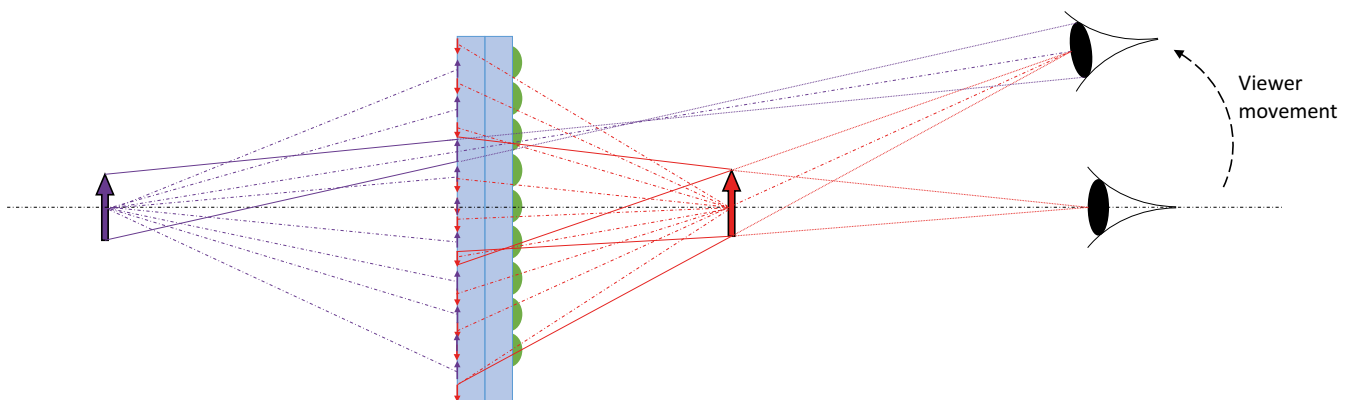
Weitere Anwendungen derartiger Lichtfeld-Displays sind z. B. vor einem Display schwebende, projizierte Tasten für berührungslöse Nutzerinterfaces oder die 3D-Darstellung von Zeichen oder Logos, z. B. durch Kfz-Rücklichtclustern.

about  $2.5\ \text{mm}$ . The aperture structures of the OMA and aperture array replicated into black matrix resist /1/.

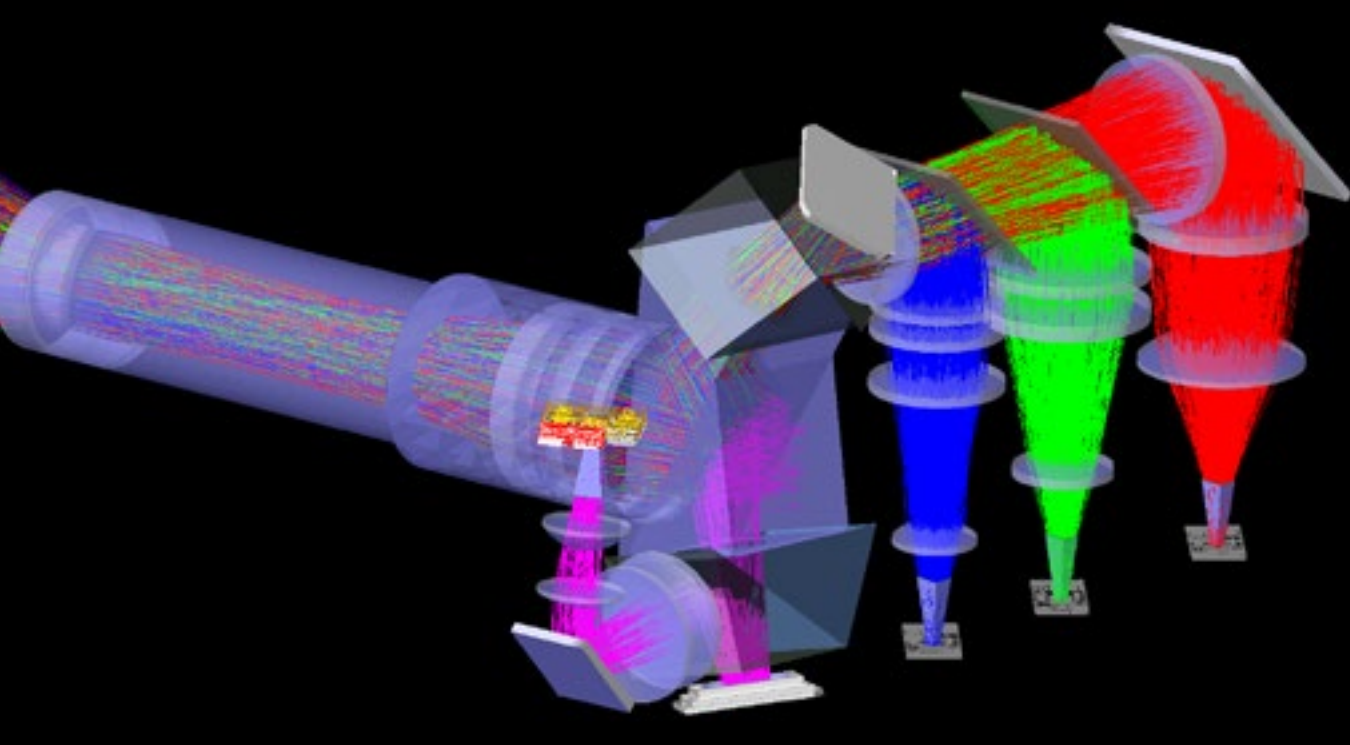
Further applications of such lightfield displays are e.g., projected buttons for touchless user interfaces floating in space in front of a display or in automotive rearlight clusters to introduce 3D effects to signs or logos displayed.

#### References / Literatur

/1/ P. Dannberg et al.: Wafer-level hybrid integration of complex micro-optical modules. Micromachines 5.2 (2014): 325-340. for space applications, EPJ Web Conf. Volume 215 (2019).



[3] Vereinfachtes Optikschemas des Lichtfelddisplays.  
Simplified working principle of lightfield display.



[1] Optisches Modell des Projektionssystems. Die visuellen Farbkanäle (links) sind entsprechend in ihren Farben dargestellt, der Strahlenverlauf im Nahinfrarotkanal ist pink eingefärbt.

Optical model of the projection system. The visual color channels (left) are shown accordingly in their colors, the beam path in the near-infrared channel is colored pink.

## Kombiniertes HighSpeed-VIS-NIR-Projektionssystem Combined high-speed VIS-NIR projection system

Um die Projektion von visuellen Informationen auf Objekten sinnvoll mit der gleichzeitigen Messung des Ortes und der Form dieser Objekte verbinden zu können, ist es erforderlich, die Messung in einem für das menschliche Auge unsichtbaren Spektralbereich durchzuführen. Ein Projektionssystem auf der Basis von DMD-Mikrodisplays (DMD = Digital Micromirror Device), das diese Aufgabe löst und die Farbprojektion (VIS) gleichzeitig mit der Projektion von Mustern zur 3D-Messung im unsichtbaren Nahinfrarotbereich (NIR) bei hoher Bildrate realisiert, wurde zu diesem Zweck im Rahmen einer deutsch-japanischen Kooperation entworfen und aufgebaut. Neben dem Fraunhofer IOF, das für Entwurf und Realisierung des optischen Systems zuständig war, waren die Chemnitzer Firma ViALUX sowie die japanischen Partner Tokyo Electron Device und Tokyo Institute of Technology beteiligt, die das übergeordnete Systemkonzept, die Elektronikkomponenten und die erforderliche Algorithmik realisierten.

Das Projektionssystem arbeitet mit je einem DMD-Mikrodisplay für den visuellen und den nahinfraroten Spektralbereich. Als Lichtquellen kommen Hochleistungs-LEDs zum Einsatz, deren Licht zunächst mittels eines Lichtleitstabes homogenisiert wird. Eine Beleuchtungsoptik bildet danach die gleichförmig ausgeleuchtete Endfläche des Lichtleitstabes auf das jeweilige DMD-Display ab. Im visuellen Kanal realisiert die Beleuchtungsoptik zugleich die Vereinigung der drei Farbkanäle Rot, Grün und Blau durch entsprechende

In order to combine projection of visual information onto objects with the simultaneous measurement of their position and shape, it is necessary to perform the measurement in a spectral range that is invisible to the human eye. In a joint Japanese-German co-operation, a projection system based on DMD microdisplays (DMD = digital micromirror device) was developed and built. It simultaneously projects images in the visible spectral range (VIS) and measurement patterns in the invisible near-infrared range (NIR) with a high frame rate. Together with Fraunhofer IOF, which was responsible for designing and realizing the optical system, Chemnitz-based company ViALUX, as well as Japanese partners Tokyo Electron Device and Tokyo Institute of Technology, were part of the project team and took care of the overall system concept, electronics, and development of the application software.

The projection system uses a dedicated DMD microdisplay for the visible and the near-infrared spectral range. High-power LEDs are used as light sources. The emitted light is first homogenized by a light integrator. After that, the illumination system images the homogeneous exit of the light integrator onto the respective DMD. In the visible channel, the illumination system also combines the three color channels red, green, and blue using beam splitters. After reflection on the DMD display, the visible and the near-infrared channel are combined with a specially designed beam splitter. Image projection is then performed through

### Author

Uwe Lippmann

### Contact

Dr. Christian Vetter  
Phone: +49 3641 807-193  
christian.vetter@  
iof.fraunhofer.de

Strahlteiler. Nach der Reflexion am DMD-Display werden der visuelle und der nahinfrarote Kanal über einen speziell entworfenen Strahlteiler überlagert und mittels einer ebenfalls speziell entworfenen gemeinsamen Projektionsoptik auf das Projektionsfeld abgebildet. Dabei werden Bildraten von mehr als 1000 Bildern pro Sekunde erreicht.

In der Anwendung wird das Projektionssystem von einer Nahinfrarotkamera ergänzt, die die für den Menschen unsichtbar projizierten Muster aufnimmt und damit die Berechnung des Ortes und der dreidimensionalen Form von Objekten im Projektionsfeld ermöglicht. Mit diesen Informationen kann der im sichtbaren Bereich projizierte Inhalt angepasst werden. Es ist so bspw. möglich, auf Objekte Bildinformationen zu projizieren und diese dem Objekt dynamisch anzupassen und mitzuführen. Das Bild erscheint somit wie ein fester Bestandteil der Oberfläche des bewegten Objektes. Zu den möglichen Nutzungsszenarien für das System gehören Augmented-Reality-Anwendungen, bei denen mehrere Personen reale Objekte mit zusätzlich überlagerten Informationen betrachten sollen, ohne dass dafür spezielle Videobrillen erforderlich sind.

a common and also specially designed projection lens. The system is able to project with a frame rate higher than 1000 frames per second.

In the application, a near-infrared camera is added that captures the invisible measurement patterns and allows for calculation of the position and three-dimensional shape of objects in the projection area. With this information, the visible content projected can be modified. For example, it is possible to project an image onto an object and adjust the image dynamically depending on the object's shape and to track the object's position with the image. The projected image thus appears like a part of the moving object's surface. Possible applications for this system include augmented reality, where multiple people can view real objects with additional overlaid information without the need for special video goggles.



[2] Optomechanischer Aufbau des Projektionssystems.  
Optomechanical structure of the projection system.



























Strategische Projekte  
Strategic projects

---

# Organisation Organization



INSTITUTE MANAGEMENT			ADMINISTRATION		
 <b>Director</b> Prof. Dr. Andreas Tünnermann	 <b>Deputy director</b> Dr. Ramona Eberhardt	 <b>Deputy director</b> Prof. Dr. Stefan Nolte	 <b>Administration</b> Elke Heuer	 <b>Marketing and coordination</b> 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					
 <b>Optical and Mechanical System Design</b> Dr. Robert Brüning	 <b>Micro- and Nanostructured Optics</b> Dr. Frank Burmeister		 <b>Opto-mechatronic Components and Systems</b> Dr. Erik Beckert		
 <b>Functional Surfaces and Coatings</b> Dr. Sven Schröder	 <b>Laser and Fiber Technology</b> Dr. Thomas Schreiber		 <b>Imaging and Sensing</b> Dr. Peter Kühmstedt		
STRATEGIC PROJECTS					
 <b>QuNET</b> Quantum secure IT infrastructure	 <b>Max Planck School of Photonics</b> Graduate school	 <b>AMI</b> RUBIN-Alliance	 <b>Quantifisens</b> RUBIN-Alliance	 <b>fo+</b> Regional growth core for freeform optics	

# Kuratorium Advisory committee



**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**

## Vorsitzender / Chair

- Dr. Michael Mertin / CeramTech Gruppe, Plochingen

## Mitglieder | Members

- Christian Amann / BMW Group, München
- Peggy Bärenklau / heracle GmbH, Jena
- Dr. Klaus Bartholmé / Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Petra Bogdanski / Mahr GmbH, Jena
- Robert Fetter / Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft, Erfurt
- Gabi Grützner / micro resist technology GmbH, Berlin
- Manfred Lieke / Manfred Lieke Consulting, Lindau
- Dr. Eveline Rudigier-Voigt / Schott AG, Mainz
- Dr. Christian Schmitz / TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen
- Prof. Dr. Thomas Stoehlker / Helmholtz-Institut Jena
- Joachim Stühler / Carl Zeiss SMT GmbH, Oberkochen
- Thomas Thöniß / Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG, Göttingen
- Dr. Werner Wilke / VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin
- Dr. Petra Wolff / Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn

## Ehrenmitglieder / Honorary members

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

# 2021 – Das Institut in Zahlen

## 2021 – The institute in figures

### Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2021 ist gegenüber dem Vorjahr um 1,8 % gestiegen, wobei die Aufwendungen für Personal um 3,2 % stiegen, die Sachausgaben konstant blieben. Basis ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag lag bei 15,5 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten 16,1 Millionen Euro.

### Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2021 wurden insgesamt 19,4 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

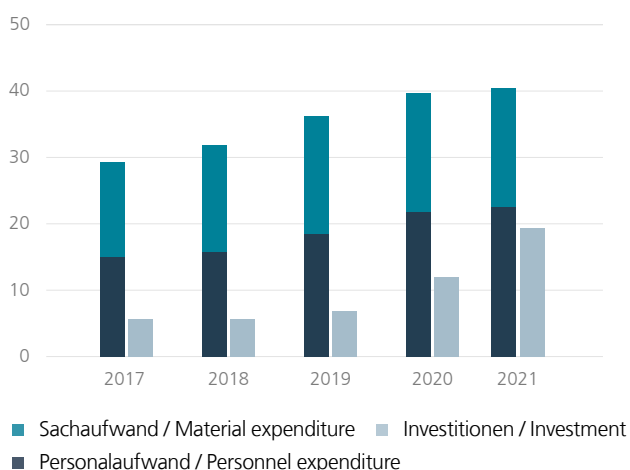
### Operating budget

Compared with the previous year the operating budget increased in 2021 by 1,8 %, with expenditures for staff grow by 3.2 % and material costs remain constant. The basis is still the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached more than 15.5 million euros. The received public funding also reached 16.1 million euros.

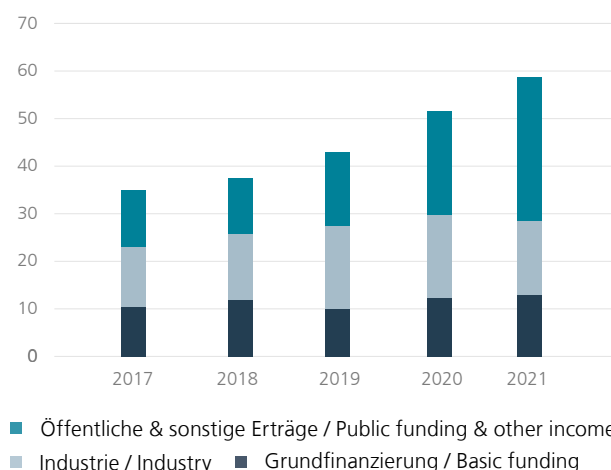
### Investments

The continuous investment in infrastructure is the necessary basis for the successful development of innovative solutions for our customers. A total of 19.4 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2021.

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



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





## Personal

Die Zahl der Mitarbeitenden des Fraunhofer IOF ist im Jahr 2021 um 2,8 % gestiegen. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Ernst-Abbe Hochschule Jena.

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

Die Mitarbeitenden des IAP konnten für 2021 Drittmittel in Höhe von 8,5 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2021 7 Professoren, 39 wissenschaftliche und 18 technische Mitarbeitende sowie 92 Promovierende und 80 Studierende. Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

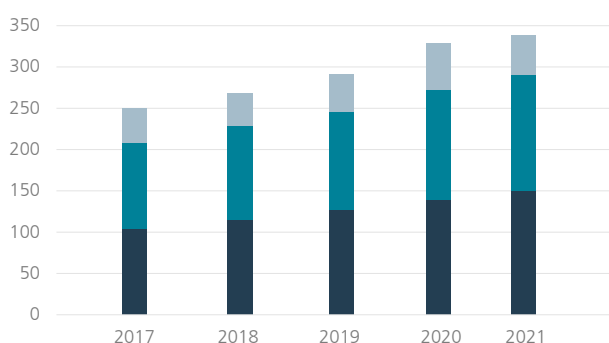
## Staff

The number of employees of the Fraunhofer IOF increased by 2.8 % in 2021. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher education, in particular the Friedrich Schiller University Jena and the Ernst-Abbe University Jena.

## 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 2021 (see table). A total staff of 7 professors, 39 research assistants, 18 technical assistants, 92 doctoral candidates, and 80 students were working at IAP in 2021. The majority of completed theses are listed in the attachment.

**Fraunhofer IOF Mitarbeitende / Staff (full-time equivalent)**



- Wissenschaftliches Personal / Scientific staff
- Technisches Personal / Technical staff
- SchülerInnen / StudentInnen / Pupils / Students

**IAP Drittmiteleinahmen IAP 2020 / Contract research revenue IAP 2020**

Fördergeber / Contracts with	Zuwendung   Funds   T€
BMBF	2.937
DFG	1.823
EU	0.553
Thüringen / Thuringia	1.269
Stiftungen / Foundations	0.615
Industrie / Industry	1.258



## 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) am Standort Erfurt besteht nun seit mehr als drei Jahren und versteht sich als Standort für kollaborative Forschung. Die Kooperation zwischen den drei Fraunhofer-Forschungsinstituten – den Instituten für Photonische Mikrosysteme IPMS, für Zelltherapie und Immunologie IZI sowie für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF – kann aufgrund der sehr guten labortechnischen Ausstattung sowie dem engen, wissenschaftlich-interdisziplinären Austausch mittlerweile auf gute erste Ergebnisse zurückblicken. Diese werden im Rahmen der Zwischenevaluation 2022 dargelegt werden. Damit steht für die Aufbauphase bis 2023 noch ein Jahr aus der paritätischen Anschubfinanzierung aus Mitteln des Freistaates Thüringen und der Fraunhofer-Gesellschaft zur Verfügung, um das Profil der Arbeiten am Projektzentrum, die gemeinsame Weiterentwicklung von Schlüsseltechnologien im Bereich der Optik und Photonik, Mikroelektronik, Biowissenschaften und künstlicher Intelligenz für die Überführung in biomedizinische Anwendungen zu schärfen und das Applikationslabor »Quantum Engineering« weiter auszubauen. Die Investitionen dienen dem Aufbau originärer wertschöpfender Infrastrukturen. Die Schwerpunktthemen der Forschung im MEOS umfassen automatisierte Montageverfahren und Systemintegration, nicht-invasive Diagnostik und die multimodale Datenanalyse.

