



JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2020



we love photonics

COVER *Quantencomputer werden es notwendig machen unsere aktuellen Kommunikationssysteme neu zu denken. Daten können jetzt abgespeichert und ihre Verschlüsselung beruhend auf heutigen Algorithmen später, mithilfe leistungsfähigerer Rechner, ausgelesen werden. Um etwa Wirtschaftsgeheimnisse vor diesen sogenannten »store now, decrypt later«-Attacken zu schützen, braucht es neue Verschlüsselungstechnologien. Eine solche neue Technologie ist der Austausch von Quantenschlüsseln (kurz: QKD für »Quantum Key Distribution«). Eine wesentliche technische Komponente für diese hochmoderne Quantenkommunikation basierend auf QKD ist dabei eine stabile, gut in bestehende Systeme integrierbare Quelle zur Erzeugung verschränkter Photonenpaare. Eine »Entangled Photon Source« (EPS) ist in den vergangenen Jahren am Fraunhofer IOF entwickelt worden. Die auf dem Cover dieses Jahresberichts im Detail gezeigte Lichtquelle steht stellvertretend für eine Reihe hochspezialisierter und an die Anforderungen ihres jeweiligen Einsatzszenarios angepasste Quantenquellen. All diese Quellen sind Rahmen des am Fraunhofer IOF neu etablierten Netzwerkes für angewandte photonischen Quantentechnologien im Jahr 2020 entstanden. |*

Quantum computers will make it necessary to rethink our current communication systems. Data can be stored now and its decryption can be done later, using more powerful computers. New encryption technologies are needed to protect confidential information from "store now, decrypt later" attacks. Such a new technology is the Quantum Key Distribution (QKD). An essential technical component for the quantum communication based on QKD is a stable source for generating entangled photon pairs. The light source shown in detail on the cover of this annual report is representative of a series of highly specialised quantum sources adapted to the requirements of their particular application scenario. All of these sources have been developed within the framework of the newly established network for applied photonic quantum technologies at Fraunhofer IOF in 2020.

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT
2020**

VORWORT

PREFACE

Als Forschungsinstitut für Angewandte Optik und Feinmechanik setzen wir uns immer wieder aufs Neue mit der Frage auseinander: Was wird die Zukunft bringen und wie können wir uns schon heute darauf vorbereiten? Mit der COVID-19-Pandemie wurde unsere Fähigkeit, uns auch kurzfristig auf neue Herausforderungen einzustellen, erneut auf die Probe gestellt. Das Fraunhofer IOF und seine Mitarbeitenden meisterten die Situation aller Widrigkeiten zum Trotz souverän. Gemeinsam blicken wir auf ein außerordentlich erfolgreiches Jahr zurück.

Wie flexibel angewandte Forschung vor dem Hintergrund akuter Bedrohungen sein kann, bewies die Fraunhofer-Gesellschaft mit ihrem Aktionsprogramm »Fraunhofer vs. Corona«. Auch das Fraunhofer IOF beteiligt sich daran: Gemeinsam mit weiteren Fraunhofer-Instituten entwickeln wir u. a. autonome Robotersysteme zur mobilen Desinfektion in öffentlichen Gebäuden und Verkehrsmitteln. Andere Projekte wiederum setzen sich mit dem Nachweis von Viren über photonische Verfahren auseinander.

Doch auch abseits von Corona spielt die Photonik als Schlüsseltechnologie in vielen Bereichen unseres Lebens eine entscheidende Rolle. Passend dazu durften wir im vergangenen Jahr einen runden Geburtstag feiern: Der Laser wurde 60 Jahre alt. Er ist nicht nur unverzichtbar in der modernen Medizintechnik, sondern auch als Energie- und Informationsträger ein wesentliches Rückgrat unserer modernen Gesellschaft.

Zur beständigen Weiterentwicklung der Lasertechnologie tragen Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer IOF in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena wesentlich bei: Im Rahmen unserer Arbeiten im »Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources« (CAPS) konnten wir erstmals einen Ultrakurzpulslaser der 10 kW-Klasse demonstrieren – ein Weltrekord!

Laser und Optiken mit besonderen Eigenschaften stehen auch bei anderen zukunftsweisenden Projekten im Mittelpunkt: Für ihr Projekt »EUV-Lithographie – Neues Licht für das digitale Zeitalter« zeichnete Bundespräsident Frank Walter Steinmeier das Experten-Team um Dr. Peter Kürz (ZEISS), Dr. Michael

As a research institute for applied optics and precision engineering, we are constantly grappling with the question: What will the future bring and how can we prepare for it today? With the Covid-19 pandemic, our ability to adapt to new challenges, even at short notice, was once again put to the test. Against all odds, Fraunhofer IOF and its employees mastered the situation with aplomb. Together, we look back on an extraordinarily successful year.

The Fraunhofer-Gesellschaft proved how flexible applied research can be against the background of acute threats with its active initiative, "Fraunhofer vs. Corona". Fraunhofer IOF is also participating in this program; together with other Fraunhofer Institutes, we are developing autonomous robot systems for mobile disinfection in public buildings and means of transportation, among other things. Other projects deal with the detection of viruses via photonic methods.

However, photonics also plays a decisive role as a key technology in many areas of our lives beyond Covid-19. Fittingly, we celebrated a milestone birthday last year: the laser turned 60. It is not only indispensable in modern medical technology but also an essential backbone of our modern society as a carrier of energy and information.

Researchers at Fraunhofer IOF, in cooperation with the Chair of Applied Physics at the Friedrich Schiller University in Jena, are making a significant contribution to the ongoing development of laser technology. As part of our work in the "Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources" (CAPS), we were able to demonstrate an ultrashort pulse laser in the 10 kW range for the first time - a world record!

Lasers and optics with special properties are also the focus of other pioneering projects: German President Frank Walter Steinmeier awarded the German Future Prize to a team of experts led by Dr. Peter Kürz (ZEISS), Dr. Michael Kösters (TRUMPF), and Dr. Sergiy Yulin (Fraunhofer IOF) for their project "EUV Lithography - New Light for the Digital Age". By making EUV technology ready for series production, they revolutionized semiconductor production. I am particularly proud that this is the third time that the German President's honor for pioneering technology has gone to employees of our institute.