The Fraunhofer Project Hub "Microelectronic and Optical Systems for Biomedicine" (MEOS) in Erfurt has now been in operation for more than three years and is a location for collaborative research. The cooperation between the three Fraunhofer research institutes – Photonic Microsystems IPMS, Cell Therapy and Immunology IZI, Applied Optics and Precision Engineering IOF – can now look back on good initial results thanks to the very good laboratory equipment as well as close and scientific interdisciplinary exchange. These results will be presented as part of the interim evaluation 2022. This means there is one more year until 2023, with funding from the Free State of Thuringia and the Fraunhofer-Gesellschaft to sharpen the profile the project center, the joint further development of key technologies in optics and photonics, microelectronics, life sciences and artificial intelligence for transfer to biomedical applications, and to further expand the application laboratory "Quantum Engineering". The investments will help to establish original value-adding infrastructure. Research focus areas at MEOS include automated assembly methods and system integration, non-invasive diagnostics, and multimodal data analysis.

In 2021, the third construction phase began with the S2 Biolab on approximately a sixth of the building footprint. Furthermore, it was possible to establish further labs for

Im Jahr 2021 begann der dritte Bauabschnitt mit dem Aufbau des S2-Biolabors auf circa einem Sechstel der Gebäudegrundfläche. Außerdem konnten ein weiteres Robotik- sowie ein Mikroskopie- und ein Biophotonisches Labor eingerichtet werden. Weiterhin konnte eine High-Five-Lithographieanlage im Reinraum in Betrieb genommen werden.

Auch in diesem Jahr konnten, trotz der herausfordernden SARS-COV-2-Pandemischen Situation mit deutlichen Kontakteinschränkungen, die aktuellen Forschungsergebnisse und Prototypen der drei Technologieplattformen »Strukturierte Beleuchtung«, »Advanced Imaging« und »Biofunktionale Oberflächen und Biosensorik« auf verschiedenen Messen, wie etwa den Fraunhofer Solution Days und der Compamed / Medica, präsentiert werden.

Zusammen mit Partnern innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft ist es in diesem Jahr gelungen, weitere Projekte einzuwerben. Von diesen haben die folgenden bereits ihre Arbeit aufgenommen: das Projekt Quantenhub (TAB), bei dem es um die Erarbeitung von Quantentechnologien für die Bildung geht; das Projekt MEMO (TAB) zur Realisierung eines miniaturisierten, mikroskopischen Echtzeitmonitorings von Organ-on-Chip-Modellen; das Projekt IMAGO (FhG Prepare), mit dem Ziel einer bildbasierten Sortierung von Einzelzellen in einem fluidischen Mikrosystem mit paralleler mikro-optischer Detektion sowie das Projekt MHLasQu (BMBF), bei dem der Fokus auf einer Faserpräparation und -montage für Pikosekunden-Quantenquellen mit externem Resonator liegt.

Im Jahr 2021 eingeworben und 2022 startend sind nachfolgende Projekte zu nennen: Rubin-AMI (BMBF), bei dem das sogenannte Advanced Multi-Modal Imaging adressiert wird; ATIQ (BMBF), bei dem eine Faserpräparation und -montage für Laseradressiereinheiten von Ionenfallen-Quantencomputer im Mittelpunkt stehen; sowie PhoQuant (BMBF), welches eine Faserpräparation und -montage für Hybridinterferometer photonischer Quantencomputer adressiert.

robotics, microscopy, and bio-photonics, as well as put a High-Five-lithography system into operation in the clean room.

Despite the challenging SARS-CoV-2 pandemic with significant contact restrictions, further advancements have been made this year. The current research results and prototypes of the three technology platforms "Structured Illumination", "Advanced Imaging", and "Biofunctional Surfaces and Biosensorics" were presented at various trade fairs, such as the Fraunhofer Solution Days and Compamed / Medica.

Together with partners inside and outside the Fraunhofer-Gesellschaft, we have succeeded in acquiring further projects this year. The following projects already started running: the project Quantum Hub (TAB), which focuses on the elaboration of quantum technologies for imaging; the project MEMO (TAB) for realization of a miniaturized, microscopic real-time monitoring of organ-on-chip models; the IMAGO (FhG Prepare) project, aiming at image-based sorting of single cells in a fluidic microsystem with parallel micro-optical detection; and the MHLasQu (BMBF) project, focusing on fiber preparation and assembly for picosecond quantum sources with external resonator.

Projects funded in 2021 and started in 2022 include the following: Rubin-AMI (BMBF), which addresses the so-called advanced multi-modal imaging; ATIQ (BMBF), which focuses on fiber preparation and assembly for laser addressing units of ion trap quantum computers; and PhoQuant (BMBF), which addresses fiber preparation and assembly for hybrid interferometers of photonic quantum computers.

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



## Photonics Days Jena 2021

**Netzwerkveranstaltung für Studierende der Optik und Photonik**  
Networking event for optics and photonics students

Ein Nobelpreisträger, zwei Förderpreise, 45 Programmpunkte, fast 50 Speaker und knapp 600 Teilnehmende aus aller Welt: Das waren die diesjährigen »Photonics Days Jena«. Das Karriere- und Netzwerkevent für Studierende und Promovierende im Bereich Optik und Photonik, organisiert vom Fraunhofer IOF und der Max Planck School of Photonics, stieß in seinem dritten Jahr mit einem hybriden Format auf breites internationales Interesse. Teilnehmende waren neben Deutschland vor allem aus Indien und den USA zugeschaltet.

Ziel der »Photonics Days Jena« ist die Vernetzung von jungen Talenten, um damit Innovationen und Karrierewege in den Bereichen Optik und Photonik zu fördern. Zu diesem Zweck bot das Event vom 29. bis 30. September mit einem bunten Programm aus Workshops, Vorträgen sowie einem Makeathon und einer Karrieremesse eine interaktive Plattform. Ein besonderes Highlight waren dabei die Keynotes von Nobelpreisträger Prof. Dr. Reinhard Genzel sowie von Dr. Heike Riel, Leiterin der Abteilung »Science & Technology« bei IBM sowie der IBM-Forschungsgruppe »Quantum Europe & Africa«. »Quantentechnologien sind ein heißes Thema«, rief Riel in

One Nobel Prize winner, two funding awards, 45 program points, almost 50 speakers, and nearly 600 participants from all over the world. This was 2021's "Photonics Days Jena". The career and networking event for students and doctoral candidates in the field of optics and photonics, organized by Fraunhofer IOF and the Max Planck School of Photonics, generated international interest in its third year with a hybrid format. Participants were connected not only from Germany but also mostly from India and the USA.

The aim of the "Photonics Days Jena" is to network young talents in order to promote innovations and career paths in the fields of optics and photonics. For this purpose, the event from September 29 to 30 offered an interactive platform with a colorful program of workshops, lectures as well as a makeathon and a career fair. Keynotes by Nobel Prize winner Prof. Dr. Reinhard Genzel and Dr. Heike Riel, head of the "Science & Technology" department at IBM as well as IBM's "Quantum Europe & Africa" research group, were a particular highlight. "Quantum technologies is a hot topic," Riel exclaimed to the young researchers in her presentation. "But there



ihrem Vortrag den Nachwuchsforschenden zu. »Aber es steht noch sehr viel Forschung aus!« Forschung, für die es kreative Köpfe und frische Ideen braucht.

Kreativität stand bei den »Photonics Days Jena« auch bei den zwei Förderpreisen im Fokus, die im Rahmen der Veranstaltung verliehen wurden: Beim Pitch um den »Hot-Stuff-Award«, vergeben vom Leistungszentrum Photonik, bewarben sich junge Forschende um eine finanzielle Förderung ihrer jeweiligen Projekte. Den ersten Platz holte sich Johannes Kretzschmar von der »Lichtwerkstatt Jena«. Als offenes Labor bietet die Lichtwerkstatt eine Plattform zum Basteln, Werkeln und Tüfteln für alle Fans der Optik und Photonik. Auch die Arbeit mit den zunehmend wichtigen Quantentechnologien soll hier verstärkt zugänglich gemacht werden. Kretzschmar und sein Team wollen daher künftig einen Open Source Single Photon Detector bereitstellen. Zur Förderung dieses Projektes stehen Kretzschmar nun 10.000 Euro Fördergeld vom Leistungszentrum Photonik zur Verfügung.

Darüber hinaus wurde der »Applied Photonics Award«, der Nachwuchspreis des Fraunhofer IOF, an die diesjährigen Preistragenden vergeben (siehe Seite 89).

is still a lot of research to be done!" Research that requires creative minds and fresh ideas.

Creativity was also the focus of the two funding awards presented during the event. In the pitch for the "Hot Stuff Award", presented by the "Center of Excellence in Photonics", young researchers applied for financial support for their respective projects. First place went to Johannes Kretzschmar from the "Lichtwerkstatt Jena". As an open laboratory, the Lichtwerkstatt offers all fans of optics and photonics a platform for tinkering. It will also make work with the increasingly important quantum technologies more accessible. Kretzschmar and his team therefore want to provide an open source single photon detector in the future. Kretzschmar now has 10,000 euros of funding from the Center of Excellence to support this project.

In addition, the "Applied Photonics Award", the Fraunhofer IOF young researcher award, was presented to this year's prize winners (see page 89).

*[1] Expert-Session bei den »Photonics Days Jena«.  
Expert session at the "Photonics Days Jena".*

*[2] Moderatorin Ulrike Brandt-Bohne mit dem virtuell  
zugeschalteten Prof. Dr. Reinhard Genzel.  
Host Ulrike Brandt-Bohne with the virtually connected  
Prof. Dr. Reinhard Genzel.*



**PHOTONICS  
DAYS JENA**

In cooperation with  
Max Planck School of Photonics



## Applied Photonics Award 2021

### Nachwuchspreis für Angewandte Photonik Young talent award for applied photonics

Sauberes Wasser, die Beseitigung von Weltraumschrott, neue Verfahren für die medizinische Endoskopie und stärkere Laser – auch 2021 wurden wieder innovative Abschlussarbeiten mit besonderem Bezug zur Angewandten Photonik mit dem Nachwuchspreis des Fraunhofer IOF, dem »Applied Photonics Award«, ausgezeichnet. Der Award wurde am 29. September im Rahmen der »Photonics Days Jena« von Nobelpreisträger Prof. Dr. Reinhard Genzel virtuell an die vier Preistragenden übergeben.

Der eine hat bereits den Nobelpreis für Physik, die anderen vielleicht noch so manche große Entdeckung vor sich: Im Rahmen der »Photonics Days Jena«, dem internationalen Karriere- und Netzwerkevent des Fraunhofer IOF und der Max Planck School of Photonics, überreichte Prof. Dr. Reinhard Genzel am 29. September virtuell den Nachwuchspreis des Fraunhofer IOF, den »Applied Photonics Award«, an die Gewinnerinnen und Gewinner.

Clean water, the elimination of space debris, new methods for medical endoscopy, and more powerful lasers – once again innovative theses with a special connection to applied photonics have been honored with the "Applied Photonics Award", the young researcher award by Fraunhofer IOF. The award was presented virtually to the four prize winners on September 29 by Nobel Prize Winner Prof. Dr. Reinhard Genzel as part of the "Photonics Days Jena".

One has already won the Nobel Prize in Physics, the others may still have many great discoveries ahead of them. As part of the "Photonics Days Jena", the international career and networking event of the Fraunhofer IOF and the Max Planck School of Photonics, Prof. Dr. Reinhard Genzel presented the Fraunhofer IOF's young researcher award, the "Applied Photonics Award", virtually to this year's winners on September 29.

Eine Fachjury, bestehend aus Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft, hatte die prämierten Arbeiten zuvor ausgewählt. Prämiert wurden insgesamt drei Abschlussarbeiten in den Kategorien Bachelor, Master/Diplom und Dissertation. Zusätzlich vergab die Jury einen Sonderpreis für besondere Anwendungspotenziale. Die Gewinnerinnen und Gewinner des Awards 2021 sind:

**Beste Bachelorarbeit (1.000 €)**

Katrin Bihr (Hochschule Furtwangen):  
»Tiefenmessung in endoskopischen 3D-Systemen«

**Beste Masterarbeit (2.000 €)**

Luise Hoffmann (Technische Universität Clausthal):  
»Herstellung und Charakterisierung von Femtosekunden-laser-legierten Nickelnetzelektroden für die alkalische Wasserelektrolyse«

**Beste Dissertation (3.000 €)**

Dr. Tobias Schnabel (Bauhaus-Universität Weimar):  
»Photokatalytischer Abbau von pharmazeutischen Mikro-schadstoffen an trägergebundenen Katalysatoren«

**Preis der Jury für besondere Anwendungspotenziale (1.500 €)**

Dr. Christoph Stihler (Friedrich-Schiller-Universität Jena):  
»Transverse mode instability - Insights into modal energy transfer in high-power fiber lasers«

A jury of experts consisting of representatives from science and industry had previously selected the award-winning theses. Awards were given in the categories Bachelor, Master/Diploma, and Doctoral Dissertation. In addition, a jury award was given for high potential for utilization and application. The winners of the 2021 awards are:

**Best Bachelor's Thesis (1,000 €)**

Katrin Bihr (Furtwangen University):  
"Depth measurement in endoscopic 3D systems"

**Best Master's Thesis (2,000 €)**

Luise Hoffmann (Clausthal University of Technology):  
"Manufacturing and characterization of femtosecond laser-alloyed nickel mesh electrodes for the alkaline water electrolysis"

**Best Dissertation (3,000 €)**

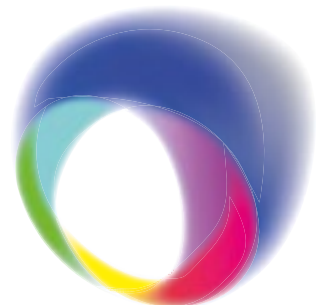
Dr. Tobias Schnabel (Bauhaus Universität Weimar):  
"Photocatalytic degradation of pharmaceutical micropollutants on supported catalysts"

**Jury award for high potential for utilization and application (1,500 €)**

Dr. Christoph Stihler (Friedrich Schiller University Jena):  
"Transverse mode instability - Insights into modal energy transfer in high-power fiber lasers"

*[1] Der Leiter des Fraunhofer IOF Andreas Tünnermann zusammen mit Nobelpreisträger Reinhard Genzel (digital zugeschaltet) und den glücklichen Preistragenden des Applied Photonics Award 2021: Katrin Bihr, Christoph Stihler, Luise Hoffmann und Tobias Schnabel (v.l.n.r.).*

*The director of Fraunhofer IOF Andreas Tünnermann together with Nobel laureate Reinhard Genzel (digitally connected) and the lucky winners of the Applied Photonics Award 2021: Katrin Bihr, Christoph Stihler, Luise Hoffmann and Tobias Schnabel (from left to right).*



**APPLIED  
PHOTONICS  
AWARD**



## Digital Innovation Hub Photonics (DIHP)

### DIHP etabliert sich in der Gründungsszene DIHP establishes itself in the start-up scene

2021 war wieder ein ereignisreiches Jahr, was die Gründungsaktivitäten in Optik und Photonik betrifft. So gab es im DIHP-Umfeld zwei Gründungen: die Quantum Optics Jena GmbH (QOJ) aus dem Fraunhofer IOF und die XSight Optics GmbH (XSight) aus dem Institut für Angewandte Physik der Universität Jena (IAP).

Auch bei den jährlichen DIHP Elevator Pitches wurden drei innovative Entwicklungsprojekte mit einem umfangreichen Forschungsbudget gefördert. Der erste Platz ging an das Ideenteam der spectō photonics Srl. aus Mailand, gefolgt von QOJ und IDLoop aus Jena.

Diese DIHP-Teams und solche aus früheren Pitches entwickelten sich prächtig und konnten zusätzliche Aufmerksamkeit und Fördermittel erhalten. So wurde IDLoop im Herbst für das regionale Accelerator-Programm TRIP ausgewählt und unser Fraunhofer IOF Spin-Off SPACEOPTIX GmbH (SPX) konnte am Ende ihres TRIPs bei den Thüringer Investor Days pitchten. Zudem wurde die SPX als 6. (von 50) der vielversprechendsten Startups in Deutschland gelistet. Ein weiteres Team nahm am Accelerator-Programm Fraunhofer AHEAD teil. Zudem waren

2021 was again an eventful year in terms of start-up activities in optics and photonics. We had two incorporations, one was Quantum Optics Jena GmbH (QOJ) from Fraunhofer IOF and one from the Institute of Applied Physics (IAP), XSight Optics GmbH (XSight).

In addition, in the annual DIHP Elevator Pitches, three innovative development projects were funded with an extensive research budget. The first place was awarded to the idea team of spectō photonics Srl. from Milan, followed by QOJ and IDLoop from Jena.

These DIHP teams and those from previous pitches developed well and were able to gain additional attention and funding. For example, IDLoop was able to enter the regional accelerator program TRIP in the fall and our Fraunhofer IOF spin-off SPACEOPTIX GmbH (SPX) was able to pitch at the Thuringian Investor Days at the end of their TRIP journey. Further, SPX was listed as the sixth of the most promising 50 startup in Germany. Another team participated in the Fraunhofer AHEAD accelerator program. ROBUST AO GmbH not only successfully competed in the Thuringian technology



die Teams in verschiedenen Wettbewerben erfolgreich. Die ROBUST AO GmbH hat nicht nur am Thüringer Technologie-wettbewerb »getstarted2gether« teilgenommen und 200.000 Euro für die Prototypenentwicklung erhalten, sondern auch den 1. Platz des ThEx Award 2021 gewonnen.

Ebenso konnte ROBUST AO erfolgreich in die nächste Entwicklungsphase eintreten, indem es Risikokapital von der beteiligungsmanagement thüringen gmbh (bm-t) und dem Fraunhofer Technology Transfer Fund GmbH (FTTF) erhalten hat. Diese Investoren sind auch bei QOJ an Bord, ergänzt durch die ELAS Technologies Investment GmbH. Auch XSight konnte mit der X Life Science AG einen strategischen Investor gewinnen.

Ein besonderes Highlight im Jahr 2021 war die Forschungs-kooperation zwischen den Fraunhofer-Instituten IOF und EMI und ihren jeweiligen Spin-Offs und DIHP-Pitch-Gewinnern SPACEOPTIX und ConstellR. Gemeinsam entwickelten sie einen Teleskop-Prototyp mit Metalloptiken, der seit Februar 2022 auf der ISS getestet wird.

Zur Sensibilisierung für das Thema Entrepreneurship wurden im DIHP regelmäßig Vorträge und Workshops über unternehmerisches Denken und Handeln gehalten, z. B. im Rahmen der Spring School der Max Planck School of Photonics oder in Kooperation mit »Young Entrepreneurs in Science«. Des Weiteren konnten der ehemaligen Trainer der deutschen Hockey-Nationalmannschaft der Herren und zweifachen Olympiasieger, Stefan Kermas, für gemeinsame Workshops zur Teamentwicklung im Rahmen des TRIP-Programms gewonnen werden. Im Jahr 2022 geht es weiter.

Es gab auch einen großen Meilenstein für den DIHP selbst: Die Einwerbung von 1,2 Mio. Euro vom Freistaat Thüringen (TMWWDG) und von der Thüringer Aufbaubank (TAB) ermöglicht die Weiterentwicklung des Digital Innovation Hub Photonics (DIHP+). Das heißt, in den Jahren 2022 und 2023 werden wir versuchen die Erfolge fortzusetzen, und zwar in einem Konsortium mit dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien (Leibniz-IPHT), dem Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (Leibniz-HKI), dem Helmholtz-Institut Jena (HI-J) und dem Abbe Center of Photonics (ACP) der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

competition getstarted2gether and won 200,000 EUR for prototype development, but also won the ThEx Award 2021.

ROBUST AO was also able to successfully enter the next phase of its development by raising capital, with venture capital from beteiligungsmanagement thüringen gmbh (bm-t) and Fraunhofer Technology Transfer Fund GmbH (FTTF). These investors are also on board with QOJ, supplemented by ELAS Technologies Investment GmbH. XSight was also successful with a strategic investor, X Life Science AG.

A special highlight in 2021 was the cooperation between the Fraunhofer Institutes IOF and EMI and their respective spin-offs and DIHP pitch winners SPACEOPTIX and ConstellR. They jointly developed a telescope prototype with metal optics, which is being tested on the ISS since February 2022.

In terms of entrepreneurship sensitization, we frequently held lectures and workshops on topics of entrepreneurial thinking and acting, e.g., during the Spring School of the Max Planck School of Photonics or in cooperation with the "Young Entrepreneurs in Science" program.

Last but not least, the acquisition of 1.2 million euros from the State of Thuringia (TMWWDG) and the Thüringer Aufbaubank (TAB) allowed the further development of the Digital Innovation Hub Photonics (DIHP+) to continue the journey in 2022 and 2023 in a consortium together with the Leibniz Institute of Photonic Technologies (IPHT), the Leibniz Institute for Natural Product Research and Infection Biology – Hans Knöll Institute (HKI), the Helmholtz Institute Jena (HI-J), and the Abbe Center of Photonics (ACP) of the Friedrich Schiller University Jena.

#### Contact

Dr. Sebastian Händschke

Phone: 03641 807 257

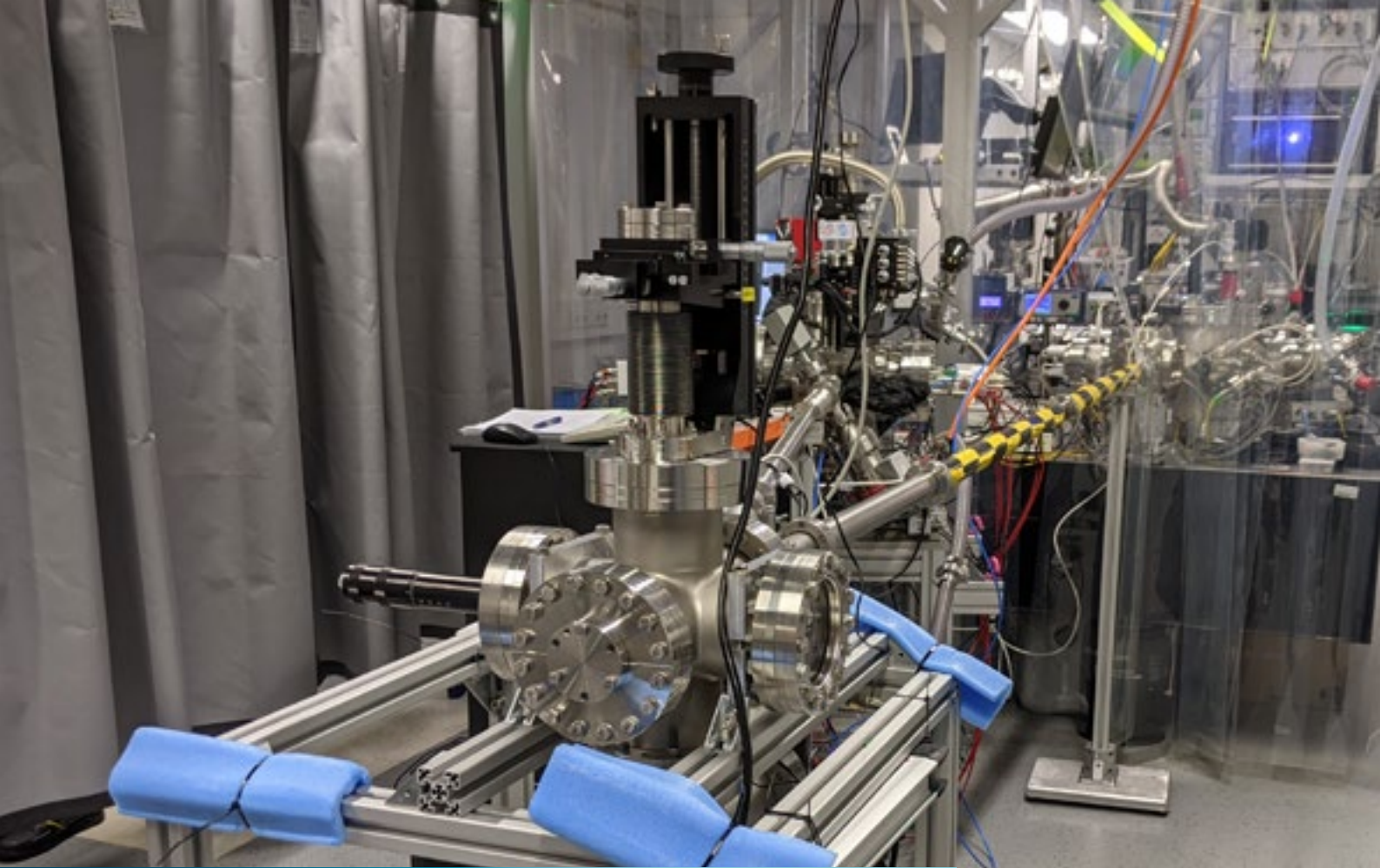
sebastian.haendschke@iof.fraunhofer.de

[www.innohub-photonics.de](http://www.innohub-photonics.de)

*[1] Was braucht es, um Unternehmerin und Unternehmer zu werden – Antworten der Workshop-Teilnehmer der MPSP-Frühjahrsschule.*

*What does it need to become an entrepreneur – answers by the workshop participants at MPSP spring school.*





## Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources CAPS

---

### **CAPS treibt Entwicklung modernster Hochleistungs- Ultrakurzpuls-Laserquellen voran**

CAPS drives development of state-of-the-art high-power  
ultrashort pulse laser sources

Das Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources (CAPS) ist 2018 als Zusammenschluss von 13 Fraunhofer-Instituten mit herausragender Expertise in den Bereichen Strahlquellen-Entwicklung, Systemtechnik und Applikationen ins Leben gerufen worden. Ziel des Clusters ist es, Hürden bei der Entwicklung und Kommerzialisierung neuartiger Anwendungen von ultraschnellen Laserquellen mit hoher Durchschnittsleistung zu minimieren, indem die Synergien zwischen den Partnern effizient genutzt werden.

Die Vision des Clusters ist es dabei, mit Ultrakurzpulslasern sowie einer angepassten, neuartigen Systemtechnik, in eine völlig neue Leistungsklasse vorzustoßen. Auf diese Weise sollen

CAPS, the Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources, started in 2018 and is a consortium of 13 Fraunhofer Institutes with expertise in laser source development, system technology, and applications. It aims to minimize hurdles in the development and commercialization of novel applications of high average power ultrafast laser sources by efficiently utilizing synergies between the partners.

The vision of the cluster is to lift ultrashort pulse lasers and the corresponding system technology to a new power level and thus enable applications with unprecedented rates and precision. CAPS strives to be the world-leading platform for cutting-edge high power ultrashort pulse laser sources and

industrielle und wissenschaftliche Hochraten-Anwendungen mit noch nie dagewesener Präzision definiert werden können. CAPS hat den klaren Anspruch, die weltweit führende Plattform für modernste Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Laserquellen zu sein, und zielt darauf ab, bahnbrechende Innovationen in der Lasertechnologie aus der Fraunhofer-Gesellschaft heraus und in enger Zusammenarbeit mit europäischen High-Tech-Unternehmen zu ermöglichen.

Möglich wird dies durch die strategische Entwicklung von Grundlagen für eine neue Klasse von Lasersystemen und der damit korrespondierenden Systemtechnik. In der ersten Phase des Clusters (2018-2020) lag der Fokus zunächst auf der Strahlquellenentwicklung. So konnten die Kerninstitute – das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF sowie das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT – in enger Zusammenarbeit Ultrakurzpuls-Laser mit mehr als 10 kW mittlerer Leistung sowie kohärente Quellen im XUV-Spektralbereich mit Rekordwerten hinsichtlich des Photonenflusses entwickeln. Darüber hinaus wurden zwei Applikationslabore in Betrieb genommen, die den Partnern im Cluster, aber auch externen Institutionen, die Möglichkeit geben, mit weltweit einzigartigen Laserquellen ihre jeweiligen Anwendungen voranzutreiben. Hierauf liegt der Schwerpunkt der zweiten Phase des CAPS Clusters (2021-2022). Die Erschließung des XUV-Bereiches mit hohen Photonenzahlen eröffnet neue Anwendungsfelder etwa in der Materialforschung, den Lebenswissenschaften sowie der Erforschung neuartiger Energiespeicher oder der Grundlagenforschung.

Das Bild zeigt eine erste Messkampagne im Applikationslabor am Fraunhofer IOF in Jena. Hier wurden von Kolleginnen und Kollegen des Helmholtz-Zentrums DESY die außergewöhnlichen Parameter einer lasergesteuerten XUV-Quelle genutzt, um die ultraschnelle Ionisierungsdynamik aufzudecken.

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

aims to enable disruptive innovations in laser technology within the Fraunhofer-Gesellschaft and in close collaboration with European high-tech companies.

This is enabled by strategic developments of a novel class of laser systems and the corresponding system technology. In the first phase of the cluster (2018-2020), laser sources development was a key focus. Thus, the core institutes – Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF as well as the Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT – have developed ultrashort pulse lasers with average power exceeding 10 kW and coherent laser sources with record flux in the XUV. In addition, two application labs have been setup and put into operation, which allows members of the cluster and external partners to explore their applications with world-unique laser sources. These applications will be the focus of the second phase of the CAPS Cluster (2021-2022). For example, high photon flux laser sources in the XUV will open up new application fields in material science, life sciences, energy research, and fundamental research.

The image shows a first measurement campaign in the application lab at Fraunhofer IOF. Here, colleagues at the Helmholtz-Center DESY used the extraordinary parameters of a laser-driven XUV source to reveal ultrafast ionization dynamics.

*[1] Impressionen der allerersten Messkampagne im Jenaer CAPS Applikationslabor am Fraunhofer IOF. Zu Gast war ein Forschungsteam des renommierten Helmholtz-Zentrums DESY. Impressions from the very first application beam time at the CAPS application laboratory at Fraunhofer IOF with researchers from the Helmholtz-Center DESY.*



## Photonics Manager Compact

**Erfolgreicher Start der internationalen Weiterbildung**  
Successful start of the international professional development program

Erstmals im September 2021 fand das einwöchige internationale Weiterbildungsprogramm »Photonics Manager Compact« am Fraunhofer IOF statt, in dem Führungskräfte zu Trends und Zukunftsthemen der Photonik weitergebildet wurden. Mit Projektunterstützung über die Fraunhofer Academy (München) konnte ein umfassendes Programm entwickelt werden, das ein neues jährliches Austauschformat zur Vernetzung zwischen Forschung und Industrie hervorgebracht hat.

Um Führungskräfte der Photonik optimal auf die aktuellen Herausforderungen im Business vorzubereiten, sah das Konzept zum »Photonics Manager Compact« insbesondere einen Mix aus 3-tägigem Input zu »Future of Photonics« und einem 2-tägigem Input zu »Future of Leadership« vor.

Future of Photonics: Im Rahmen des Kerns der Weiterbildung informierten namhafte Experten aus dem Fraunhofer IOF, unterstützt durch das Institut für Angewandte Physik der Universität Jena (IAP), zu Trends und Zukunftsthemen der Photonik, insbesondere zu Märkten der Photonik: Ultrakurzpulslasern, Lasertechnologien, mikrostrukturierten optischen Komponenten, Quantenkommunikation und Quantenbildgebung, funktionalen Oberflächen und Beschichtungen, Design

The one-week international professional development program "Photonics Manager Compact" took place in September 2021 for the first time. The program provides advanced training for managers on trends and future topics in photonics. With project support from the Fraunhofer Academy (Munich), it was possible to develop a comprehensive program that not only fulfilled a socially significant mission for the further development of companies, but has also produced a new annual exchange format for networking research and industry.

In order to best prepare photonics managers for the current challenges in business, the concept of the "Photonics Manager Compact" specifically provides a mix of a three-day input on the "Future of Photonics" as well as a three-day input on the "Future of Leadership".

Future of Photonics: At the training's core, renowned experts from Fraunhofer IOF, supported by the Institute of Applied Physics at the University of Jena (IAP), will provide information on trends and future topics in photonics, in particular photonics markets: ultrafast lasers, laser technologies, microstructured optical components, quantum communication and quantum imaging, functional surfaces and coatings, freeform



von Freiformkomponenten, optischen Messtechniken sowie zu optischen Systemen. Zur Veranschaulichung und Vertiefung erhielten die Teilnehmenden Laborführungen über die ganze Breite der Thematik.

**Future of Leadership:** Abgerundet wurde die Weiterbildung durch die ergänzende Behandlung von Themen zur Führung und Organisationsentwicklung, welche neue Perspektiven für Personen mit Führungsaufgaben und Entscheidungsbefugnis eröffnen. Innovationsforscher und Coach Dr. Reinhold Pabst übernahm im ersten Jahr die Durchführung dieses Weiterbildungsbereichs.

Neben dem fachlichen Input ergänzte ein umfassendes Rahmenprogramm die Weiterbildung, das einen intensiven Austausch zwischen den Teilnehmenden und Referenten ermöglichte. Nach der pandemiebedingten Verschiebung konnte die Weiterbildung wie angestrebt in Präsenz in Jena – unter hohen Hygieneauflagen (u. a. tägliche Selbsttests) – durchgeführt werden und war mit der reduzierten Gruppengröße von 15 Personen im ersten Durchgang bereits ausgebucht. Die Teilnehmenden kamen dabei nicht nur aus Thüringen und Deutschland, sondern auch aus angrenzenden Ländern, wie Polen, Österreich und den Niederlanden.

surface design, optical metrology, and optical systems.

**Future of leadership:** The training is rounded off by the complementary treatment of topics on leadership and organizational development, which open up new perspectives for entrepreneurs and decision-makers. Innovation researcher and coach Dr. Reinhold Pabst has taken over the implementation of this part of the training in the first year.

In addition to the technical input, the development program is supplemented by an extensive supporting program that enables an intensive exchange between participants and speakers. Following the postponement due to the pandemic, the program took place in Jena as planned – under strict hygiene conditions (including daily self-tests) – and was already fully booked in the pilot status with a reduced number of participants (15). The participants came not only from Thuringia and Germany, but also from neighboring countries such as Poland, Austria, and the Netherlands.

[1] *Teilnehmende Photonics Manager Compact.*  
*Participants Photonics Manager Compact.*



fo<sup>+</sup>

## FREEFORM OPTICS PLUS FREE YOUR MIND – FORM YOUR OPTICS

Der regionale Wachstumskern *fo<sup>+</sup>* [freeform optics plus] wird – mit einer etwa einjährigen Projektverlängerung aufgrund der pandemischen Lage – 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 entwickelt 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.

Die in der Region etablierte Technologieplattform »Freiformoptik« mit den Komponenten »Design«, »Material«, »Bearbeitung«, »Beschichtung«, »Strukturierung« und »Systeme« wird für Anwendungen im sichtbaren Spektralbereich sowie im Hinblick auf Replikations-, Segmentierungs-, Referenzierungs- und Messtechnikmethoden erweitert und anhand von Demonstratoren auf Komponenten- und Systemebene validiert.

Im dritten Projektjahr lud das Bündnis Personen aus den Bereichen Forschung, Entwicklung und Produktmanagement auf der Suche nach neuen Standards, anspruchsvollen Lösungen und exzellenter Performance im Rahmen der virtuellen

The regional growth core *fo<sup>+</sup>* [freeform optics plus] is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in a second research phase from August 2018 to July 2022 with an project extension of approximately one year due to the pandemic. The alliance of nine leading photonics companies and two renowned research institutes is developing 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.

The technology platform with the components "design", "materials", "processing", "coating", "structuring", and "systems" established in the region is being expanded for applications in the visible spectral range as well as for replication, segmentation, referencing, and metrology methods. The holistic process chain will be validated by demonstrators at component- and system level.

In the third year of the project, the alliance invited researchers, developers, and product managers looking for new standards, sophisticated solutions, and excellent performance to four application-related information events as part of the virtual workshop series "follow the light":



Workshop-Reihe »follow the light« zu vier anwendungsbezogenen Informationsveranstaltungen ein:

- Episode 1: Skipping Limits – Freeform Optics for Autonomous Industrial Applications,
- Episode 2: Shaping the Future – Freeform Optics for Laser Material Processing,
- Episode 3: Analyzing the Spectrum – Freeform Optics for Measuring Applications and Measuring of Freeforms,
- Episode 4: Optical Coatings for Freeform Optics – mit Beteiligung des Fraunhofer IOF.

Weiteres Highlight war die *fo+* Präsentation auf dem UPM-Workshop 2021 in Changchun, China. Das Fraunhofer IOF präsentierte als Koordinator der Forschungs- und Entwicklungsbereiche des Verbundes unter anderem Ergebnisse zu Design und additiver Fertigung eines topologieoptimierten Teleskopsystems mit ultrapräzisen Freiformspiegeln aus Metall.

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

- Episode 1: Skipping Limits – Freeform Optics for Autonomous Industrial Applications,
- Episode 2: Shaping the Future – Freeform Optics for Laser Material Processing,
- Episode 3: Analyzing the Spectrum – Freeform Optics for Measuring Applications and Measuring of Freeforms,
- Episode 4: Optical Coatings for Freeform Optics – with participation of the Fraunhofer IOF.