Kösters (TRUMPF) und Dr. Sergiy Yulin (Fraunhofer IOF) mit dem Deutschen Zukunftspreis aus. Indem sie die EUV-Technologie zur industriellen Serienreife brachten, revolutionierten sie die Halbleiterproduktion. Es erfüllt mich mit besonderem Stolz, dass die Ehrung des Bundespräsidenten für zukunftsweisende Technologie damit nun schon zum dritten Mal an Mitglieder unseres Instituts ging.

Ein weiteres Zukunftsprojekt ist derzeit unsere Forschung zur Quantenkommunikation. Auch sie ist ohne die Photonik nicht denkbar: Seit einem Jahr entwickeln wir zusammen mit dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, dem Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts sowie dem Institut für Kommunikation und Navigation des DLR in der BMBF-Initiative »QuNET« neue Möglichkeiten zur hochsicheren Kommunikation. Im Dezember präsentierten Bundesforschungsministerin Anja Karliczek sowie die beteiligten Forschungsinstitute erste Ergebnisse: Sie stellten gemeinsam die Grundlagen der Systemarchitektur sowie erste Experimente zum Austausch von Quantenschlüsseln über verschiedene Distanzen vor. Kernelement der Quantenkommunikation ist dabei eine Quelle zur Erzeugung verschränkter Photonen. Es war uns eine besondere Ehre, diese Photonenpaarquelle Bundeskanzlerin Angela Merkel beim Digitalgipfel 2020 persönlich vorstellen zu dürfen.

Um neue Kapazitäten zur Erforschung modernster Quantentechnologien zu schaffen, eröffneten wir im Fraunhofer-Projektzentrum MEOS in Erfurt im vergangenen Jahr zusätzlich ein neues Quantenapplikationslabor. Es bietet Raum und Ausstattung für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der Quantenkommunikation und steht allen interessierten Nutzerinnen und Nutzer aus Wissenschaft und Wirtschaft offen. Aktuell qualifizieren wir außerdem eine Netzverbindung zwischen Erfurt und Jena zur Durchführung von Experimenten in realen Kommunikationsinfrastrukturen.

Another future-oriented project in the works is our research on quantum communication. This, too, would be inconceivable without photonics. For the past year, we have been working with the Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, the Max Planck Institute for the Science of Light, and the DLR Institute for Communication and Navigation of the BMBF initiative "QuNET" to develop new possibilities for high-security communication. In December, German Federal Research Minister Anja Karliczek and the participating research institutes introduced their first results. They jointly presented the basics of the system architecture as well as first experiments on the exchange of quantum keys across different distances. The core element of quantum communication is a source for generating entangled photons. It was a special honor for us to personally present this photon-pair source to German Chancellor Angela Merkel at the Digital Summit 2020.

To create new capacities for research into cutting-edge quantum technologies, we additionally opened a new quantum application laboratory at the Fraunhofer Project Center MEOS in Erfurt last year. It offers space and equipment for the research and development of quantum communication and is open to all interested users from science and industry. We are also currently qualifying a network link between Erfurt and Jena for conducting experiments in real communication infrastructures.

Furthermore, I am pleased to see how young researchers of Fraunhofer IOF went their own entrepreneurial way even under difficult pandemic conditions in 2020: the start-up "SPACEOPTIX GmbH" builds components and systems for aerospace applications, among other things. For this, the founders were awarded the "Thüringer Innovationspreis" in November. Another research team, "Robust AO GmbH", successfully spun off from our institute.



Darüber hinaus freut es mich zu sehen, wie junge Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer IOF auch unter erschwerten Pandemie-Bedingungen 2020 ihren eigenen unternehmerischen Weg gingen: Das Start-up »SPACEOPTIX GmbH« baut u. a. Komponenten und Systeme für Anwendungen im Bereich Luft- und Raumfahrt. Dafür wurden die Gründer im November mit dem Thüringer Innovationspreis ausgezeichnet. Mit »Robust AO GmbH« gründete sich ein weiteres Forschungsteam erfolgreich aus unserem Institut aus.

Veranstaltungen waren im vergangenen Jahr indes rar. Dennoch war uns ihre Umsetzung wichtig, insbesondere dort wo sie der Nachwuchsförderung dienten: Zu Jahresbeginn konnten junge Unternehmerinnen und Unternehmer, darunter auch die Teams von SPACEOPTIX und Robust AO, ihre Geschäftsideen beim »Elevator Pitch« präsentieren. Dazu eingeladen hatte der am »Leistungszentrum Photonik« angesiedelte »Digital Innovation Hub Photonics«. Im September verliehen wir außerdem unseren Förderpreis, den »Applied Photonics Award«, im Rahmen der virtuellen Photonics Days an engagierte Nachwuchsforschende. Die »Max Planck School of Photonics« fokussierte sich 2020 auf digitale und forschungsorientierte Netzwerk- sowie Austauschformate in der Graduiertenausbildung.

Events, however, were rare in the past year. Nevertheless, their implementation was important to us, especially when they served to promote young talent. At the beginning of the year, young entrepreneurs, including the teams from SPACEOPTIX and Robust AO, were able to present their business ideas at the "Elevator Pitch". The "Digital Innovation Hub Photonics", which is located at the "Center of Excellence in Photonics", invited participants to this event. In September, we also presented our prize promoting young talent, the "Applied Photonics Award", to committed young researchers as part of the virtual Photonics Days. In 2020, the "Max Planck School of Photonics" focused on digital and research-oriented networking and exchange formats in graduate education.

It makes me proud that we have achieved all this against the backdrop of a global pandemic. Together with our partners from science and industry, we have not only found ways to deal with the situation but also set the course for a new working world that will remain with us beyond Covid-19 and open up new opportunities for collaboration in a digital world.

Our new organizational structure has helped us significantly in this regard. From the bottom of my heart, I would like to thank all our employees for their commitment and flexibility,

LÖSUNGEN MIT LICHT SOLUTIONS WITH LIGHT

Es macht mich stolz, dass wir all dies vor dem Hintergrund einer globalen Pandemie erreicht haben. Gemeinsam mit unseren Partnerinnen und Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft haben wir nicht nur Wege gefunden, mit der Situation umzugehen. Wir haben darüber hinaus die Weichen für eine neue Arbeitswelt gestellt, die uns auch jenseits COVID-19 erhalten bleibt und uns neue Möglichkeiten des Zusammenarbeitens in einer digitalen Welt eröffnen wird. Unsere neue Organisationsstruktur hat uns wesentlich dabei geholfen. Von Herzen möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für Ihr Engagement aber auch Ihre Flexibilität, die viele von Ihnen zum Teil unter großen privaten Belastungen erbracht haben, bedanken!