Another highlight was the *fo+* presentation at the UPM workshop 2021 in Changchun, China. Fraunhofer IOF, as the R&D coordinator of the alliance, presented, among other things, results on the design and additive manufacturing of a full-metal topology-optimized telescope system with ultra-precise freeform mirrors.

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

[1] Studien zur additiven Fertigung von Gehäusen für Freiformoptiken.

*Studies on additive manufacturing of housings for free-form optics.*



## AMI

---

### Advanced Multimodal Imaging

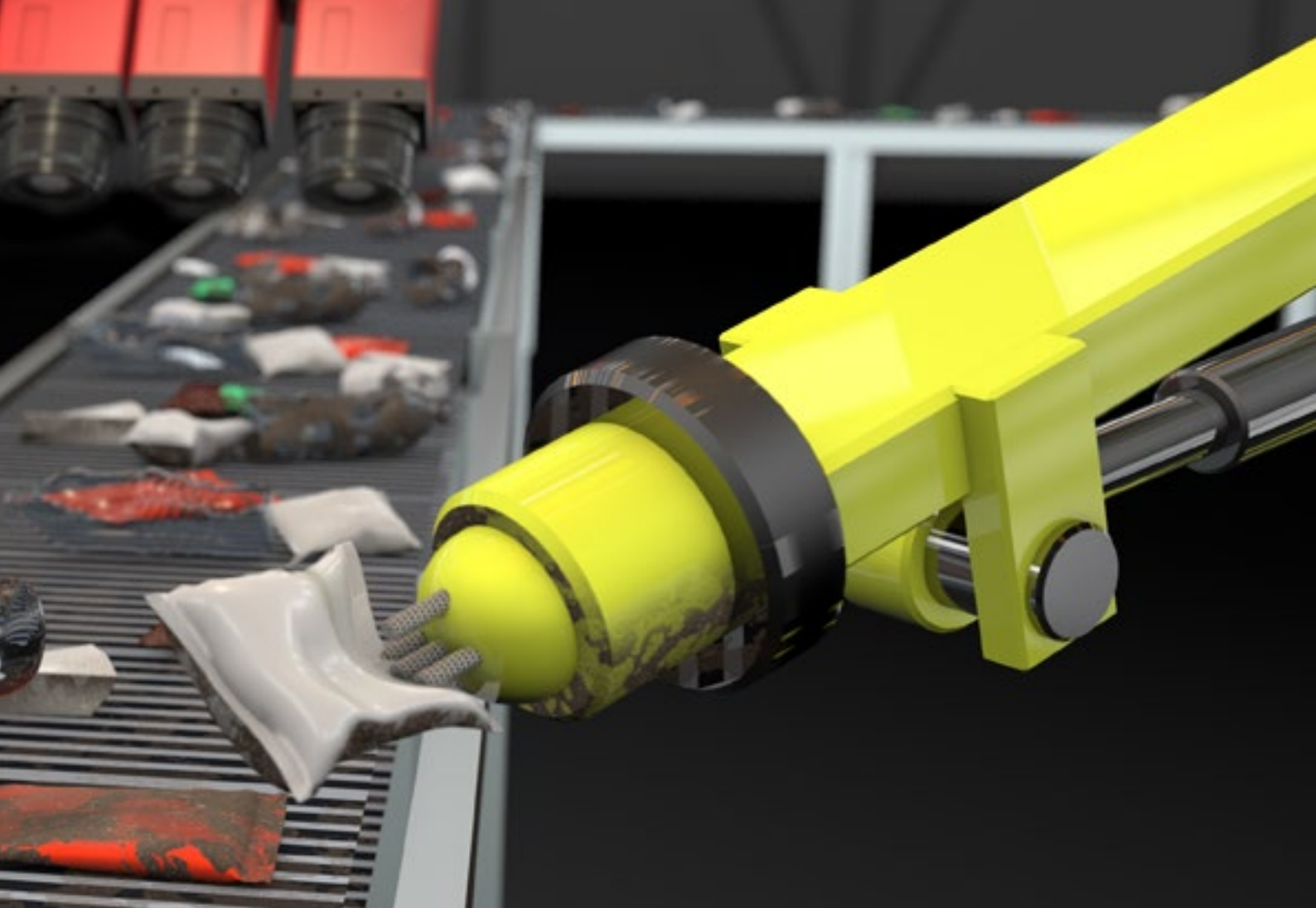
Das Bündnis Advanced Multimodal Imaging (AMI) wird zum 1.4.2022 offiziell starten und für 3 Jahre zusammen mit 13 Partnern aus der Thüringer Wirtschaft und Forschung bzw. Sachsens sich den Bereichen der multimodalen Bildgebung und deren Anwendung widmen. Die Grundlage hierfür wird durch die Entwicklung flexibler multimodaler Bildgebungsmethoden gegeben, welche durch die Kombinationen von unterschiedlichen Spektralbereichen – dem ultravioletten (UV), visuellen (VIS), Nah- (NIR) über den kurzwelligen (SWIR) bis hin zum langwelligen Infrarotbereich (LWIR) – charakterisiert sind. Die Verknüpfung der Wellenlängen-abhängigen Bildinformationen mit Echtzeit-3D-Daten liefert im Ergebnis eine erweiterte Objekt- und Szenenbeschreibung und bildet die Schlüsseltechnologie für die anvisierten Zukunftsmärkte.

Die Bündnisregion ist hauptsächlich in Mittel- und Südthüringen mit den Schwerpunkten Ilmenau, Suhl, Weimar und Jena angesiedelt. Der traditionell gewachsene Optik-Standort Thüringen hat sich in den letzten Jahren zu einem wesentlichen Zentrum der deutschen Photonikindustrie

The Advanced Multimodal Imaging (AMI) alliance will officially begin on 1.4.2022 and will be dedicated to the field of multimodal imaging and application, for a duration of three years. The alliance will be formed by 13 partners from the economy and research sectors of Thuringia and Saxony. The basis of the project will involve the development of flexible multimodal imaging methods, which are characterized by the combinations of different spectral ranges: from the ultraviolet (UV), visual (VIS), near-infrared (NIR) to the short-wave (SWIR) and the long-wave infrared range (LWIR). Combining the wavelength-dependent image information with real-time 3D data provides an enhanced object and scene description and forms the key technology for the targeted future markets.

The alliance is mainly located in central and southern Thuringia, with a focus on Ilmenau, Suhl, Weimar, and Jena. With its strong optics tradition, Thuringia has developed in recent years into an essential center of the German photonics industry and the AMI alliance is pursuing the goal of supporting and shaping this development through various individual projects.





entwickelt und das AMI-Bündnis verfolgt das Ziel, diese Entwicklung durch verschiedene Einzelprojekte zu stützen und zu prägen.

Dies erfolgt in drei Verbundprojekten. Erste geplante Produkte in den spezifischen Zielmärkten sind:

- ein sortenreines Rücknahmesystem für den Einzelhandel (Erkennungs- und Unterscheidungseinheit für unterschiedliche Kunststoffarten für Rücknahmesysteme mit roboterbasierter Sortierung),
- ein Analysegerät für Bauschuttzyklate sowie
- ein miniaturisierter kontaktlos arbeitender Vital- und Aktivitätssensor.

There are three collaborative projects. The first planned products in the specific target markets are:

- a sorting return system for the retail trade (recognition and differentiation unit for different types of plastics for return systems with robot-based sorting);
- an analyzer for demolition waste recycling;
- and a miniaturized sensor for contactless monitoring of vital signs and activity.

[1] *Visualisierung eines Anwendungsszenarios.*  
*Visualization of an application scenario.*



# Quantifisens

## Quanteninspirierte, omnifunktionale Fasersensorsysteme Quantum-inspired, omnifunctional fiber sensor systems

Die RUBIN-Initiative QUANTIFISENS ›the sensing [r] evolution‹ ist ein regionales Bündnis aus elf Industrieunternehmen und zwei Forschungseinrichtungen und wird ab April 2022 eine ›Quanteninspirierte, omnifunktionale Fasersensorplattform‹ aufbauen, um angepasste vollintegrierte Sensorlösungen für breite Einsatzgebiete in unterschiedlichen Märkten zur Verfügung zu stellen und langfristig Entwicklungen der Quantentechnologien für einen nachhaltigen Innovationssprung der Fasersensorik zu ermöglichen.

Adressiert werden technologische Herausforderungen auf dem Gebiet der Quantensensorik durch das Zusammenführen der Kompetenzen in den Bereichen faseroptischer Sensorik, quantentechnologischer Konzepte sowie innovativer Software zur Datenerfassung, -auswertung und -visualisierung, was langfristig zu einer signifikanten Verbesserung der Funktionalität und Anwendbarkeit von faseroptischen Sensoren führt.

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.

The RUBIN initiative QUANTIFISENS ›the sensing [r] evolution‹ is a regional alliance of eleven industrial companies and two research institutions and will set 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.

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 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.

The aim is to solve complex problems, e.g., from medical imaging or digital infrastructure monitoring.



Ziel ist die Lösung komplexer Fragestellungen z. B. aus der medizinischen Bildgebung oder digitalen Infrastrukturüberwachung.

Die Kooperation erfolgt auf fünf Themengebieten:

- Optische Fasertechnologie
- Streuungsbasierte Messtechnik
- Quanten- und Lasertechnologie
- Software und Data Analysis
- Omnifunktionale Systemintegration

Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF ist der Koordinator der Forschungs- und Entwicklungsbereiche des Verbundes und entwickelt in der dreijährigen Projektphase eine omnifunktionale Fasertechnologie, maßgeschneiderte Lasersysteme zur verbesserten Auflösung in verteilter Fasersensorik als auch Quellen für Quantenbildgebende Fasersensorik.

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

The cooperation takes place in five subject areas:

- Optical fiber technology
- Scatter-based measurement technology
- Quantum and laser technology
- Software and data analysis
- Omnifunctional system integration

The Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF is the R&D coordinator of the alliance and develops 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.

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





## More space for research

### Grundsteinlegung für neues Forschungsgebäude Foundation stone laid for new research building

Das Fraunhofer IOF bekommt ein neues Forschungsgebäude. Mit zusätzlichen Labor- und Reinraumflächen wird auf dem Jenaer Beutenberg Campus Platz für neue Forschungsarbeiten geschaffen, insbesondere in wichtigen Zukunftsfeldern wie den Quantentechnologien. Am 15. Juli 2021 erfolgte die feierliche Grundsteinlegung mit ausgewählten Vertretern aus Politik und Wissenschaft.

Innovative Ideen brauchen Raum, um sich zu entwickeln und zu großen Dingen heranzuwachsen. Mit dem neuen Erweiterungsbau stehen dem Fraunhofer IOF auf einer Fläche von mehr als 2.000 m<sup>2</sup> künftig neue Labore und Büroräume in direkter Nachbarschaft zu den bisherigen Gebäudeteilen des Instituts zur Verfügung.

Der mittlerweile dritte Erweiterungsbau des Forschungsinstituts ist damit ein wichtiger strategischer Schritt für dessen

Fraunhofer IOF will soon have a new research building. The additional laboratory and clean room space will create novel possibilities for new research work at the Beutenberg Campus in Jena, especially in important future fields such as quantum technologies. On July 15, 2021, the ceremony of laying the foundation stone took place with selected representatives from politics and science.

Innovative ideas need space to develop and grow into great things. With this new extension, Fraunhofer IOF will gain new laboratories and office space on an area of more than 2,000 m<sup>2</sup> in the direct vicinity of the institute's previous buildings.

The third extension of the research institute is an important strategic step for its future. The additional laboratory and clean room space will be used in particular to advance

Zukunft. Denn auf den zusätzlichen Labor- und Reinraumflächen sollen insbesondere relevante Zukunftsthemen wie die Quantentechnologien vorangetrieben werden. Hier ist in den kommenden Jahren ein wachsendes Forschungsvolumen zu erwarten. Schon heute ist das Institut in umfangreiche Projekte zur hochsicheren Quantenkommunikation, zur Hardware-Entwicklung für leistungsstarke Quantencomputer sowie in quantenbasierte Bildgebungsverfahren z. B. zur medizinischen Diagnostik involviert.

»Das stetige Streben nach neuen und weltweit bedeutsamen technologischen Erkenntnissen beeindruckt mich«, erklärte Thüringens Ministerpräsident Bodo Ramelow bei der feierlichen Grundsteinlegung. Auch Thüringens Wissenschaftsminister Wolfgang Tiefensee erwartet von der Institutserweiterung starke Impulse für Forschung und Wirtschaft im Freistaat: »Thüringen ist auch dank des Fraunhofer IOF einer der bundesweit führenden Standorte im Bereich der Quantentechnologien und der Quantenkommunikation«, so der Minister.

Der neueste Erweiterungsbau des Fraunhofer IOF kostet 23 Millionen Euro und wird zu gleichen Teilen vom Land sowie dem Bund getragen. Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Tünnermann blickt bereits heute freudig auf die für 2023 geplante Fertigstellung des Erweiterungsbaus: »Mit unserem neuesten Forschungsgebäude gewinnen wir wichtigen Raum für die Umsetzung originärer Ideen in den Quantentechnologien mit Mehrwerten für die deutsche und europäische Industrie.«

relevant future topics such as quantum technologies. A growing volume of research is expected here in the coming years. The institute is already involved in extensive projects on highly secure quantum communications, hardware development for powerful quantum computers, and quantum-based imaging methods, e.g., for medical diagnostics.

"I am impressed by the constant pursuit of new and globally significant technological findings," said Thuringia's Minister President Bodo Ramelow at the ceremony of laying the foundation stone. Thuringian Minister for Economics and Science Wolfgang Tiefensee also expects the expansion of the institute to provide strong impetus for research and industry in the Free State of Thuringia. "Thuringia is one of Germany's leading locations in the field of quantum technologies and quantum communications, thanks to Fraunhofer IOF", said the minister.

Fraunhofer IOF's latest extension costs 23 million euros and is funded in equal parts by the state and the federal government. Director Prof. Dr. Andreas Tünnermann is already looking forward to the completion of the extension building planned for 2023, "With our newest research building, we gain important space for the implementation of original ideas in quantum technologies with added values for German and European industry. This is an important strategic step for our institute, as the new building will allow us to synergistically combine the different activities in quantum computing, quantum communications, and quantum imaging."

*[1] Freuen sich über künftig mehr Raum für innovative Forschung in Thüringen: Prof. Dr. Andreas Tünnermann (links) und Ministerpräsident Bodo Ramelow bei der Grundsteinlegung. Delighted about increasing space for innovative research in Thuringia: Prof. Dr. Andreas Tünnermann (left) and Minister President Bodo Ramelow at the laying of the foundation stone.*



## Bubble Optics

beim MINT-Festival Jena 2021  
at the MINT-Festival Jena 2021

Manchmal findet man die präzisesten Optiken durch Zufall in der Natur: Die durch Oberflächenspannung perfekt glatt gezogenen Luft-Wasser-Grenzflächen einzelner schwimmender Luftblasen bieten ein Schauspiel, welches zuerst Leonardo Da Vinci vor über 500 Jahren auffiel. Wie überraschend vielfältig, komplex und ästhetisch die durch Lichtbrechung und Reflexion verursachten Muster unter- sowie oberhalb einzelner Luftblasen sein können, das konnten Schülerinnen und Schüler im diesjährigen MINT-Festival Jena kennenlernen.

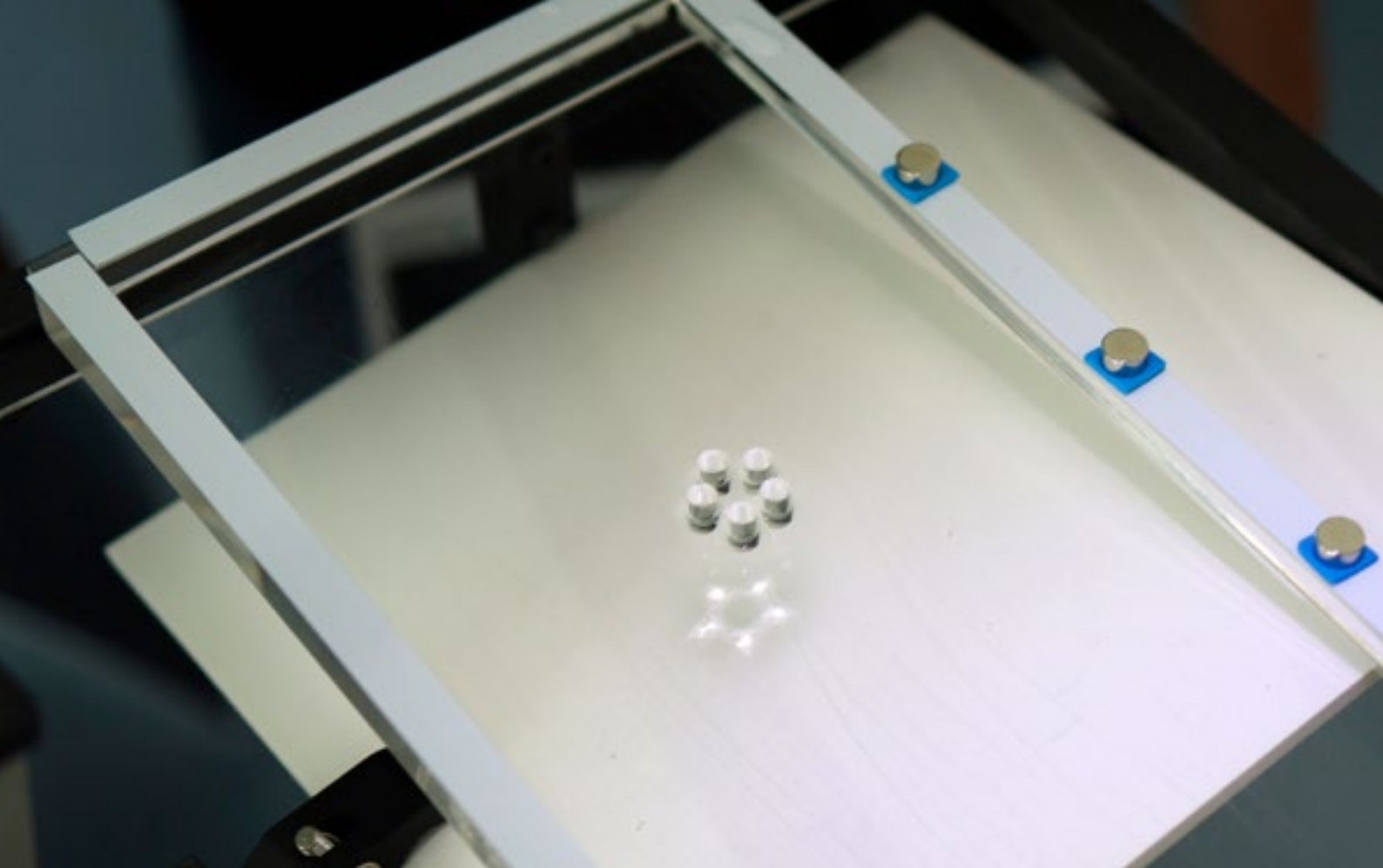
Solche und weitere optische Phänomene des Alltags bieten einen faszinierenden Einstieg für kommende Generation von Physikerinnen und Physiker und laden zum Nachahmen ein. So können in Experimenten leicht die wesentlichen Beobachtungen reproduziert werden sowie spannende Komposit-Kaustiken durch Reflexionen über Luftblasen /1/, oder eben »Leonardos Kreuz« /2,3,4,5/ unter Luftblasen bestaunt werden. Freiform-Optiken made by nature!