Die COVID-19-Pandemie hat uns gezeigt, dass wir auch unter außerordentlichen Bedingungen kreative und visionäre Projekte mit Partnerinnen und Partnern gestalten können. Ich bedanke mich bei allen Kooperationseinrichtungen, Unternehmen sowie Forschungsförderern und Stiftungen, die uns auch in diesem turbulenten Jahr ihr Vertrauen geschenkt und gemeinsam mit uns innovative Lösungen mit Licht entwickelt haben.

Auch 2021 wird uns die Bekämpfung der Pandemie in Atem halten. Insbesondere in der Quantenwelt, speziell in den Bereichen Quantenkommunikation, -bildgebung, -sensing und -computing, warten neue und spannende Herausforderungen auf uns. Freudig sehe ich auch einer Stärkung der Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam entgegen. Gemeinsam werden wir eine neue Generation von Teleskopen für den Einsatz am Boden sowie im Weltall entwickeln. Nicht zuletzt freuen wir uns auf den Beginn des dritten Bauabschnittes unseres Institutsgebäudes. Indem wir weiterwachsen, schaffen wir neue Kapazitäten für weitere spannende Forschungsprojekte, mit denen wir die Zukunft gestalten können.

which many of you have demonstrated, in some cases under great private pressure.

The Covid-19 pandemic has shown us that we can shape creative and visionary projects with partners even under extraordinary conditions. I would like to thank all cooperating institutions, companies as well as research sponsors and foundations who have continued to place their trust in us in this turbulent year and have worked with us to develop innovative solutions with light.

In 2021, the fight against the pandemic will continue to keep us on our toes. New and exciting challenges await us, particularly in the quantum world and especially in the areas of quantum communication, imaging, sensing, and computing. I also look forward to strengthening our collaboration with the Leibniz Institute for Astrophysics Potsdam. Together, we will develop a new generation of telescopes for use on the ground as well as in space. Last but not least, we are looking forward to the start of the third construction phase of our institute building. By continuing to grow, we will create new opportunities for further exciting research projects with which we can shape the future.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Leiter des Fraunhofer IOF | Director of the Fraunhofer IOF

LEFT *Bundeschancellor Merkel looks at the photon pair source for secure quantum communication. | Chancellor Merkel looks at the photon pair source for secure quantum communication.*



DREIMAL DEUTSCHER ZUKUNFTSPREIS

THREE TIMES GERMAN FUTURE PRIZE

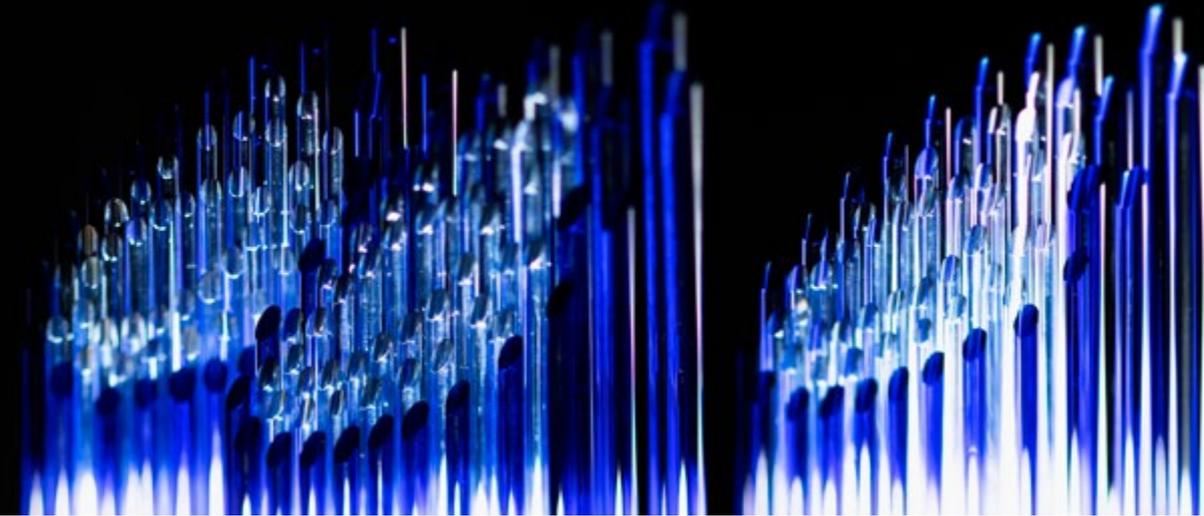
Klein, schnell und hocheffizient – Mikrochips sind die Grundlage unserer digitalen Welt. Ihre Leistungsfähigkeit entwickelt sich exponentiell weiter. Immer mehr elektronische Schaltelemente, die für das Rechnen des Computers im binären System nötig sind, finden auf modernen Chips Platz. Mehr als zehn Milliarden dieser Transistoren lassen sich mit gegenwertigen lithographischen Fertigungstechniken auf einen kaum fingernagelgroßen Mikrochip unterbringen. Zum Vergleich: Anfang der 1970er Jahre passten gerade einmal 2.000 Transistoren auf einen Chip mit vergleichbarer Größe. Damit weist ein Smartphone die millionenfache Rechenleistung des Computers auf, der 1969 die erste Mondlandung begleitete. Der Wunsch nach immer mehr Transistoren auf gleicher Fläche stößt an die Grenzen des Machbaren mit gegenwärtigen Produktionsanlagen. Forschende des Fraunhofer IOF – in Kooperation mit ZEISS und TRUMPF – haben mit ihrer Entwicklungsarbeit den Grundstein für ein neues Fertigungsverfahren gelegt. Es eröffnet völlig neue Dimensionen im Chipdesign. Mit der sogenannten »EUV-Lithographie« lassen sich noch leistungsstärkere und energiesparendere Mikrochips als jemals zuvor herstellen. Erste Geräte, die mit solchen »EUV-Chips« ausgestattet wurden, zeigen bereits beeindruckende Leistungssteigerungen. Für ihr Projekt »EUV-Lithographie – Neues Licht für das digitale Zeitalter« wurden Dr. Peter Kürz (ZEISS), Dr. Michael Kösters (TRUMPF) und Dr. Sergiy Yulin (Fraunhofer IOF) am 25. November 2020 von Bundespräsident Frank-Walter Steinmeier mit dem Deutschen Zukunftspreis ausgezeichnet.