Deformierte Wasseroberflächen, wie man sie durch Positionierung von Glas-Spielsteinen in einem flachen Acrylglasbecken erzeugen kann, bieten in ähnlicher Manier ein interaktives Modell für die moderne Astrophysik /6,7/: Vielkörper-Gravitationslinsen-Systeme konnten so spielerisch von Schülerinnen

The most precise optical elements are sometimes found by chance and in nature: the perfectly smooth air-water interfaces of individual surface air bubbles offer a visual spectacle first observed around 1508 by Leonardo Da Vinci. In this year's MINT-Festival Jena, pupils learned about the surprising variety, complexity, and aesthetics of the light patterns above and below such bubbles.

These and other everyday life optical phenomena offer a fascinating introduction for future generations of physicists and invite imitation. The essential observations can easily be reproduced in experiments, and exciting composite caustics by reflections above air bubbles /1/, or "Leonardo's cross" /2,3,4,5/ below air bubbles can be marveled at. Freeform optics made by nature!

As they can be created by positioning glass tokens in a shallow acrylic basin, deformed water surfaces provide an interactive model for modern astrophysics in a similar manner /6,7/: many-body gravitational lensing systems could be playfully recreated by students in a MINT workshop. By placing a light source above the system, countless characteristic caustics can be generated under the basin. These are directly related to the multiple images obtained by observing the light source with a smartphone camera through the system.



und Schülern in einem MINT-Workshop nachgebaut werden. Durch Platzierung einer Lichtquelle über dem System können so zahllose charakteristische Kaustiken unter dem Becken erzeugt werden. Diese stehen in einem direkten Zusammenhang mit den Mehrfachabbildern wie man sie durch Beobachtung der Lichtquelle mit einer Smartphone-Kamera durch das System erhält.

### Literatur / References

- /1/ M. Selmke and J.A. Lock: Bubble optics: Upward emerging ray paths, *Appl. Optics* 60(29), 9188-9199 (2021).
- /2/ M. Selmke and J.A. Lock: Bubble optics: Leonardo's cross revisited: Part 1, numerical methods, *Appl. Optics* 60(21), 6213-6225 (2021).
- /3/ J.A. Lock and M. Selmke: Bubble optics: Leonardo's cross revisited: Part 2, paraxial analytical methods, *Appl. Optics* 60(21), 6226-6234 (2021).
- /4/ J.A. Lock and M. Selmke: Bubble optics: Leonardo's cross revisited: Part 3, non-paraxial analytical methods, *Appl. Optics* 60(21), 6235-6242 (2021).
- /5/ M. Selmke: Bubble optics, *Appl. Optics* 59(1), 45-58 (2020).
- /6/ An optical n-body gravitational lens analogy, *Am. J. Phys.* 89(1), 11-20 (2021).
- /7/ M. Selmke and J.A. Lock: Optical Caustics of Multiple Objects in Water: Two Vertical Rods and Normally Incident Light, *Appl. Optics* 59(26), 7981-7993 (2020).

*[1] Dr. Markus Selmke präsentiert seine Forschung zu »Bubble Optics« interessierten Schülerinnen und Schüler. Dr. Markus Selmke presents his research on "Bubble Optics" to interested students.*



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

### Artikel / Journals, peer reviewed

- Arslan, D.; A. Rahimzadegan, S. Fasold, M. Falkner, W. Zhou, M. Kroychuk, C. Rockstuhl, T. Pertsch, I. Staude  
**Toward Perfect Optical Diffusers: Dielectric Huygens' Metasurfaces with Critical Positional Disorder**  
Advanced Materials 2105868 (2021) p. 1-18, ISSN 0935-9648
- Barreda, A.; S. Hell, M. A. Weissflog, A. Minovich, T. Pertsch, I. Staude  
**Metal, dielectric and hybrid nanoantennas for enhancing the emission of single quantum dots: A comparative study**  
Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 276 (2021) p. 107900, ISSN 0022-4073
- Birckigt, P.; K. Grabowski, G. Leibelng, T. Fluegel-Paul, M. Heusinger, H. Ouslimani, S. Risse  
**Effects of static load and residual stress on fused silica direct bonding interface properties**  
Applied Physics a-Materials Science & Processing 127 (2021) p. 938, ISSN 0947-8396
- Braasch, M.; V. F. Gili, T. Pertsch, F. Setzpfandt  
**Classical Ghost Imaging: A Comparative Study of Algorithmic Performances for Image Reconstruction in Prospect of Plenoptic Imaging**  
IEEE Photonics Journal 13 (3) (2021) p. 15, ISSN 1943-0655
- Buldt, J.; H. Stark, M. Müller, C. Grebing, C. Jauregui, J. Limpert  
**Gas-plasma-based generation of broadband terahertz radiation with 640 mW average power**  
Optics Letters 46 (20) (2021) p. 5256-5259, ISSN 0146-9592
- Camphausen, R.; A. Cuevas, L. Duempelmann, R. A. Terborg, E. Wajs, S. Tisa, A. Ruggeri, I. Cusini, F. Steinlechner, V. Pruneri  
**A quantum-enhanced wide-field phase imager**  
Science Advances 7 (47) (2021) p. eabj2155, ISSN 2375-2548

*[1] Anja Karliczek bei der Demonstration der ersten quantengesicherten Videokonferenz zwischen deutschen Bundesbehörden. Anja Karliczek (BMBWF) demonstrating the first quantum-secured video conference between German federal institutions.*



- Chambonneau, M.; D. Grojo, O. Tokel, F. Ö. Ilday, S. Tzortzakis, S. Nolte  
**In-Volume Laser Direct Writing of Silicon-Challenges and Opportunities**  
Laser & Photonics Reviews 15 (2021) p. 2100140, ISSN 1863-8880
- Chambonneau, M.; M. Blothe, Q. Li, V. Yu. Fedorov, T. Heuermann, M. Gebhardt, C. Gaida, S. Tertelmann, F. Sotier, J. Limpert, S. Tzortzakis, S. Nolte  
**Transverse ultrafast laser inscription in bulk silicon**  
Physical Review Research 3 (2021) p. 043037, ISSN 2643-1564
- Chambonneau, M.; Q. Li, V. Yu. Fedorov, M. Blothe, K. Schaarschmidt, M. Lorenz, S. Tzortzakis, S. Nolte  
**Taming Ultrafast Laser Filaments for Optimized Semiconductor-Metal Welding**  
Laser & Photonics Reviews 15 (2) (2021) p. 2000433, ISSN 1863-8880
- Chen, Y.; S. Ecker, L. Chen, F. Steinlechner, M. Huber, R. Ursin  
**Temporal distinguishability in Hong-Ou-Mandel interference for harnessing high-dimensional frequency entanglement**  
Npj Quantum Information 7 (2021) p. 167, ISSN 2056-6387
- Distler, V.; F. Möller, B. Yildiz, M. Plotner, C. Jauregui, T. Walbaum, T. Schreiber  
**Experimental analysis of Raman-induced transverse mode instability in a core-pumped Raman fiber amplifier**  
Optics Express 29 (11) (2021) pp. 16175-16181, ISSN 1094-4087
- Ecker, S.; B. Liu, J. Handsteiner, M. Fink, D. Rauch, F. Steinlechner, T. Scheidl, A. Zeilinger, R. Ursin  
**Strategies for achieving high key rates in satellite-based QKD**  
Npj Quantum Information 7 (1) (2021) p. 7, ISSN 2056-6387
- Fedotova, A.; M. Younesi, J. Sautter, A. Vaskin, F. J. F. Loechner, M. Steinert, R. Geiss, T. Pertsch, I. Staude, F. Setzpfandt  
**Correction to "Second-Harmonic Generation in Resonant Nonlinear Metasurfaces Based on Lithium Niobate"**  
Nano Letters 21 (1) (2021) p. 888, ISSN 1530-6984
- Gaudio, C.; P. N. Terekhin, A. Volpe, S. Nolte, B. Rethfeld, A. Ancona  
**Laser ablation of silicon with THz bursts of femtosecond pulses**  
Scientific Reports 11 (1) (2021) p. 11, ISSN 20145-2322
- Gebhardt, M.; E. B. Amuah, R. Klas, H. Stark, J. Buldt, A. Steinkopff, J. Limpert  
**Investigation of spatiotemporal output beam profile instabilities from differentially pumped capillaries**  
Optics Express 29 (5) (2021) p. 6957-6966, ISSN 1094-4087
- Gebhardt, M.; T. Heuermann, R. Klas, C. Liu, A. Kirsche, M. Lenski, Z. Wang, C. Gaida, J. E. Antonio-Lopez, A. Schulzgen, R. Amezcua-Correa, J. Rothhardt, J. Limpert  
**Bright, high-repetition-rate water window soft X-ray source enabled by nonlinear pulse self-compression in an antiresonant hollow-core fibre**  
Light, science & applications 10 (1) (2021) p. 36, ISSN 2047-7538
- Ghazaryan, L.; S. Handa, P. Schmitt, V. Beladiya, V. Roddatis, A. Tünnermann, A. Szeghalmi  
**Structural, optical, and mechanical properties of TiO<sub>2</sub> nanolaminates**  
Nanotechnology 32 (2021) p. 095709, ISSN 0957-4484
- Gilaberte Basset, M.; A. Hochrainer, S. Töpfer, F. Riexinger, P. Bickert, J. R. Leon-Torres, F. Steinlechner, M. Gräfe  
**Video-Rate Imaging with Undetected Photons**  
Laser & Photonics Reviews 15 (6) (2021) p. 6, ISSN 1863-8880
- Goebel, T.; J. Nold, C. Hupel, S. Kuhn, N. Haarlammert, T. Schreiber, C. Matzdorf, T. O. Imogore, R. G. Kramer, D. Richter, A. Tünnermann, S. Nolte  
**Ultrashort pulse written fiber Bragg gratings as narrowband filters in multicore fibers**  
Applied Optics 60 (19) (2021) p. D43-D51, ISSN 1559-128X
- Gottschall, T.; T. Meyer-Zedler, M. Schmitt, R. Huber, J. Popp, A. Tünnermann, J. Limpert  
**Ultra-compact tunable fiber laser for coherent anti-Stokes Raman imaging**  
Journal of Raman Spectroscopy 52 (9) (2021) p. 1561-1568, ISSN 0377-0486
- Hanus, V.; V. Csajbok, Z. Papa, J. Budai, Z. Marton, G. Z. Kiss, P. Sandor, P. Paul, A. Szeghalmi, Z. L. Wang, B. Bergues, M. F. Kling, G. Molnar, J. Volk, P. Dombi  
**Light-field-driven current control in solids with pJ-level laser pulses at 80 MHz repetition rate**  
Optica 8 (4) (2021) p. 570-576, ISSN 2334-2536

# Artikel

## Journals, peer reviewed

---

- Hubold, M.; E. Montag, R. Berlich, R. Brunner, R. Brüning  
**Multi-aperture system approach for snapshot multispectral imaging applications**  
Optics Express 29 (5) (2021) pp. 7361-7378, ISSN 1094-4087
- Klas, R.; A. Kirsche, M. Gebhardt, J. Buldt, H. Stark, S. Hädrich, J. Rothhardt, J. Limpert  
**Ultra-short-pulse high-average-power Megahertz-repetition-rate coherent extreme-ultraviolet light source**  
Photonix 2 (2021) p. 4, ISSN 0
- Kumar, M.; P. Kumar, A. Vega, M. A. Weissflog, T. Pertsch, F. Setzpfandt  
**Mid-infrared photon pair generation in AgGaS<sub>2</sub>**  
Applied Physics Letters 119 (2021) p. 244001, ISSN 0003-6951
- Lackner, L.; M. Dusel, O. A. Egorov, B. Han, H. Knopf, F. Eilenberger, S. Schröder, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Tongay, C. Anton-Solanas, S. Hofling, C. Schneider  
**Tunable exciton-polaritons emerging from WS<sub>2</sub> monolayer excitons in a photonic lattice at room temperature**  
Nature Communications 12 (1) (2021) p. 6, ISSN 2041-1723
- Lapteva, M.; V. Beladiya, S. Riese, P. Hanke, F. Otto, T. Fritz, P. Schmitt, O. Stenzel, A. Tünnermann, A. Szeghalmi  
**Influence of temperature and plasma parameters on the properties of PEALD HfO<sub>2</sub>**  
Optical Materials Express 11 (7) (2021) p. 1918-1942, ISSN 2159-3930
- Li, Q.; M. Chambonneau, M. Blothe, H. Gross, S. Nolte  
**Flexible, fast, and benchmarked vectorial model for focused laser beams**  
Applied Optics 60 (13) (2021) p. 3954-3963, ISSN 1559-128X
- Lin, Y.; M. Younesi, H. P. Chung, H. K. Chiu, R. Geiss, Q. H. Tseng, F. Setzpfandt, T. Pertsch, Y. H. Chen  
**Ultra-compact, broadband adiabatic passage optical couplers in thin-film lithium niobate on insulator waveguides**  
Optics Express 29 (17) (2021) p. 27362-27372, ISSN 1094-4087
- Linss, S.; D. Michaelis, U. D. Zeitner  
**Macroscopic wave-optical simulation of dielectric metasurfaces**  
Optics Express 29 (7) (2021) p. 10879-10892, ISSN 1094-4087
- Liu, D.; B. Yürekli, T. Ullsperger, G. Matthäus, L. Schade, S. Nolte, M. Rettenmayr  
**Microstructural aspects of additive manufacturing of Al-Li alloys with high Li content**  
Materials & Design 198 (2021) p. 109323, ISSN 0264-1275
- Löchner, F.; A. George, K. Koshelev, T. Bucher, E. Najafidehaghani, A. Fedotova, D. Y. Choi, T. Pertsch, I. Staude, Y. Kivshar, A. Turchanin, F. Setzpfandt  
**Hybrid Dielectric Metasurfaces for Enhancing Second-Harmonic Generation in Chemical Vapor Deposition Grown MoS<sub>2</sub> Monolayers**  
Acs Photonics 8 (1) (2021) pp. 218-227, ISSN 2330-4022
- Lu, X.; H. Gross  
**Wigner function-based modeling and propagation of partially coherent light in optical systems with scattering surfaces**  
Optics Express 29 (10) (2021) p. 14985-15000, ISSN 1094-4087
- Müller, M.; C. Aleshire, J. Buldt, H. Stark, C. Grebing, A. Klenke, J. Limpert  
**Scaling potential of beam-splitter-based coherent beam combination**  
Optics Express 29 (17) (2021) p. 27900-27911, ISSN 1094-4087
- Müller, M.; J. Buldt, H. Stark, C. Grebing, J. Limpert  
**Multipass cell for high-power few-cycle compression**  
Optics Letters 46 (11) (2021) pp. 2678-2681, ISSN 0146-9592
- Najafidehaghani, E.; Z. Y. Gan, A. George, T. Lehnert, G. Q. Ngo, C. Neumann, T. Bucher, I. Staude, D. Kaiser, T. Vogl, U. Hübner, U. Kaiser, F. Eilenberger, A. Turchanin  
**1D p-n Junction Electronic and Optoelectronic Devices from Transition Metal Dichalcogenide Lateral Heterostructures Grown by One-Pot Chemical Vapor Deposition Synthesis**  
Advanced Functional Materials 31 (27) (2021) p. 9, ISSN 1616-301X
- Peysokhan, M.; S. Rostami, E. Mobini, A. R. Albrecht, S. Kuhn, S. Hein, C. Hupel, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Flores, A. Tünnermann, M. Sheik-Bahae, A. Mafi  
**Implementation of Laser-Induced Anti-Stokes Fluorescence Power Cooling of Ytterbium-Doped**

- Silica Glass**  
 ACS Omega 6 (12) (2021) pp. 8376-8381, ISSN 2470-1343
- Piendl, S.; T. Schönfelder, M. Polack, L. Weigelt, T. van der Zwaag, T. Teutenberg, E. Beckert, D. Belder  
**Integration of segmented microflow chemistry and online HPLC/MS analysis on a microfluidic chip system enabling enantioselective analyses at the nanoliter scale**  
 Lab on a Chip 21 (13) (2021) pp. 2614-2624, ISSN 1473-0197
  - Ran, Y.; A. Boden, F. Küster, F. An, A. Richter, S. Guhl, S. Nolte, R. Ackermann  
**In situ investigation of carbon gasification using ultrabroadband coherent anti-Stokes Raman scattering**  
 Applied Physics Letters 119 (24) (2021) p. 243905, ISSN 0003-6951
  - Santiago-Cruz, T.; A. Fedotova, V. Sultanov, M. A. Weissflog, D. Arslan, M. Younesi, T. Pertsch, I. Staude, F. Setzpfandt, M. Chekhova  
**Photon Pairs from Resonant Metasurfaces**  
 Nano Letters 21 (10) (2021) pp. 4423-4429, ISSN 1530-6984
  - Saravi, S.; T. Pertsch, F. Setzpfandt  
**Lithium Niobate on Insulator: An Emerging Platform for Integrated Quantum Photonics**  
 Advanced Optical Materials 9 (22) (2021) p. 2100789, ISSN 2195-1071
  - Schaarschmidt, K.; J. Kobelke, S. Nolte, T. Meyer, M. A. Schmidt  
**Ultrafast intermodal third harmonic generation in a liquid core step-index fiber filled with C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> erratum**  
 Optics Express 29 (2) (2021) pp. 1890-1891, ISSN 1094-4087
  - Schmitt, P.; S. Stempfhuber, N. Felde, A. V. Szeghalmi, N. Kaiser, A. Tünnermann, S. Schwinde  
**Influence of seed layers on the reflectance of sputtered aluminum thin films**  
 Optics Express 29 (13) (2021) pp. 19472-19485, ISSN 1094-4087
  - Schmitt, P.; V. Beladiya, N. Felde, P. Paul, F. Otto, T. Fritz, A. Tünnermann, A. V. Szeghalmi  
**Influence of Substrate Materials on Nucleation and Properties of Iridium Thin Films Grown by ALD**  
 Coatings 11 (2) (2021) p. 23, ISSN 2079-6412
  - Schuster, V.; C. Liu, R. Klas, P. Dominguez, J. Rothhardt, J. Limpert, B. Bernhardt  
**Ultraviolet dual comb spectroscopy: a roadmap**  
 Optics Express 29 (14) (2021) pp. 21859-21875, ISSN 1094-4087
  - Schuster, V.; V. Hilbert, R. Klas, C. Liu, M. Tschernajew, B. Bernhardt, J. Rothhardt, J. Limpert  
**Agile spectral tuning of high order harmonics by interference of two driving pulses**  
 Optics Express 29 (14) (2021) pp. 22117-22126, ISSN 1094-4087
  - Shan, H.; L. Lackner, B. Han, E. Sedov, C. Rupprecht, H. Knopf, F. Eilenberger, J. Beierlein, N. Kunte, M. Esmann, K. Yumigeta, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Klembt, S. Höfling, A. V. Kavokin, S. Tongay, C. Schneider, C. Antón-Solanas  
**Spatial coherence of room-temperature monolayer WSe<sub>2</sub> exciton-polaritons in a trap**  
 Nature Communications 12 (2021) p. 6406, ISSN 2041-1723
  - Skruszewicz, S.; A. Przystawik, D. Schwickert, M. Sumfleth, M. Namboodiri, V. Hilbert, R. Klas, P. Gierschke, V. Schuster, A. Vorobiov, C. Haunhorst, D. Kip, J. Limpert, J. Rothhardt, T. Laarmann  
**Table-top interferometry on extreme time and wavelength scales**  
 Optics Express 29 (24) (2021) pp. 40333-40344, ISSN 1094-4087
  - Sperrhake, J.; M. Falkner, M. Steinert, S. Fasold, T. Pertsch  
**Experimental validation of the fundamental mode approximation for stacked metasurfaces and its application to the treatment of arbitrary period ratios**  
 Apl Photonics 6 (9) (2021) p. 12, ISSN 2378-0967
  - Stark, H.; J. Buldt, M. Müller, A. Klenke, J. Limpert  
**1 kW, 10 mJ, 120 fs coherently combined fiber CPA laser system**  
 Optics Letters 46 (5) (2021) p. 969-972, ISSN 0146-9592
  - Tang, Z.; H. Gross  
**Extended aberration analysis in symmetry-free optical systems - part I: method of calculation**  
 Optics Express 29 (24) (2021) pp. 39967-39982, ISSN 1094-4087
  - Tang, Z.; H. Gross  
**Extended aberration analysis in symmetry-free optical systems - part II: evaluation and application**  
 Optics Express 29 (25) (2021) pp. 42020-42036, ISSN 1094-4087
  - Tugchin, B.; N. Janunts, M. Steinert, S. Fasold, T. Pertsch  
**Experimental observation of the short-range surface plasmon polariton mode and its longitudinal adiabatic compression in a metallic wedge**  
 Optics Express 29 (23) (2021) p. 37161-37174, ISSN 1094-4087

# Artikel

## Journals, peer reviewed

---

- Ullsperger, T.; D. Liu, B. Yürekli, G. Matthäus, L. Schade, B. Seyfarth, H. Kohl, R. Ramm, M. Rettenmayr, S. Nolte **Ultra-short pulsed laser powder bed fusion of Al-Si alloys: Impact of pulse duration and energy in comparison to continuous wave excitation** Additive Manufacturing 46 (2021) p. 102085, ISSN 2214-8604
- Ullsperger, T.; Y. L. Wencke, B. Yürekli, G. Matthäus, M. Rettenmayr, G. A. Luinstra, S. Nolte **Laser powder bed fusion of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) using near-infrared ultrashort laser pulses** Materials & Design 210 (2021) p. 110048, ISSN 0264-1275
- Pakhomov, A.V.; M. Hammerschmidt, S. Burger, T. Pertsch, F. Setzpfandt **Modeling of surface-induced second-harmonic generation from multilayer structures by the transfer matrix method** Optics Express 29 (6) (2021) pp. 9098-9122, ISSN 1094-4087
- Vaskin, A.; S. Liu, S. Addamane, P. P. Vabishchevich, Y. M. Yang, G. Balarishnan, M. B. Sinclair, T. Pertsch, I. Brener, I. Staude **Manipulation of quantum dot emission with semiconductor metasurfaces exhibiting magnetic quadrupole resonances** Optics Express 29 (4) (2021) p. 5567-5579, ISSN 1094-4087
- Vega, A.; T. Pertsch, F. Setzpfandt, A. A. Sukhorukov **Metasurface-Assisted Quantum Ghost Discrimination of Polarization Objects** Physical Review Applied 16 (2021) p. 064032, ISSN 2331-7019
- Vogl, T.; H. Knopf, M. Weissflog, P. K. Lam, F. Eilenberger **Sensitive single-photon test of extended quantum theory with two-dimensional hexagonal boron nitride** Physical Review Research 3 (1) (2021) p. 10, ISSN 2643-1564
- Younesi, M.; R. Geiss, S. Rajaei, F. Setzpfandt, Y. H. Chen, T. Pertsch **Periodic poling with a micrometer-range period in thin-film lithium niobate on insulator** Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics 38 (3) (2021) pp. 685-691, ISSN 0740-3224
- Yulin, S.; M. Trost, S. Schwinde, S. Schröder **Coatings with barrier layers for extreme-short wavelengths EUV lithography for the semiconductor industry and beyond** Vakuum in Forschung Und Praxis 33 (5) (2021) pp. 24-29, ISSN 1522-2454
- Zhang, Y.; S. Müller, B. Stephan, H. M. Gross, G. Notni **Point Cloud Hand-Object Segmentation Using Multimodal Imaging with Thermal and Color Data for Safe Robotic Object Handover** Sensors 21 (16) (2021) p. 16, ISSN 1424-8220
- Zou, C.; C. Amaya, S. Fasold, A. A. Muravsky, A. A. Murauski, T. Pertsch, I. Staude **Multiresponsive Dielectric Metasurfaces** Acs Photonics 8 (6) (2021) pp. 1775-1783, ISSN 2330-4022
- Selmke, M.; J.A. Lock **Bubble optics: Upward emerging ray paths** Applied Optics 60 (29) (2021) pp. 9188-9199, ISSN 1559128X
- Selmke, M.; J.A. Lock **Bubble optics: Leonardo's cross revisited-Part 1, numerical methods** Applied Optics 60 (21) (2021) pp. 6213-6225, ISSN 1559128X
- Schulz, U.; N. Gratzke, F. Rickelt, C. Hahmann, T. Seifert, A. Gärtner **Coating-relevant properties of high-index optical polymers for automotive applications** Applied Optics 60 (20) (2021) pp. E34-E40, ISSN 1559128X
- Heinzig, M.; G. Palma-Vega, B. Yildiz, T. Walbaum, T. Schreiber, A. Tünnermann **Continuous-wave cascaded second Stokes diamond Raman laser at 1477 nm** Optics Letters 46 (5) (2021) pp. 1133-1136, ISSN 0146-9592
- Anwar, A.; C. Perumangatt, F. Steinlechner, T. Jennewein, A. Ling **Entangled photon-pair sources based on three-wave mixing in bulk crystals** Review of Scientific Instruments 92 (4) (2021) p. 29, ISSN 0034-6748
- Li, Q.; M. Chambonneau, M. Blothe, H. Gross, S. Nolte **Flexible, fast, and benchmarked vectorial model for focused laser beams** Applied Optics 60 (13) (2021) pp. 3954-3963, ISSN 1559128X

- Cai, D.; H. Gross  
**Generalized chromatic aberrations in non-rotationally symmetric optical systems-Part I: Mathematical approach**  
Applied Optics 60 (21) (2021) pp. 6313-6321, ISSN 1559128X
- Cai, D.; H. Gross  
**Generalized chromatic aberrations in non-rotationally symmetric optical systems-Part II: Applications**  
Applied Optics 60 (21) (2021) pp. 6322-6330, ISSN 1559128X
- Jisha, C. P.; S. Nolte, A. Alberucci  
**Geometric Phase in Optics: From Wavefront Manipulation to Waveguiding**  
Laser & Photonics Reviews 15 (2021) p. 2100003, ISSN 1863-8880
- Temmler, A.; K. Braun, E. Uluz  
**Heat accumulation and surface roughness evolution in CO<sub>2</sub> nanosecond laser ablation of quartz glass**  
Optics and Laser Technology 144 (2021) art. no. 107426, ISSN 00303992
- Landmann, M.; H. Speck, P. Dietrich, S. Heist, P. Kühmstedt, A. Tünnermann, G. Notni  
**High-resolution sequential thermal fringe projection technique for fast and accurate 3D shape measurement of transparent objects**  
Applied Optics 60 (8) (2021) pp. 2362-2371, ISSN 21553165
- Lapteva, M.; V. Beladiya, S. Riese, P. Hanke, F. Otto, T. Fritz, P. Schmitt, O. Stenzel, A. Tünnermann, A. Szeghalmi  
**Influence of temperature and plasma parameters on the properties of PEALD HfO<sub>2</sub>**  
Optical Materials Express 11 (7) (2021) pp. 1918-1942, ISSN 21593930
- Baghdasaryan, B.; F. Steinlechner, S. Fritzsche  
**Justifying the thin-crystal approximation in spontaneous parametric down-conversion for collinear phase matching**  
Physical Review A 103 (6) (2021) p. 5, ISSN 1050-2947
- Linss, S.; D. Michaelis, U.D. Zeitner  
**Macroscopic wave-optical simulation of dielectric metasurfaces**  
Optics Express 29 (7) (2021) pp. 10879-10892, ISSN 10944087
- Wiesner, F.; M. Wünsche, J. Reinhard, J. Abel, J. Nathanael, S. Skruszewicz, C. Rödel, S. Yulin, A. Gawlik, G. Schmidl, U. Hübner, J. Plentz, G. Paulus, S. Fuchs  
**Material-specific imaging of nanolayers using extreme ultraviolet coherence tomography**  
Optica 8 (2) (2021) pp. 230-238, ISSN 23342536
- Houbertz, R.; V. Hartinger, J.J. Klein, M. Herder, G. Grützner, P. Dannberg  
**Multifunctional materials for lean processing of waferscale optics**  
Advanced Optical Technologies 10 (1) (2021) pp. 59-70, ISSN 21928576
- Paul, P.; M.G. Hafiz, P. Schmitt, C. Patzig, F. Otto, T. Fritz, A. Tünnermann, A. Szeghalmi  
**Optical bandgap control in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> heterostructures by plasma enhanced atomic layer deposition: Toward quantizing structures and tailored binary oxides**  
Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy 252 (2021) p. 119508, ISSN 1386-1425
- White, J.; S. Wang, W. Eschen, J. Rothhardt  
**Real-time phase-retrieval and wavefront sensing enabled by an artificial neural network**  
Optics Express 29 (6) (2021) pp. 9283-9293, ISSN 10944087
- Oreshkin, O.; D. Panov, L. Kreinest, A. Temmler, A. Platonov  
**Shape deviation of surface structures produced by waveshape (Structuring by laser remelting) on Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V and a method for deviation reduction**  
Micromachines 12 (4) (2021) art. no. 367, ISSN 2072666X
- Danz, N.; A. Occhicone, C. Pflumm, P. Munzert, F. Michelotti, D. Michaelis  
**Spectral analysis of organic LED emitters' orientation in thin layers by resonant emission on dielectric stacks**  
Optics Express 29 (5) (2021) pp. 6608-6619, ISSN 10944087
- Temmler, A.; S. Qi  
**Surface structuring by laser remelting (Waveshape): Microstructuring of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V for a small laser beam diameter and high scan speeds**  
Micromachines 12 (6) (2021) art. no. 660, ISSN 2072666X
- Eschen, W.; S. Wang, C. Liu, R. Klas, M. Steinert, S. Yulin, H. Meißner, M. Bussmann, T. Pertsch, J. Limpert, J. Rothhardt  
**Towards attosecond imaging at the nanoscale using broadband holography-assisted coherent imaging in the extreme ultraviolet**  
Communications Physics 4 (1) (2021) p. 7, ISSN 2339-3650

# Artikel

## Journals, peer reviewed

---

- Gaida, C.; M. Gebhardt, T. Heuermann, Z. Wang, C. Jauregui, J. Limpert  
**Transverse mode instability and thermal effects in thulium-doped fiber amplifiers under high thermal loads**  
Optics Express, 29 (10) (2021) pp. 14963-14973, ISSN 10944087
- Wong, E.; S. Heist, C. Bräuer-Burchardt, A. Stark, H. Babovsky, R. Kowarschik  
**View-synthesized 're-calibration' of an array projector for 3D measurement from an arbitrary monocular view**  
Optics and Lasers in Engineering 141 (2021) art. no. 106559, ISSN 1438166
- Temmler, A.; M. Cortina, I. Ross, M.E. Küpper, S.-K. Rittinghaus  
**Laser micro polishing of tool steel 1.2379 (aisi d2): Influence of intensity distribution, laser beam size, and fluence on surface roughness and area rate**  
Metals 11(9) (2021) art. no. 1445, ISSN 20754701
- Abbasirad, N.; A. Barreda, D. Arslan, M. Steinert, S. Fasold, C. Rockstuhl, I. Staude, F. Setzpfandt, T. Pertsch  
**Investigation of dipole emission near a dielectric metasurface using a dual-tip scanning near-field optical microscope**  
Nanophotonics 10 (18) (2021), ISSN 21928614
- Ran, Y.; A. Boden, F. Küster, F. An, A. Richter, S. Guhl, S. Nolte, R. Ackermann  
**In situ investigation of carbon gasification using ultrabroadband coherent anti-Stokes Raman scattering**  
Nanophotonics 10 (18) (2021) p. 4511-4522, ISSN 2192-8606
- Occhicone, A.; P. Del Porto, N. Danz, P. Munzert, A. Sinibaldi, F. Michelotti  
**Enhanced fluorescence detection of interleukin 10 by means of 1d photonic crystals**  
Crystals 2021 11 (12) (2021) art. no. 1517, ISSN 20734352
- 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 (2021) p. 165-175, ISSN 12962074
- Tang, Z.; H. Gross  
**Improved correction by freeform surfaces in prism spectrometer concepts**  
Applied Optics, 60 (2) (2021) pp. 333-341, ISSN 1559-128X
- Pfeiffer, K.; P. Paul, A. Szeghalmi  
**Functionalizing Complex Shaped Optics**  
Electro Optics 310 (2021) pp. 24-28
- Thoß, A.; P. Kühmstedt  
**Buchstäblich folgen Roboter jetzt dem Fingerzeig**  
MM Maschinenmarkt, 2/3 1.3.2021 S. 76-77
- Landmann, M.; S. Heist  
**Scanner für Durchsichtiges**  
Physik Journal 20 (2021) Nr. 7 S. 18
- Fedotova, A.; M. Younesi, J. Sautter, A. Vaskin, F. J. F. Löchner, M. Steinert, R. Geiss, T. Pertsch, I. Staude, F. Setzpfandt  
**Second-Harmonic Generation in Resonant Nonlinear Metasurfaces Based on Lithium Niobate**  
Nano letters 21 (1) (2021) pp. 8608-8614, ISSN 1530-6984
- Topper, B.; M. Peysokhan, A. R. Albrecht, A. S. Flores, S. Kuhn, D. Hassner, S. Hein, C. Hupel, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, M. Sheik-Bahae, A. Mafi  
**Laser cooling of a Yb doped silica fiber by 18 Kelvin from room temperature**  
Optics Letters 46 (22) (2021) pp. 5707-5710, ISSN 0146-9592
- Jauregui, C.; C. Stihler, S. Kholaf, Y. Tu, J. Limpert  
**Control and stabilization of the modal content of fiber amplifiers using traveling waves**  
Optics Express 29 (21) (2021) pp. 34452-34464, ISSN 1094-4087
- Böttner, P.; A. Brady, C. Reinlein, R. Eberhardt, S. Nolte  
**Design routine and characterisation of a biconic deformable metal mirror for focus shifting**  
Optics Express 29 (3) (2021) pp. 2971-2983, ISSN 1094-4087

# Konferenzbeiträge

## Conference papers

---

- Schönfelder, T.; F. Kemper, L. Pohle, M. Reif, M. Tienken, E. Beckert, A. Tünnermann  
**Inkjet printing of dielectric layers with high relative permittivity for digital microfluidics**  
Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE, 11637, art. no. 1163708, ISSN 16057422
- Hübner, S.T.; K. Simmen, A. Breitbarth, G. Notni  
**Standard-compliant detection of fillet weld surface imperfections for MAG-welding using a 3D-line scanner**  
SPIE Defense + Commercial Sensing, 2021, 12.-16.04.21, Online only, Proc. SPIE 11732, 117320A-1-13
- Geiss, R.; J. Hengster, A.-K. Grimm, T. Kaiser, G. Leuchs, A. Tünnermann  
**Max Planck School of Photonics: Developing Curriculum and Outreach Measures for a Network of Excellence**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. F1A.5, ISBN 978-155752820-9
- Kaiser, T.; T.-H. Lin, J. Kretzschmar, F. Soika, J. Michel, C. Helgert, R. Geiss, T. Pertsch, A. Tünnermann  
**Digital Teaching in Photonics – new possibilities for Labwork Training Programs**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. F2B.7, ISBN 978-155752820-9
- Peysokhan, M.; S. Rostami, E. Mobini, A.R. Albrecht, S. Kuhn, S. Hein, C. Hupel, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A.S. Flores, A. Tünnermann, M. Sheik-Bahae, A. Mafi  
**Laser cooling of ytterbium-doped silica glass by more than 6 Kelvin**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Mäusezahl, M.; F. Christaller, O. de Vries, M. Plötner, H. Zhang, A. Belz, B. Heinrich, T. Walbaum, T. Schreiber, A. Tünnermann, H. Kübler, R. Löw, T. Pfau  
**Commissioning of a highly customized 1010 nm, ns-pulsed, Yb-doped fiber amplifier for on-demand single-photon generation**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Klenke, A.; A. Steinkopff, C. Aleshire, C. Jauregui, S. Kuhn, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, A. Tünnermann, J. Limpert  
**1 kW average power emission from an in-house 4x4 multicore rod-type fiber**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Distler, V.; F. Möller, B. Yildiz, M. Plötner, T. Walbaum, T. Schreiber  
**Transverse mode instability threshold manipulation in a core-pumped Raman amplifier**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. SW2B.3, ISBN 978-155752820-9
- Gäbler, T.B.; N. Jain, J.R. León Torres, P. Hendra, M. Gräfe  
**Entangled two-photon absorption in commercial fluorophores**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. SW3D.3, ISBN 978-155752820-9
- Mäusezahl, M.; F. Christaller, O. de Vries, M. Plötner, H. Zhang, A. Belz, B. Heinrich, T. Walbaum, T. Schreiber, A. Tünnermann, H. Kübler, R. Löw, T. Pfau  
**Commissioning of a highly customized 1010 nm, ns-pulsed, Yb-doped fiber amplifier for on-demand single-photon generation**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. STh2Q.6, ISBN 978-155752820-9
- Weissflog, M.A.; S. Saravi, C. Gigli, G. Marino, A. Borne, G. Leo, T. Pertsch, F. Setzpfandt  
**Describing SPDC at the nanoscale: A quasinormal mode approach**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Alberucci, A.; C.P. Jisha, S. Nolte  
**Optical waveguides based upon a gauge field**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Knopf, H.; M. Zilk, S. Bernet, G.Q. Ngo, F.A. Abtahi, A. George, E. Najafidehaghani, Z. Gan, M. Weissflog, T. Vogl, A. Turchanin, U. Schulz, S. Schröder, F. Eilenberger  
**Second harmonic generation in monolayer WS2 with double resonant Bragg-cavities**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9