Damit durfte sich das Fraunhofer IOF bereits zum dritten Mal über den Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation freuen: Im Jahr 2007 überzeugte ein Forschungsteam die Jury mit ihrer Entwicklung lichtintensiver Hochleistungs-LEDs. Gemeinsam mit dem Photonik-Unternehmen OSRAM war es Dr. Andreas Bräuer gelungen, die Lichtausbeute von LEDs derartig zu steigern, dass die Verwendung als allgegenwärtiges Leuchtmittel, wie wir es heute kennen, erst möglich wurde. 2013 wurde Prof. Stefan Nolte, zusammen mit Forschenden vom Institut für Angewandte Physik (FSU Jena), von BOSCH und TRUMPF, für die Entwicklung ihres UltrakurzpulsLasers (UKP-Laser) für industrielle Anwendungen ausgezeichnet. Mit dem von ihnen entwickelten Laser lassen sich unterschiedlichste Materialien präzise und schnell bearbeiten, ohne dass sie sich aufheizen und dabei Schaden nehmen. Solche UKP-Laser sind aus der heutigen Massenproduktion nicht mehr weg zu denken. Das Gewinnerteam aus 2020 setzt diese erfolgreiche Reihe fort

Small, fast and highly efficient - microchips are the foundation of our digital world. Their performance is improving exponentially. More and more electronic switching elements, which are necessary for computing in the binary system, can be fitted on modern chips. With current lithographic production techniques, more than ten billion of these transistors can be integrated into a microchip barely the size of a fingernail. By way of comparison, in the early 1970s, just 2,000 transistors could fit on a chip of a comparable size. This means that a smartphone is a million times more powerful in terms of computing power than the computer used during the first moon landing in 1969. The desire for ever more transistors on the same surface area is reaching the limits of what is feasible with current production facilities. Researchers at Fraunhofer IOF - in cooperation with ZEISS and TRUMPF - have laid the foundation for a new production process with their development work. This opens up completely new dimensions in chip design. EUV lithography makes it possible to produce even more powerful and energy-saving microchips than ever before. The first devices equipped with such "EUV chips" are already showing impressive performance gains. For their project "EUV Lithography - New Light for the Digital Age", Dr. Peter Kürz (ZEISS), Dr. Michael Kösters (TRUMPF) and Dr. Sergiy Yulin (Fraunhofer IOF) were awarded the German Future Prize by German President Frank-Walter Steinmeier on November 25, 2020.

This was the third time that Fraunhofer IOF had the honor of receiving the German President's Prize for Technology and Innovation: In 2007, a research team impressed the jury with their development of light-intensive high-power LEDs. Together with the photonics company OSRAM, they succeeded in increasing the luminous efficacy of LEDs so dramatically that their use as universal light sources as we know them today became possible in the first place. In 2013, Prof. Stefan Nolte, together with researchers from Institute of Applied Physics (FSU Jena), BOSCH, and TRUMPF, was recognized for the development of their ultrashort pulse (UKP) laser for industrial applications. The laser can be used to process a wide variety of materials precisely and quickly without heating up or damaging them. Such UKP lasers have

LEFT Preisträger des Deutschen Zukunftspreises 2020, Dr. Sergiy Yulin. |
Laureate of the German Future Prize 2020, Dr. Sergiy Yulin.



und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung sowie industriellen Serienreife der EUV-Technologie. In der Industrie, so die Vorhersage von Expertinnen und Experten, wird sie sich künftig zum Standardprozess entwickeln.

EUV steht für »extrem ultraviolett«, also Licht mit extrem kurzer Wellenlänge. Es ermöglicht die Fertigung bzw. Belichtung von winzigsten Strukturen. In der Chipfertigung gilt: je kürzer die Wellenlänge des verwendeten Lichts, um so kleinere Strukturen lassen sich damit belichten. Während bisherige Verfahren Lichtquellen mit einer Wellenlänge von 193 nm nutzen, arbeitet das zukunftsweisende Fertigungsverfahren mit nur noch 13,5 nm und verschiebt dadurch die Grenzen des technisch Möglichen. Fast drei Jahrzehnte forschten die ausgezeichneten Wissenschaftler gemeinsam mit tausenden Kolleginnen und Kollegen an dem Projekt. Resultat ihrer Arbeit ist eine durch über 2.000 Patente abgesicherte Zukunftstechnologie. Mit EUV-Licht gefertigte Chips werden die Entwicklung des autonomen Fahrens, von 5G-Netzen oder der Künstlichen Intelligenz beschleunigen und uns auch jetzt noch völlig unvorstellbare Dinge ermöglichen – Dinge, die einen ähnlichen Impact für die Geschichte der Menschheit haben werden, wie die ersten Schritte von Neil Armstrong und Buzz Aldrin auf dem Mond.

Der weltweit einzige Hersteller für EUV-Lithographie-Maschinen ist die niederländische Firma ASML. Sie hat die Technologien und Systeme vom Fraunhofer IOF, ZEISS und TRUMPF zu einem beeindruckendem Gesamtsystem zusammengefügt. Die Schlüsselkomponenten dieser Maschinen sind der Hochleistungslaser bzw. die EUV-Lichtquelle von TRUMPF und das optische Spiegelsystem von ZEISS. Beide zu realisieren, war eine besondere Herausforderung.

Viele Jahre galt es als unlösbare Aufgabe, EUV-Licht für einen industriellen Prozess in ausreichender Lichtintensität zu erzeugen und als Werkzeug zu nutzen. Stück für Stück näherte sich das nun ausgezeichnete Trio der Lösung des Problems. Am Fraunhofer IOF entstanden die Grundlagen für die optische

become an indispensable tool of today's mass production. The winning team from 2020 continued this successful series and contributed significantly to the development and industrial production readiness of EUV technology. Experts predict that it will become the standard process in industry in the future.

EUV stands for "extreme ultraviolet", i.e. light with an extremely short wavelength. It enables the production or exposure of minute structures. In chip production, the shorter the wavelength of the light, the smaller the structures that can be exposed. Whereas previous methods used light sources with a wavelength of 193 nm, the cutting-edge production method works with only 13.5 nm, thus defying the limits of what is technically possible. The award-winning scientists spent almost three decades researching the project together with thousands of colleagues. The result of their work is a future-proof technology backed by over 2,000 patents. Chips made with EUV light will accelerate the development of autonomous driving, 5G networks and artificial intelligence. It will enable us to do things that are completely unimaginable even now - things that will have a similar impact on the history of mankind as Neil Armstrong and Buzz Aldrin's first steps on the moon.

The world's only manufacturer of EUV lithography machines is the Dutch company ASML. It has combined technologies and systems from Fraunhofer IOF, ZEISS and TRUMPF to create an impressive overall system. The key components of these machines are the high-power laser for the EUV light source from TRUMPF and the optical system from ZEISS. It was a particular challenge to realize both.

For many years, it was considered an impossible task to generate EUV light for an industrial process in sufficient light intensity and to use it as a tool. Step by step, the award-winning trio approached the problem's solution. At Fraunhofer IOF, the foundations were laid for the optical component that collects the generated EUV light and guides it to the system

WIR GESTALTEN ZUKUNFT WE SHAPE THE FUTURE

Komponente, die das erzeugte EUV-Licht einsammelt und in die Anlage zur Belichtung weiterführt. Gemeinsam mit seinem Forschungsteam um Torsten Feigl, Norbert Kaiser und vielen anderen talentierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern hat Sergiy Yulin das Schichtdesign des Kollektorspiegels entwickelt. »Das EUV-Licht ist kostbar. Durch unsere Beschichtung können wir eine Reflektivität bis über 70 % erreichen« erklärt Yulin. Für EUV-Licht sind das beeindruckende Werte. Licht in Wellenlängenbereich von 13,5 nm wird von allen reflektierenden und in der Optik verwendeten Materialien absorbiert, auch von Luft. Diesen Effekt macht sich das »Mo/C/Si/C-Schichtdesign« des Fraunhofer IOF zunutze. Es besteht aus mehr als 200 ultradünnen Schichten, die in Summe dafür sorgen, dass 70 % des EUV-Lichts unter extremen thermischen Bedingungen, wie sie an der EUV-Lichtquelle herrschen, reflektiert werden. 2012 präsentierte das Fraunhofer IOF mit 66 cm Durchmesser den damals weltweit größten multilayerbeschichteten Kollektorspiegel für die EUV-Lithographie. Das entwickelte Design und Herstellungsverfahren wurde im Anschluss an die Industrie übergeben und dort bis zur fertigen, heutigen ASML-Anlage weiterentwickelt. Um solche großen und komplexen Oberflächen-Geometrien wie die eines EUV-Kollektorspiegels herstellen zu können, entwickelte Yulin mit Partnern aus der Industrie mehrere Beschichtungsanlagen. Diese Anlagen mit dem mythologisch aufgeladenen Namen »Nessy« sind noch heute für EUV-Beschichtungen in den Reinräumen des Fraunhofer IOF im Einsatz. An ihnen entwickelt Sergiy Yulin Schichtdesigns für unterschiedlichste wissenschaftliche Anwendungen. Die Erkenntnisse, die aus der Erfindung des präzisen Spiegelschichtsystems gewonnen werden konnten, erschließen auch für die Grundlagenforschung bei 13,5 nm interessante Anwendungsfelder. Sie ermöglichen faszinierende Einblicke in die strukturelle Zusammensetzung von Materie und Materialien – sei es in der Medizin, Biologie, Mikro- und Spektroskopie oder in der Weltraumbeobachtung.

Sergiy Yulins Wegbegleiter in der Entwicklung der EUV-Lithographie, Torsten Feigl, gründete 2013 das erfolgreiche Unternehmen optiX fab GmbH, das eng mit dem Fraunhofer IOF an der Weiterentwicklung der EUV-Optik arbeitet. Die erneute Auszeichnung mit dem Zukunftspreis ist ein tolles Signal für den Forschungsstandort Thüringen, denn es zeigt, wie stark die Wirtschaft von anwendungsorientierter Forschung, wie sie zum Wesen der Fraunhofer-Gesellschaft gehört, profitieren kann.

for exposure. Together with his research team led by Torsten Feigl, Norbert Kaiser and many other talented scientists, Sergiy Yulin developed the coating design of the collector mirror. "The EUV light is precious. With our coating, we can achieve a reflectivity of up to over 70 %," explains Yulin. These are impressive values for EUV light. Light in the wavelength range of 13.5 nm is absorbed by all reflective materials used in optics, including air. Fraunhofer IOF's "Mo/C/Si/C layer design" takes advantage of this effect. It consists of more than 200 ultrathin layers, which together ensure that 70 % of the EUV light is reflected under extreme thermal conditions such as those found at the EUV light source. In 2012, Fraunhofer IOF presented what was then the world's largest multilayer-coated collector mirror for EUV lithography, with a diameter of 66 cm. The developed design and manufacturing process were subsequently handed over to industry, where it was further developed to the finished, current ASML system. In order to be able to manufacture such large and complex surface geometries as that of an EUV collector mirror, Yulin developed several coating systems with industry partners. These systems with the mythologically charged name "Nessy" are still in use today for EUV coatings in the Fraunhofer IOF clean rooms. Sergiy Yulin uses them to develop coating designs for a wide variety of scientific applications. The findings obtained from the invention of the precise mirror coating system also open up interesting fields of application for basic research at 13.5 nm. They enable fascinating insights into the structural composition of matter and materials - whether in medicine, biology, micro- and spectroscopy, or in space observation.

In 2013, Sergiy Yulin's companion in the development of EUV lithography, Torsten Feigl, founded the successful company optiX fab GmbH, which works closely with Fraunhofer IOF to continue the development of EUV optics. The renewed award of the Future Prize is a great sign for Thuringia as a research location because it shows how strongly industry can benefit from applied research, which is integral to the essence of the Fraunhofer-Gesellschaft.