# Konferenzbeiträge

## Conference papers

- Jisha, C.P.; J. Beeckman, S. Nolte, A. Alberucci  
**Interplay between geometric and dynamic phase in liquid crystals**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Lackner, L.; M. Dusel, C. Anton-Solanas, H. Knopf, F. Eilenberger, O. Egorov, S. Schröder, S. Höfling, C. Schneider  
**Tuneable bloch-band polaritons emerging from WS<sub>2</sub> monolayer excitons in an optical lattice at room temperature**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Santos, E.; S. Saravi, A. Vega, T. Pertsch, F. Setzpfandt  
**Sub-diffraction near-field imaging with undetected photons using thin sources of photon pairs**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Kretzschmar, J.; S. Best, D. Zakoth, H. Voigt, K. Li, T. Kaiser, R. Geiss, C. Helgert, T. Pertsch  
**Utilizing Open Spaces for community-driven Development of XR Teaching Applications in Photonics**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. F1B.7, ISBN 978-155752820-9
- Lin, Y.-X.; C.-H. Lee, H.-P. Chung, M. Younesi, P. Kumar, K. Wang, O. Bernard, C. Shirpurkar, W.-C. Su, R. Geiss, T. Pertsch, A. Sukhorukov, F. Setzpfandt, Y.-H. Chen  
**Integrated photonic sources and circuits in lithium niobate platform**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. T2D.2, ISBN 978-155752820-9
- Tanaka, K.; A. Rahimzadegan, D. Arslan, S. Fasold, M. Steinert, M. Falkner, T. Pertsch, M. Decker, C. Rockstuhl, I. Staude  
**Orientalional disorder in chiral bilayer dielectric metasurfaces**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. ITu2A.4, ISBN 978-155752820-9
- Spiess, C.; S.Töpfer, S. Sharma, A. Krzic, G. Sauer, D. Rieländer, F. Steinlechner  
**Synchronization of quantum communication systems based on correlated photons**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. ATu1S.3, ISBN 978-155752820-9
- Eschen, W.; L. Loetgering, V. Schuster, R. Klas, J. Limpert, J. Rothhardt  
**Table-top high-resolution ptychographic EUV imaging**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. IF2H.3, 978-155752820-9
- Loetgering, L.; T. Aidukas, M. Du, D.B. Flaes, D. Penagos, M. Rose, A. Pelekanidis, A. de Beurs, W. Eschen, J. Hess, T. Wilhein, R. Heintzmann, J. Rothhardt, S. Witte  
**ptyLab: A cross-platform inverse modeling toolbox for conventional and Fourier ptychography**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. CW6B.3, ISBN 978-155752820-9
- Fedotova, A.; T. Santiago-Cruz, V. Sultanov, M. Weissflog, M. Younesi, I. Staude, T. Pertsch F.Setzpfandt, M.V. Chekhova  
**Enhancement of spontaneous parametric down-conversion in nonlinear metasurfaces**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. FW4H.1, ISBN 978-155752820-9
- Basset, M.G.; S.Töpfer, J.P. Torres, J. Fuenzalida, F. Steinlechner, M. Gräfe  
**Holography of a photon without its detection**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. FTh2J.2, ISBN 978-155752820-9
- Perna, A.S.; M. Gräfe, F. Steinlechner  
**Visible-wavelength entangled photon source for quantum communication and quantum imaging**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. JTh3A.16, ISBN 978-155752820-9
- Hollinger, R.; N.G. Harshitha, V. Korolev, Z. Gan, A. George, V. Shumakova, M. Zürich, T. Vogl, A. Pugžlys, A. Baltuška, F. Eilenberger, C. Spielmann, A. Turchanin, D. Kartashov  
**Ellipticity controlled high-order harmonic generation in 2D materials**  
Optics InfoBase Conference Papers, art. no. FTu1L.3, ISBN 978-155752820-9
- Aleshire, C.; A. Steinkopff, M. Karst, A. Klenke, C. Jauregui, S. Kuhn, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, J. Limpert  
**Q-switched rod-type multicore fibre laser delivering 3.1 mJ pulses**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Jauregui, C.; C. Stihler, S. Kholaf, Y.Tu, J. Limpert  
**Transverse mode instability in high-power fiber laser systems: A "hot topic"**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9



- Tschernajew, M.; S. Hädrich, R. Klas, M. Gebhardt, R. Horsten, S. Werdenburg, S. Pyatchenkov, W. Coene, J. Rothhardt, T. Eidam, J. Limpert  
**High repetition rate high harmonic generation with ultra-high photon flux**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Hädrich, S.; E. Shestaev, N. Walther, T. Nagy, P. Simon, A. Blumenstein, A. Klenke, R. Klas, J. Buldt, H. Stark, M. Gebhardt, S. Bretkopf, P. Jójárt, I. Seres, Z. Várallyay, Á. Börzsönyi, T. Eidam, J. Limpert  
**High-average-power and high-pulse-energy CEP-stable few-cycle pulses: Status of the ELI-ALPS HR2 laser system**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Chambonneau, M.; Q. Li, V.Yu. Fedorov, M. Blothe, S. Tzortzakis, S. Nolte  
**Mastering micro-filamentation for semiconductor-metal ultrafast laser welding**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Gaida, C.; F. Stutzki, M. Gebhardt, T. Heuermann, S. Bretkopf, T. Eidam, J. Rothhardt, J. Limpert  
**4-channel coherently combined long-term-stable ultrafast thulium-doped fiber CPA**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Zhao, X.; M. Baudisch, M. Beutler, T. Gabler, S. Nolte, R. Ackermann  
**Tunable femtosecond optical parametric amplifier pumped by 1 kHz ultrafast thin-disk laser pulses for coherent anti-Stokes Raman scattering**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Blothe, M.; M. Chambonneau, T. Heuermann, M. Gebhardt, J. Limpert, S. Nolte  
**Laying the foundations of ultrafast stealth dicing of silicon with picosecond laser pulses at 2- $\mu$ m wavelength**  
Optics InfoBase Conference Papers, ISBN 978-155752820-9
- Birckigt, P.; C. Rothhardt, S. Risse, U.D. Zeitner  
**Towards hybrid optical components via non-planar direct bonding**  
7th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration LTB-3D 2021 p. 53, ISBN 978-166540567-6
- Gäbler, T.B.; N. Jain, J.R.L. Torres, P. Hendra, M. Gräfe  
**Entangled Two-Photon Absorption in Commercial Fluorophores**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Mäusezahl, M.; F. Christaller, O. De Vries, M. Plotner, H. Zhang, A. Belz, B. Heinrich, T. Walbaum, T. Schreiber, A. Tünnermann, H. Kubler, R. Löw, T. Pfau  
**Commissioning of a Highly Customized 1010 nm, ns-Pulsed, Yb-Doped Fiber Amplifier for On-Demand Single-Photon Generation**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Basset, M.G.; S. Töpfer, J.P. Torres, J. Fuenzalida, F. Steinlechner, M. Gräfe  
**Holography of a Photon without its Detection**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Spiess, C.; S. Töpfer, S. Sharma, A. Krzic, G. Sauer, D. Rielander, F. Steinlechner  
**Synchronization of quantum communication systems based on correlated photons**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Peysokhan, M.; S. Rostami, E. Mobini, A.R. Albrecht, S. Kuhn, S. Hein, C. Hupel, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A.S. Flores, A. Tünnermann, M. Sheik-Bahae, A. Mafi  
**Laser cooling of ytterbium-doped silica glass by more than 6 Kelvin**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Distler, V.; F. Möller, B. Yildiz, M. Plötner, T. Walbaum, T. Schreiber  
**Transverse Mode Instability Threshold Manipulation in a Core-Pumped Raman Amplifier**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Santiago-Cruz, T.; A. Fedotova, V. Sultanov, M. Weissflog, M. Younesi, I. Staude, T. Pertsch, F. Setzpfandt, M.V. Chekhova  
**Mie Resonances in the Spectrum of Spontaneous Parametric Down-Conversion**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Fedotova, A.; T. Santiago-Cruz, V. Sultanov, M. Weissflog, M. Younesi, I. Staude, T. Pertsch, F. Setzpfandt, M.V. Chekhova  
**Enhancement of Spontaneous Parametric Down-Conversion in Nonlinear Metasurfaces**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0

## Artikel

### Journals, peer reviewed

---

- Perna, A.S.; M. Gräfe, F. Steinlechner  
**Visible-wavelength Entangled Photon Source for Quantum Communication and Quantum Imaging**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Hollinger, R.; V. Korolev, Z. Gan, A. George, V. Shumakova, M. Zurch, T. Vogl, A. Pugzlys, A. Baltuska, F. Eilenberger, C. Spielmann, A. Turchanin, D. Kartashov  
**Ellipticity controlled high-order harmonic generation in 2D materials**  
Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021 – Proceedings, ISBN 978-194358091-0
- Tucakovic, N.P.; U. Chandrashekhara, A. Krzic, F. Steinlechner  
**End-to-End Polarization Error Analysis of a Terrestrial Free-Space Quantum Communication Link**  
Photonics North (2021), ISBN 978-166544483-5
- Hisaichi, S.; K. Sumino, K. Ueda, H. Kasebe, T. Yamashita, T. Yuasa, U. Lippmann, P. Aswendt, R. Höfling, Y. Watanabe  
**Depth-Aware Dynamic Projection Mapping using High-speed RGB and IR Projectors**  
Proceedings - SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies, ISBN 978-145038685-2

## Abschlussarbeiten

### Theses

---

#### Bachelorarbeiten / Bachelor theses

- Anja Barteilmei  
**Konzeption und Design einer Multiapertur  $2\pi$  Panoramakamera**  
Technische Universität Ilmenau
- Clemens Berger  
**Simulation der thermo-mechanischen Wechselwirkung partikelverstärkter AM-Werkstoffe**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Johanna Conrad  
**Realisierung von lasergeschriebenen Wellenleitern für quantenoptische Anwendungen**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Darius Haitsch  
**Quantum Frequency Mode Measurement via an Array of Fiber Bragg Gratings**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Kevin Hanemann  
**Iridium-Dielektrika-Schichtsysteme für absorbierende Entspiegelungen im nahen infraroten Spektralbereich**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Jonas Reimer  
**Erstellung eines Bewertungskatalogs zur qualitativen Beurteilung von führerlosen Transportsystemen zur logistischen Optimierung der Fertigung von Einbaumülleimern**  
Technische Universität Ilmenau
- Lukas Koblenz  
**Bestimmung von Prozessparametern zur Herstellung von sphärischen Mikrolinsen-Arrays mit Hilfe des chemischen Reflow Verfahrens**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Chen-Jui Lee  
**Check the Checker des Bildverarbeitungssystems der Produktionslinie Niederdrucksensor 3. Generation**  
Technische Universität Ilmenau

- Katharina Lorch  
Analytische Anwendung des PDCA-Zyklus im Anlaufmanagement am Beispiel der Anlauflinie des wirkdruckbasierten Luftmassenmessers Robert Bosch Fahrzeugelektrik Eisenach GmbH  
Technische Universität Ilmenau
- Hundeck Martin  
Integration eines Brenner Moduls zur Bewältigung zukünftiger Emissionsanforderungen in Acht- und Vierzylinderabgassysteme  
Technische Universität Ilmenau
- Chiara Mathis  
Untersuchungen zum konstruktiven Entwurf einer motorisierten, höhenverstellbaren Z-Achse für das modulare Sichtprüfgerät Qualileo  
Technische Universität Ilmenau
- Sven Padutsch  
Laser-Pulver-Bett-Schmelzen von Kalk-Natron-Glas mit einem CO<sub>2</sub>-Laser  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Darya Piatrova  
Beugungseffizienzuntersuchungen an kombinierten Blaze-Gittern  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Konrad Scheller  
Untersuchungen zur Automatisierung eines Trennprozesses von Glaskapillaren für die Thermometerfertigung  
Technische Universität Ilmenau
- Mats Segbers  
Messung und Stabilisierung der Pulsdauer von Femtosekundenlasersystemen  
Technische Universität Ilmenau
- Anika Waitz  
Veränderung der Substratoberfläche von BK7 in Folge der Ultraschallreinigung mit alkalischen Lösungen – Ein Methodenvergleich zur Oberflächenanalyse  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Frank Winkler  
Konstruktion einer Versuchsanordnung zur breitbandigen multispektralen Bildaufnahme  
Technische Universität Ilmenau

## Masterarbeiten / Master theses

- Mahmoud Abdelaal  
Ultrashort Pulse Characterization  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Ammar Abdullah  
Investigation of a method for the Implementation of a Fast Spots Detection for Shack-Hartmann Wavefront Sensor using FPGA  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Shawon Alam  
Optical and mechanical properties of ternary oxide thin-films of SiO<sub>2</sub>:HfO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:HfO<sub>2</sub>, and HfO<sub>2</sub>:TiO<sub>2</sub> by atomic layer deposition (ALD) for high power laser applications  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Temesgen Alemu  
Design of head-up displays  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Cristina Amaya  
Temporal Contrast Improvement for Multi-Pass Cell Nonlinear Compression  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Gabriela Araguillin  
Design of a Miniaturized Photometric Ellipsometer Based on a Nanowire Grid Polarizer  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Annika Auerbach  
Konzept und Realisierung eines webbasierten Auditmanagementsystems zur optimierten Auditierung  
Technische Universität Ilmenau
- Julia Barnikol-Oettler  
Dreidimensionale Rekonstruktion der Kapillarfront beim Laserstrahlschweißen  
Technische Universität Ilmenau
- Maximilian Benner  
Aufbau eines CEP-stabilen Seedlasers  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prerana Chakrabarti  
Designing an X-ray Pinhole Detector System for Electron Beam Emittance Diagnostics at the 3rd Generation Light Source PETRA III  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

# Abschlussarbeiten

## Theses

---

- Uday Chandrashekara  
**Polarization Based Quantum Bit Error Rate Optimization for Quantum Communication**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Kieu Manh Dinh  
**Entwicklung, Modellierung und Analyse des Gesamtprozesses Verpackung und Erarbeitung von Soll-Prozessszenarien unter Verwendung des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses**  
Technische Universität Ilmenau
- Nikolaus Gocha  
**Untersuchung der Kombination von Si- und InGaAs-Bildsensoren zur Erzielung einer breitbandigen multispektralen Bilderfassung**  
Technische Universität Ilmenau
- Luis Javier Gonzalez Martin del Campo  
**Experimental Demonstration of High-Dimensional Hyperentangled Quantum States**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Anja Grobecker  
**Maßgeschneidertes Lasertrimmen von ashpärischen Stablinsen für hochstabile monolithische Interferometer-Baugruppen**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Daniel Heinig  
**Effizienzoptimierung der Singlemode-Faserkopplung mithilfe eines adaptiv-optischen Systems**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Alexander Henne  
**Untersuchung und Einordnung ausgewählter Bildmerkmale und Ähnlichkeitsmaße für den Einsatz in der Stereoskopie mithilfe eines bildverarbeitenden neuronalen Netzes**  
Technische Universität Ilmenau
- Jacob Hensel  
**Kostenstruktur und zukünftige Technologien im Bereich Beleuchtung und Scheinwerfer: Ein Zukunftsausblick auf die Fahrzeuge der KTM AG im Jahr 2028**  
Technische Universität Ilmenau
- Runel Yasmin Hermiz  
**Die Rahmenvereinbarung Serielles und Modulares Bauen als Regulierungsinstrument kommunaler Wohnungsunternehmen**  
Bauhaus-Universität Weimar
- Robin Horn  
**Optisches Design und Auslegung einer optronischen Baugruppe für die bispektrale Messung gasförmiger Medien**  
Technische Universität Ilmenau
- Yu Hou  
**Entwurf und Umsetzung eines Demonstrators für ein Multikamerasystem**  
Technische Universität Ilmenau
- Sören Jauch  
**Untersuchungen zur optischen Funktionalisierung von Silikonen**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Johanna Karl  
**Untersuchung des Einflusses verschiedener Designparameter auf die Systemauslegung spektraler Snapshot Multiapertur-Kameras**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Johannes Kaufmann  
**Fundamental investigations of silicon structuring with Helium ions for a novel technology in the fabrication of X-ray optics**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Kevin Lührs  
**Entwicklung eines berührungslosen optischen Messsystems an einer Abkantpresse zur Bestimmung des Winkels über eine definierte Biegelänge**  
Technische Universität Ilmenau
- Tobias Koch  
**Inbetriebnahme, Programmierung und synchrone Ansteuerung von Komponenten einer spezifischen Vorrichtung zur flexiblen Faserbearbeitung**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Stefan Ralf Andreas Krämer  
**Untersuchungen zur optischen Erfassung des Quarzgehalts in Atemluft**  
Technische Universität Ilmenau

- Simon Jakob Lanfermann  
Adaption von Bewegungsdetektion zwischen 2D-Grauwertbildern auf die Datenbasis 3D-Punktwolken  
Technische Universität Ilmenau
- Friederike Lange  
Fehlervermeidung in der Produktentwicklung - Analyse und Optimierung am Beispiel des Kaffeevollautomaten  
Technische Universität Ilmenau
- Ming Lee  
Photonic Waveguide with Embedded Two-dimensional Material  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Rongkuan Leng  
Light scattering based roughness analysis of transparent substrates  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Hongbo Li  
Analyse und Verbesserung eines Verfahrens zur Erstellung einer digitalen Übersichtskarte in der industriellen Bildverarbeitung  
Technische Universität Ilmenau
- Ke Li  
Towards single shot structured light 3d scanning: synthetic training data for robust deep learning approaches  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Abrar Fahim Liaf  
Influence of a Titanium seed layer on the optical properties of ultrathin aluminum layers prepared by evaporation  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Jiaming Liu  
Simulation and optimization of gas plasma based THz generation  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Kun Liu  
Data-Augmentation und instanzbasierte semantische Segmentierung in der Qualitäts-sicherung industriell erzeugter Bauteile  
Technische Universität Ilmenau
- Yanan Liu  
Grundsatzuntersuchung zur Anwendung von Snapshot-Polarisationskamera in der industriellen Bildverarbeitung  
Technische Universität Ilmenau
- Zheng Liu  
Verfahren zur Bewertung der Plausibilität von Entscheidungen und zur Erkennung des Nachlernbedarfs von neuronalen Objektklassifikatoren  
Technische Universität Ilmenau
- Elshan Mahmudlu  
Inscription and Analysis of Multiple Eccentric Fibre-Bragg-Gratings in Polymer Optical Fibres for Bend Sensors  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Thomas Mattheis  
Hard- und Softwareseitige Implementierung einer Schnittstelle zur Datenbündelung von Sensorsignalen zum Einsatz an einem autonomen Schweißtraktor  
Technische Universität Ilmenau
- Christina Mehlhorn  
Innovation von optischen Prüfsystemen für Linsen der Carl Zeiss Jena GmbH  
Technische Universität Ilmenau
- Michaela Mensing  
Evaluierung von Silberschichtsystemen für Spiegelteleskope  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Elisabeth Montag  
Design und Realisierung einer Multispektralkamera für den SWIR-Bereich  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Sarath Maratha Palli  
Cooling of Strontium atoms in an optical lattice  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Patrick Mehlhorn  
Analyse der spektralen Charakteristik ausgewählter Gesteinsklassen für die effiziente automatisierte Klassifikation  
Technische Universität Ilmenau
- Daniel Santiago Penagos Molina  
Refractive Index Analysis of Biological Specimens using Multi-Wavelength Ptychography  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Zheng Qu  
Atomic layer deposition of  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ . Process development using  $\text{Yb}(\text{Cp})_3$  as ALD precursor  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