LEFT *Drei Trophäen – nach 2007 und 2013 erhält das Fraunhofer IOF 2020 Deutschlands bedeutendsten Forschungspreis zum dritten Mal. | Three trophies - after 2007 and 2013, Fraunhofer IOF receives Germany's most important research prize for the third time in 2020.*

INHALT

Das Institut im Profil	12
Ausgewählte Forschungsergebnisse 2020	16
Exzellenznetzwerk Quantentechnologien	18
Zukunftstechnologien – Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Fachabteilung	22
Adaptiv-optische Box für Quantenkommunikation Bodenstation	24
Hybride Quantenkommunikation über Freistrah- und Faser Verbindung	26
Hologramme nicht-detektierter Photonen	30
Optisches und mechanisches Systemdesign – Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Fachabteilung	32
Snap-together: Schnelle Hochpräzisionsmontage von Spiegelteleskopen	34
Mikrooptik-Design – vom Gitter zur Fresnelstruktur	36
Systemdesign einer ultrakompakten Time-of-Flight-Kamera	38
Mikro- und nanostrukturierte Optik – Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Fachabteilung	40
Flexible Fotolithographie auf stark gekrümmten Oberflächen	42
Deterministische AR-Strukturen in Diamant für tiefes Infrarot	44
Mikrooptische Elemente für kompakte quantenoptische Systeme	46
Nanogitter als integriert-optische Quantengatter	48
Nichtlineare Nanophotonik in Metaoberflächen aus Lithiumniobat	50
Präzisionsoptische Komponenten und Systeme – Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Fachabteilung	52
Entwicklung des Teleskops des Ganymede Laser Altimeters (GALA)	56
Additive Fertigung von Hochleistungsoptiken	58
3D-Druck hoch-steifer Legierungen mittels kurzer Laserpulse	60
Metallisierte Keramik für reflektive Komponenten	62
Funktionelle Oberflächen und Schichten – Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Fachabteilung	64
Entspiegelung von Polycarbonat für LIDAR-Anwendungen	66
Konforme Beschichtung für hocheffiziente Spektrometergitter	68
Multispektrale Reflektoren für Synchrotronoptiken	70
Abbildungsdegradation durch Streulicht von Kontaminationen	72
Bildgebung und Sensorik – Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Fachabteilung	74
Mobile Sensorplattform für die Qualitätskontrolle	76
Multimodaler 5D-Sensor zur Vitalparameter-Bestimmung	78
KI-basierte Qualitätssicherung bei manuellen Montageprozessen	80
Opto-mechatronische Komponenten und Systeme – Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Fachabteilung	82
InkEye – 3D-Polymerdruck von Brillengläsern	84
CO ₂ -Laser-basiertes Entschichten und Trennen optischer Glasfasern	86
Laser- und Fasertechnologie – Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Fachabteilung	88
Erste Demonstration von Anti-Stokes Laserkühlung in Yb-dortiertem Quarzglas	90
Modeninstabilitäten in passiven Fasern – Einblicke in den Hochleistungsfaserlaser	92
Spektrale Strahlkombination bis zu 20 kW beugungsbegrenzter Ausgangsleistung	94
Faserbasierte weiche Röntgenquelle	96
Strategische Projekte des Fraunhofer IOF	98
Das Institut in Zahlen	118
Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces und die Fraunhofer-Gesellschaft	120
Namen, Daten, Ereignisse	124

CONTENT

Profile of the institute	12
Selected results 2020	16
Network of Quantum Technologies Excellence	18
Emerging technologies – results from the scientific department	22
Adaptive optics box for quantum communication ground station	24
Hybrid quantum communication via free-space and fiber links	26
Holograms of undetected photons	30
Optical and mechanical system design – results from the scientific department	32
Snap-together: fast high precision mounting of mirror telescopes	34
Micro-optics - from grating to Fresnel structure	36
System design of ultra-compact time of flight camera	38
Micro- and nanostructured optics – results from the scientific department	40
Versatile photolithography tool for strongly curved surfaces	42
Deterministic AR-structures in diamond for far infrared	44
Microoptics enables compact quantum optics setups	46
Nanograting-based optical quantum gates on a chip	48
Nonlinear nanophotonics in lithium niobate metasurfaces	50
Precision optical components and systems – results from the scientific department	52
Development of the telescope of the Ganymede Laser Altimeter (GALA)	56
Additive manufacturing of high-performance optics	58
3D printing of high stiffness alloys using short laser pulses	60
Metallized ceramics for reflective components	62
Functional surfaces and coatings – results from the scientific department	64
Antireflection of polycarbonate for LIDAR applications	66
Conformal coating for high-efficiency spectrometer gratings	68
Multispectral reflectors for synchrotron optics	70
Contamination budgets and their impact on light scattering	72
Imaging and sensing – results from the scientific department	74
Mobile sensor stage for quality management	76
Multimodal 5D sensor for measuring vital parameters	78
AI-based quality assurance for manual assembly processes	80
Opto-mechatronic components and systems – results from the scientific department	82
InkEye - 3D polymer printing of eyeglasses	84
CO ₂ laser-based decoating and cleaving technology for optical glass fibers	86
Laser and fiber technology – results from the scientific department	88
First demonstration of anti-stokes laser cooling in Yb-doped fused silica	90
Mode instabilities in passive fibers - a look inside high power fiber lasers	92
Spectral beam combining up to 20 kW output power & diffraction-limited beam quality	94
Fiber-based soft X-ray source	96
Strategic projects of the Fraunhofer IOF	98
The institute in figures	118
Fraunhofer Group Light & Surfaces and Fraunhofer-Gesellschaft	120
Names, dates, activities	124



Fraunhofer
IPT

DAS INSTITUT IM PROFIL

PROFILE OF THE INSTITUTE

Von Arrayprojektoren im Automotive-Bereich über 3D-Echtzeitscanner in der Produktion bis hin zu Quantentechnologien für die Mikroskopie und Kommunikationssicherheit – das Fraunhofer IOF entwickelt innovative Lösungen mit Licht für ein breites Anwendungsspektrum. Zur Abdeckung der gesamten photonischen Prozesskette nutzen wir unsere umfassenden Kompetenzen in den Bereichen: optisches und mechanisches Systemdesign, mikro- und nanostrukturierte Optik, opto-mechatronische Komponenten und Systeme, präzisionsoptische Komponenten und Systeme, funktionelle Oberflächen und Schichten, Laser- und Fasertechnologie, Bildgebung und Sensorik sowie Zukunftstechnologien wie z. B. die optischen Quantentechnologien. Es entstehen innovative Lösungen, die in Wissenschaft und Wirtschaft für die Photonik neue Anwendungsfelder erschließen. Wir begleiten unsere Kunden auf Wunsch von den ersten Analysen und Prototypen bis hin zur Markteinführung. Unsere gesamten Forschungs- und Entwicklungsprozesse finden unter Berücksichtigung von Markttrends statt. Als Teil der Fraunhofer-Gesellschaft liegt unserer Forschung die Leidenschaft zu Grunde, sich Herausforderungen zu stellen und neue Wege zu gehen.

Das Fraunhofer IOF steht in der Tradition der Jenaer Optikpioniere Carl Zeiss, Ernst Abbe und Otto Schott. Es ist regional verankert, pflegt vielfältige Kooperationen mit Unternehmen sowie Forschungs- und Bildungseinrichtungen am Standort. Als wissenschaftliches Zentrum der Optikregion Jena trägt es durch Innovationen, Personal- und Wissenstransfer sowie Ausgründungen zur regionalen Entwicklung bei. Gleichzeitig ist das Fraunhofer IOF national und international ausgerichtet und pflegt ein Netzwerk mit Partnern aus Europa, Nordamerika und Asien. Das Fraunhofer IOF misst sich an internationalen Stand der Forschung, daher ist ein reger Austausch in internationaler Forschung und Entwicklung unabdinglich.

From array projectors in the automotive sector via 3D real-time scanners in production to quantum technologies for microscopy and communication security - Fraunhofer IOF develops innovative solutions with light for a wide range of applications. To cover the entire photonic process chain, we make use of our comprehensive competencies in the following areas: optical and mechanical system design, micro- and nanostructured optics, opto-mechatronic components and systems, precision optical components and systems, functional surfaces and coatings, laser and fiber technology, imaging and sensing, and emerging technologies such as optical quantum technologies. Innovative solutions are created, which open up new fields of applications for photonics in science and industry. If desired, we accompany our customers from the beginning of the project until the market launch. All our research and development processes are performed in line with market trends. As part of the Fraunhofer-Gesellschaft, our research is based on the passion for taking on challenges and breaking new ground.

The Fraunhofer IOF follows in the tradition of the Jena optical pioneers Carl Zeiss, Ernst Abbe, and Otto Schott. It is regionally anchored, cultivates diverse cooperations with companies as well as research and educational institutions on-site, and, as the scientific center of the Jena optics region, contributes to regional development through innovations, personnel and knowledge transfer as well as spin-offs. At the same time, the Fraunhofer IOF is nationally and internationally oriented and maintains a network with partners from Europe, North America, and Asia. The Fraunhofer IOF benchmarks itself against the international state of research, therefore a lively exchange in international research and development is indispensable.

WE SHAPE THE FUTURE

ORGANISATION ORGANIZATION



INSTITUTE MANAGEMENT

 Director Prof. Dr. Andreas Tünnermann	 Deputy director Dr. Ramona Eberhardt	 Deputy director Prof. Dr. Stefan Nolte
--	---	---

ADMINISTRATION

 Administration Elke Heuer	 Marketing and coordination Dr. Robert Kammel
---	---

SCIENTIFIC DIRECTORATE

 Prof. Dr. Andreas Tünnermann	 Prof. Dr. Uwe Detlef Zeitner	 Dr. Ramona Eberhardt
---	---	---