# Abschlussarbeiten Theses

- Vishnoo Natarajan Rajkumar  
**Deposition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on HTS SQUIDs at room temperature using ALD**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Muhammad Junaid Raza  
**Investigation and Evaluation of Laser Speckle Contrast in Head-up-Display Application**  
Technische Universität Ilmenau
- Sebastian Ritter  
**Femtosecond fringe pattern projection systems for 3D measurement of ultrafast processes**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Simon Rösler  
**Entwicklung einer Methodik zur effizienten Erfassung und Auswertung von Qualitätsdaten in der Hochvolt-Batterieproduktion unter Berücksichtigung vorhandener IT-Systeme**  
Technische Universität Ilmenau
- Moritz Schäfer  
**Konzeption eines wissensbasierten Systems zur Fehlerkategorisierung und -klassifizierung im Reklamationsprozess bei der Bosch Rexroth AG**  
Technische Universität Ilmenau
- Eric Schmucker  
**Numerische und experimentelle Untersuchung von Vibrationen bei drehender Diamantbearbeitung metallischer Werkstoffe**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Max Schneider  
**Optische Wirkungsweise verschiedener Mikrostrukturgeometrie auf Oberflächen von Lichtleitern in Display-Hintergrundbeleuchtungen**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Karl Schubert  
**OPCPA-free, tunable, efficient, ultrafast source**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Tilman Seifert  
**Optimierung der Prozessstabilität im Rahmen einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung**  
Technische Universität Ilmenau
- Tina Seifert  
**Untersuchungen zur Optimierung der Schichthaftung auf Polycarbonaten**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Alam Shawon  
**Optical and mechanical properties of ternary oxide thin-films of  $\text{SiO}_2:\text{HfO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{HfO}_2$ , and  $\text{HfO}_2:\text{TiO}_2$  by atomic layer deposition (ALD) for high power laser applications**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Zhe Shen  
**Umsetzung eines Verfahrens zur gleichzeitigen Objekterkennung und Schätzung menschlicher Posen aus Einzelbildern**  
Technische Universität Ilmenau
- Kiran Shivaprakash  
**Comparison between two different interferometric methods to observe and measure the radius and quality of optical surfaces**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Li Shixian  
**Erstellung und Umsetzung eines Algorithmus zur Korrektur der Verzeichnung von Objektiven**  
Technische Universität Ilmenau
- Eric Teubner  
**Der Einfluss der Wohneigentumsquote auf Immobilienblasen – eine Analyse möglicher Korrelationen**  
Bauhaus-Universität Weimar
- Paul Voigt  
**Untersuchung von Medusa82-Elektronenstrahlresist für Grautonlithografie**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Linzhou Wan  
**Videoanalyse unter Verwendung von Deep-Learning-Architekturen**  
Technische Universität Ilmenau
- Yuhua Wang  
**Design and correction of head mounted displays**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Tymoteusz Wrzeszcz  
**Investigations on straylight in Echelle spectrometer gratings**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
  
- Wang Yichen  
**Analyse und Auswahl von Prüfverfahren für die Optimierung der Fertigung von piezoresistiven Drucksensoren**  
Technische Universität Ilmenau
  
- Gu Yunan  
**Entwurf und Umsetzung eines Verfahrens zur Erstellung einer digitalen Übersichtskarte in der industriellen Bildverarbeitung**  
Technische Universität Ilmenau
  
- Yu Zhang  
**A self-aligned fiber to chip coupler for cryogenic quantum photonic integrated circuits**  
Technical University Delft
  
- Xinchang Zou  
**Investigation of direct writing methods for large area gratings**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

## Promotionen / Dissertation

- René Berlich  
**Monocular three-dimensional imaging**  
TU Delft
  
- Jonas Berzins  
**Optically-Resonant Nanostructure-based Systems for Spectral Selectivity**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
  
- Ulrike Blumröder  
**Untersuchung der THz-Emission von Silizium in Abhängigkeit von Grenzflächen- und Kristalldefekten**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
  
- Victor Arved Distler  
**Stimulated Raman scattering in High power Fiber Lasers**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
  
- Matthias Goy  
**Aktive Metallspiegel für Anwendungen in der satellitenbasierten Beobachtung**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
  
- Philipp Raphael Greiner  
**Webbasierte integrierte Management- und Auditmanagementsysteme**  
Technische Universität Ilmenau
  
- Michael Jenne  
**Orts- und zeitaufgelöste Analyse der Volumenbearbeitung von Glas mit raum-zeitlich geformten ultrakurzen Laserpulsen**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
  
- Robert Klas  
**Efficiency Scaling of high harmonic generation using ultrashort fiber lasers**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
  
- Heiko Knopf  
**Verstärkung der Licht-Materie-Wechselwirkung funktionaler Monolagen durch deren Einbettung in Resonatorschichtsysteme**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
  
- Franz Johann Friedrich Löchner  
**Second-Order Nonlinear Frequency Generation in Nanostructured Surfaces**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

# Abschlussarbeiten

## Theses

---

- Xiang Lu  
**Modelling and simulation of light scattering in optical systems**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Sebastian Merx  
**Beam shaping of Bessel beams with high power laser systems**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Michael Müller  
**The Scaling Limits of Beam-Splitter-Based Coherent Beam Combining**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Anton Pakohomov  
**Efficient modeling and optimization of second-harmonic generation from nanophotonic components**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Yang Ran  
**Ultrabroadband coherent anti-stokes Raman scattering for gas temperature and concentration measurement**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Johannes Steinmetzer  
**Exploring Potential Energy Surfaces in Ground- and Excited States**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Konstantin Trambitckii  
**2D surface analysis of metal surfaces using texture feature algorithms**  
Technische Universität Ilmenau
- Daniel Werdehausen  
**Nanocomposites as Next- generation Optical Materials: Fundamental Properties and Potential**  
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
- Michaelis, D.; Schreiber, P.  
**Projektionsvorrichtung und Verfahren zur Projektion mit optischen Freiformflächen**  
EP 3345049 A1
- Beckert, E.; Pabst, O.; Dannberg, P.  
**Verfahren zum Herstellen eines optischen Mikrolinsenarrays**  
EP 3585599 A1
- Kinast, J.; Risse, S.  
**Spiegelträger für einen optischen Spiegel aus einem Verbundwerkstoff und Verfahren zu dessen Herstellung**  
US 2021-0231912 / JP 2021-523411
- Schreiber, P.; Li, C.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Fischer, S.  
**Abblendlicht mit verringerter Baulänge/ Abblendlichtscheinwerfer**  
US 2021-0231280 A1 / SG 11202103485P / CN 00011291266 A
- Limpert, J.; Rothhardt, Jan (GSI); Eschen, W. (FSU)  
**Verfahren und Vorrichtung zur linsenlosen Bildgebung mittels Fourier-Transformations-Holographie**  
DE 10 2020 101 994 A1
- Notni, G.; Zhang, Ch.; Sperrhake, J.; Nisser, M.; Pertsch, T.  
**Verfahren und Vorrichtung zur kontaktfreien Bestimmung von zeitlichen Farb- und Intensitätsveränderungen**  
DE 10 2020 108 064 A1
- Schwinde, S.; Schröder S.; Schlegel R.; Munzert P.  
**Metallische Lichtfalle**  
EP 3825739 A1
- Stempfhuber, S.; Gäbler, D.; Schenk, P.; Munzert, P.; Schwinde, S.  
**Aluminiumschichten mit geringer Oberflächenrauheit durch Substratvorbeimung**  
EP 3779526 A1 / US 2021-0047719 / DE 102019122078 A1
- Schulz, U.; Rickelt, F.; Schweinfurth, J.  
**Verfahren zur Herstellung von niedrigbrechenden SiO<sub>2</sub>-basierten Schichten**  
DE 102019122451 A1
- Landmann, M. (IAP); Dietrich, P. (IAP); Heist, S.; Kühmstedt, P.; Notni, G.  
**Sequenzielle Streifenprojektion**  
DE 10 2020 201 536 A1
- Schwinde, S.; Leitel, R.; Schröder S.  
**Spiegel und Verfahren zu dessen Erneuerung**  
DE 102020101041 A1
- 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 A1
- Nolte, S.; Siems, M. P.; Heck, M.; Richter, D.; Krämer, R.; Goebel, T. A.;  
**laserbasierte Anpassung der Eigenschaften optischer Komponenten**  
EP 19 769 385.6-1230 / US 2021-0402512 A1
- Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.  
**Vorrichtung und Verfahren zur relativen Positionierung einer Multiaperturoptik mit mehreren optischen Kanälen relative zu einem Bildsensor**  
EP 2805072 T3
- Wippermann, F.; Lange, N.; Pabst, O.  
**Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Verfahren zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes**  
US 2021/0263289 A1 / JP 2020-186791
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.  
**3D-Multiaperturabbildungsvorrichtungen, Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Bereitstellen eines Ausgangssignals einer 3D-Multiaperturabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes**  
ES 2808940 T3

# Schutzrechte

## Intellectual property

---

- Duparré, J.; Wippermann, F.  
**Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
EP 21163222.9
- Wippermann, F.; Duparré, J.; Brückner, A. Oberdörster, A.  
**Erzeugung von Panoramabildern**  
JP 2021-514593
- Wippermann, F.; Duparré, J.  
**Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung zur Erzeugung einer Tiefenkarte**  
US 2021-0314548 A1 / CN 000113366821 A
- Wippermann, F.; Duparré, J.; Brückner, A.  
**Vorrichtung mit einer Multiabbildungsvorrichtung zum akkumulieren von Bildinformationen**  
US 2021-0314471 A1 / CN 000113330730 A
- Wippermann, F.; Duparré, J.  
**Multikanalabbildungsvorrichtung und Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
CN 000113227867 A
- Duparré, J.; Wippermann, F.  
**Multiaperturvorrichtung zur Bildaufnahme mit geringer Kanalzahl**  
TW 109119046
- Duparré, J.; Wippermann, F.; Tünnermann, A.  
**Abbildungsvorrichtung für projiziertes Punktmuster**  
DE 102020207302.3 A1
- Danz, N.; Flämmich, M.;  
**Strahlungsemitternde organisch-elektronische Vorrichtung und Verfahren zu deren Herstellung**  
EP 2 652 810 B1
- Limpert, J.; Tünnermann, A.; Nodop, D.  
**Faserverstärkersystem - Unterdrückung stimulierter Brillouin Streuung**  
EP 2647090 B1
- Schreiber, P.; Sieler, M.; Kraus, M.  
**Projektionsdisplay und Verfahren zum projizieren eines Gesamtbildes**  
DE 10 2012 205 164 B4
- Nolte, S.; Steinkopf, R.; Vetter, C. (FSU); Szameit, A. (FSU); Gross, H. (FSU); Ornigotti, M. (FSU)  
**Ring-Linsen-System**  
EP 000003479162 B1
- Naujok, P.; Yulin, S.; Kaiser, N.  
**Multilayerspiegel zur Reflexion von EUV-Strahlung und Verfahren zu dessen Herstellung**  
JP 6938626
- Popp, J.; Gottschall, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.; Meyer, T.  
**Erzeugung von synchronisierten Laserpulsen bei variablen Wellenlängen**  
US 16/630,545
- Schreiber, T.; Stutzki, F.  
**Effiziente Methode zum Erzeugen hoher Leistungen mittels spektraler Kombination mehrerer Faserverstärker**  
DE 102017115786 B4
- Schröder, S.; Felde (IAP), N.; Coriand, L.; Trost, M; Notni, G.  
**Kontaminationsabweisende Beschichtung für optische Komponenten**  
JP 2019-075427
- Coriand, L.; Duparré, A.; Notni, G.; Felde, N. (IAP)  
**Beschichtung für Glasoberfläche, Verfahren zu deren Herstellung und Glaselemente**  
DE 102014112133 B4
- Wippermann, F.; Reimann, A.; Lange, N.; Bräuer, A.  
**Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und Verfahren zur Herstellung derselben**  
US 11,009,673

- Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.  
**Vorrichtung und Verfahren zur Relativen Positionierung einer Multiaperturoptik mit mehreren optischen Kanälen relativ zu einem Bildsensor**  
JP 6858211
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.  
**Vorrichtung mit einer Multikanalabbildungsvorrichtung und Verfahren zum Herstellen derselben**  
CN 000108351497 B / JP 6832344
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, tragbare Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
CN 000108139566 B
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem**  
CN 000108431661 B
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit einer reflektierende Facetten aufweisenden Strahlumlenkvorrichtung**  
TW I721353 / CN 000108353115 B
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit kanalindividueller Einstellbarkeit**  
CN 000108139565 B
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit Optiksubstrat**  
CN 000108351492 B
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.  
**3D-Multiaperturabbildung**  
CN 000108353117 B
- Wippermann, F.; Lange, N.; Pabst, O.  
**Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Herstellen derselben und Verfahren zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes**  
DE 10 2015 220 566 B4 / US 11,016,273 / CN 000108432225 B / KR 10-2233890  
JP 6962573
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Reimann, A.; Bräuer, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtungen, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem**  
KR 10-2219527 / KR 10-2286191
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs**  
US 10,606,152 B2
- Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.  
**3D-Multiaperturabbildungsvorrichtungen, Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum Bereitstellen eines Ausgangssignals einer 3D-Multiaperturabbildungsvorrichtung und Verfahren eines Gesamtgesichtsfeldes**  
KR 10-2211291 / CH CN 000109479126 B / JP 6864411
- Duparre, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Oberdörster, A.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
US 11,106,047
- Duparre, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Oberdörster, A.  
**Vorrichtung zur Abbildung von Teilgesichtsfeldern, Multiaperturvorrichtung und Verfahren zum Bereitstellen derselben**  
DE 10 2017 206 442 / KR 10-2230188 / JP 2021-052628
- Duparré, J.; Wippermann, F.  
**Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
DE 10 2017 012 197 B4 / US 11,070,31
- Duparré, J.; Wippermann, F.  
**Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
US 10,996,460 / KR 10-2303135
- Wippermann, F.; Duparré, J.  
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit geringer Falschlichtempfindlichkeit, Abbildungssystem und Verfahren zu Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
CN 000110892701 B
- Wippermann, F.; Duparré, J.; Brückner, A.; Oberdörster, A.  
**Erzeugung von Panoramabildern**  
TW I730298
- Wippermann, F.; Duparré, J.  
**Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrichtung zur Erzeugung einer Tiefenkarte**  
TW I745805

# Schutzrechte

## Intellectual property

---

- Wippermann, F.; Duparré, J.; Brückner, A.  
**Vorrichtung mit einer Multiabbildungsvorrichtung zum  
akkumulieren von Bildinformationen**  
US 2021/0314471 A1
- Wippermann, F.; Duparré, J.  
**Multikanalabbildungsvorrichtung und Vorrichtung mit  
einer Multiaperturabbildungsvorrichtung**  
TW I742480
- Dannberg, P.; Wippermann, F.; Bräuer, A.; Duparre, J.  
**Wafer-Level-Linsen ohne Glassubstrat bzw.  
transparenten Träger im optischen Pfad**  
EP 3 081 369 B1

## Auszeichnungen Awards

---

- **Lothar Späth-Award**, 19.11.2021  
Dr. Stefan Risse, Henrik von Lukowicz zusammen mit Fa. Hensold
- **Landesbeste Azubildende der IHK Thüringen**, 12.11.2021  
Josephine Canis
- **Jahrgangsbeste Auszubildende der FhG**, 4.11.2021  
Josephine Canis
- **»Top Innovation 2021«** der Fachzeitschrift »inVision«, 06.01.2021  
Dr. Stefan Heist und Team
- **Carl Zeiss Award for Young Researchers**, 10.06.2021  
Dr. Stefan Heist
- **Community Prize 2021**, 21.12.2021  
Max-Planck-School of Photonics
- **ZEISS Ph.D. Award in Modern Optics**, 12.11.2021  
M.Sc. Marta Gilaberte Basset
- **Innovationspreis »INNOspace«**, 01.07.2021  
Dr. Tobias Vogl
- **SPARC PhD-Prize**, 06.09.2021  
Dr. Robert Klas
- **Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung, beste Dissertation auf dem Gebiet der optischen Messtechnik**, 12.11.2021  
Dr. Thomas Siefke
- **3rd Place Best Student Paper, Photonics West sub-conference "Fiber Lasers XVIII: Technology and Systems"**, 05.04.2021  
Albrecht Steinkopf
- **Elevator-Pitch Hot-Stuff-Award**, 29.09.2021  
Denny Häßner

## Messebeteiligungen Trade fair participations

---

- **Consumer Electronics Show CES**  
11.-14.1.2021, USA (virtuell)
- **Photonics+**  
17.-18.2.2021, Frankreich (virtuell)
- **SPIE.Photonics West**  
6.-11.3.2021, USA (virtuell)
- **Hannover Messe**  
12.-16.4.2021, Hannover (virtuell)
- **Control Stuttgart**  
4.-7.5.2021, Stuttgart (virtuell)
- **Photonics Days**  
29.-30.9.2021, Jena (hybrid)
- **Vision Stuttgart**  
5.-7.10.2021, Stuttgart
- **Compamed Düsseldorf**  
15.-18.11.2021, Düsseldorf
- **SpaceTech Expo**  
16.-18.11.2021, Bremen

# Ausgewählte Vorlesungen

## Selected lectures

---

- apl.-Prof. Uwe Zeitner  
**Micro / Nanotechnology**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Adriana Szeghalmi  
**Vakuum- und Dünnschichtphysik**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Erik Beckert  
**Optikmontage**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Dr. Fabian Steinlechner  
**Quantum Communication**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Falk Eilenberger  
**Quantum Optics**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Frank Schrempel  
**Fortgeschrittenen- und Projektpraktikum**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Markus Gräfe  
**Quantum Imaging and Sensing**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Olaf Stenzel  
**Structure of Matter**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Dr. Sebastian Händschke  
**Eine gründungsorientierte Einführung in die BWL**  
Bauhaus-Universität Weimar
- Prof. Dr. Gunther Notni  
**Aufnahme und Verarbeitung von 3D Daten**  
TU Ilmenau
- Prof. Dr. Robert Brunner  
**Optik - Grundlagen und Anwendungen**  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Prof. Herbert Gross  
**Design and Correction of Optical Systems**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Jens Limpert  
**Laser Physics**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Stefan Nolte  
**Experimental Optics**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Stefanie Gräfe  
**Quantenchemie I**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Thomas Pertsch  
**Fundamentals of modern optics**  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

# 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)