 Prof. Dr. Jens Limpert	 Prof. Dr. Gunther Notni
--	--

SCIENTIFIC DEPARTMENTS

 Optical and Mechanical System Design Dr. Robert Brüning
--

 Micro- and Nanostructured Optics Dr. Frank Burmeister
--

 Opto-mechatronic Components and Systems Dr. Erik Beckert

 Functional Surfaces and Coatings Dr. Sven Schröder

 Laser and Fiber Technology Dr. Thomas Schreiber
--

 Imaging and Sensing Dr. Peter Kühmstedt
--

STRATEGIC PROJECTS

 QuNET Quantum secure IT infrastructure

 3Dsensation Human-machine interaction
--

 Max Planck School of Photonics Graduate school

 QUILT Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions

 fo+ 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



TOF
Tailored optical fibers

VORSITZENDER | CHAIR

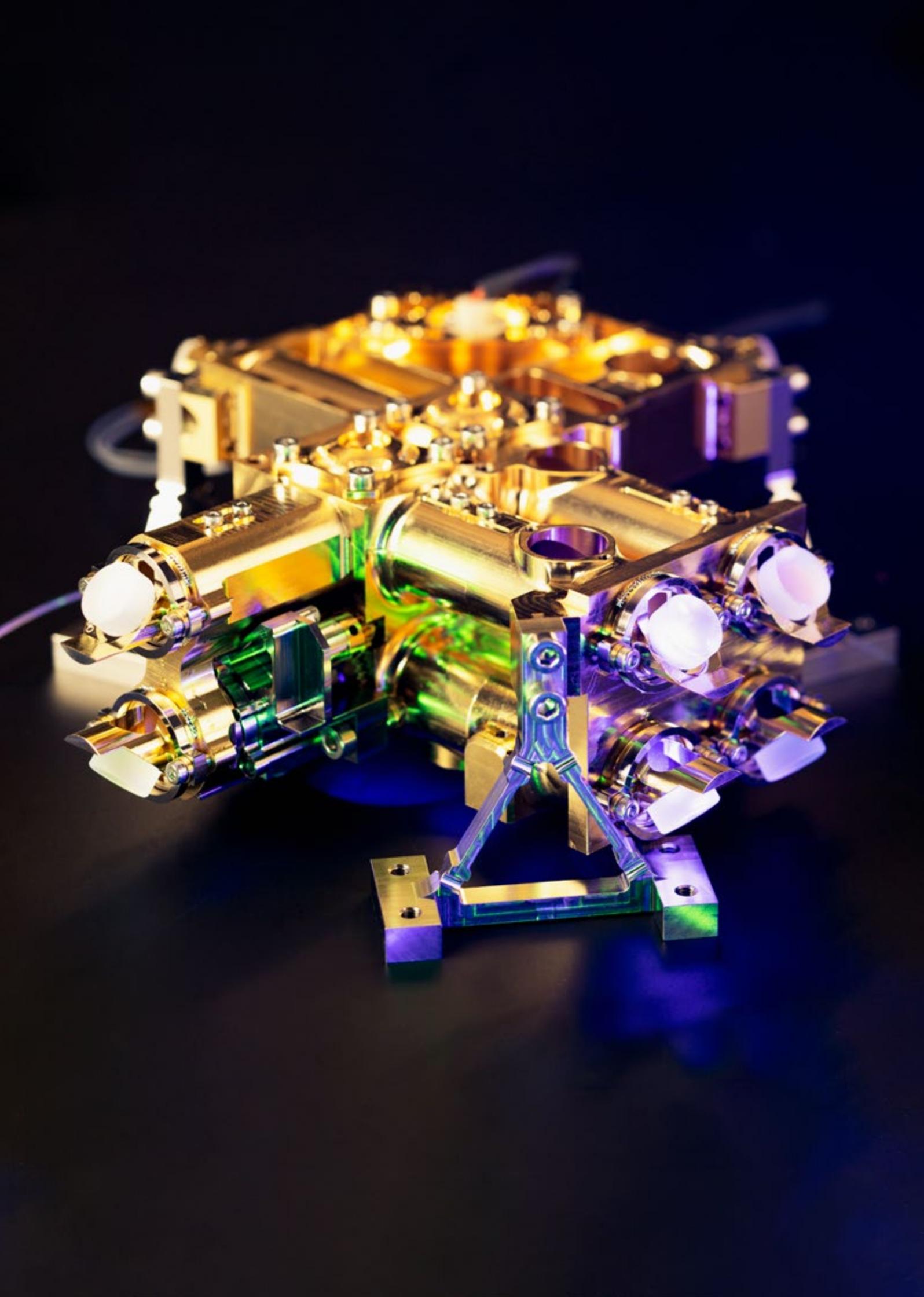
- Dr. Michael Mertin | CeramTech Gruppe, Plochingen

MITGLIEDER | MEMBERS

- Christian Amann | BMW Group, München
- Peggy Bärenklau | heracle GmbH, Jena
- Dr. Klaus Bartholmé | Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena
- Petra Bogdanski | Mahr GmbH, Jena
- Robert Fetter | Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft, Erfurt
- Gabi Grützner | micro resist technology GmbH, Berlin
- Dr. Roland Langfeld
- Manfred Lieke | Manfred Lieke Consulting, Lindau
- 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



AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE 2020

SELECTED RESULTS 2020

Das Fraunhofer IOF betreibt seit 1992 anwendungsorientierte Forschung und hat sich als eine weltweit führende Forschungseinrichtung für Photonik und optische Systemtechnik etabliert. Es entwickelt innovative optische Systeme zur Kontrolle von Licht – von der Erzeugung und Manipulation bis hin zu dessen Anwendung. Das Leistungsangebot des Instituts umfasst die gesamte photonische Prozesskette vom opto-mechanischen und opto-elektronischen Systemdesign bis zur Herstellung von kundenspezifischen Lösungen und Prototypen.

Gemeinsam mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (IAP) – welches Grundlagenforschung im Bereich der Optik und Photonik betreibt – bilden beide Forschungsinstitute ein gemeinsames Leistungszentrum für Photonik. Es verknüpft die herausragenden und komplementären Kompetenzen in den Geschäftsfeldern Sensorik & Metrologie, opto-mechanische Systeme sowie Lichtquellen & Laser. Kunden und Forschungspartnern kann so bei Bedarf die komplette Prozesskette – von der Grundlagenforschung und anwendungsorientierten Forschung bis hin zur Realisierung der finalen Anwendung – angeboten werden.

Die Vielzahl an exzellenten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und die hervorragende technische Ausstattung gebündelt am Standort Jena, verschaffen unseren Kunden und Forschungspartnern einen klaren Wettbewerbsvorteil bei der Verwirklichung von innovativen optischen Technologien und herausragenden Projekten.

Nachfolgend präsentieren wir einige ausgewählte wissenschaftliche Ergebnisse aus 2020. Die ausgewählten Fachbeiträge stehen dabei exemplarisch für die Bandbreite unserer Forschung auf dem Gebiet Optik und Photonik. Sie geben einen Einblick in die Aktivitäten der Kompetenzfelder des Fraunhofer IOF.

Fraunhofer IOF has been conducting application-oriented research since 1992 and has established itself as a world-leading research institution for photonics and optical systems technology. It develops innovative optical systems for controlling light - from its generation and manipulation to its application. The institute's range of services covers the entire photonic process chain from opto-mechanical and opto-electronic system design to the production of customer-specific solutions and prototypes.

Together with the Institute of Applied Physics of the Friedrich Schiller University Jena (IAP) - which conducts basic research in the field of optics and photonics - both research institutes form a joint performance center for photonics. This combines the outstanding and complementary competencies in the business fields of sensors & metrology, opto-mechanical systems, and light sources & lasers. Thus, if required, customers and research partners can be offered the complete process chain - from basic and application-oriented research to the realization of the final application.

The large number of excellent scientists and the outstanding technical equipment available in Jena gives our customers and research partners a clear competitive advantage in the realization of innovative optical technologies and outstanding projects.

In the following, we present some selected scientific results from 2020, with selected technical papers exemplifying the range of our research in the field of optics and photonics. They provide an insight into the activities of the competence fields of Fraunhofer IOF.

LEFT *Photonenpaarquelle für die Quantenkommunikation.* |
Photon-pair source for quantum communication.



EXZELLENZNETZWERK QUANTENTECHNOLOGIEN NETWORK OF QUANTUM TECHNOLOGIES EXCELLENCE

Das Fraunhofer IOF verfügt über vielfältige Kompetenzen, um auf dem Gebiet der Quantentechnologie neue innovative Lösungen zu generieren. Seine Expertise in der Entwicklung von quantenoptischen Systemen hat das Fraunhofer IOF im Jahr 2020 u. a. in folgenden Projekten erfolgreich unter Beweis gestellt:

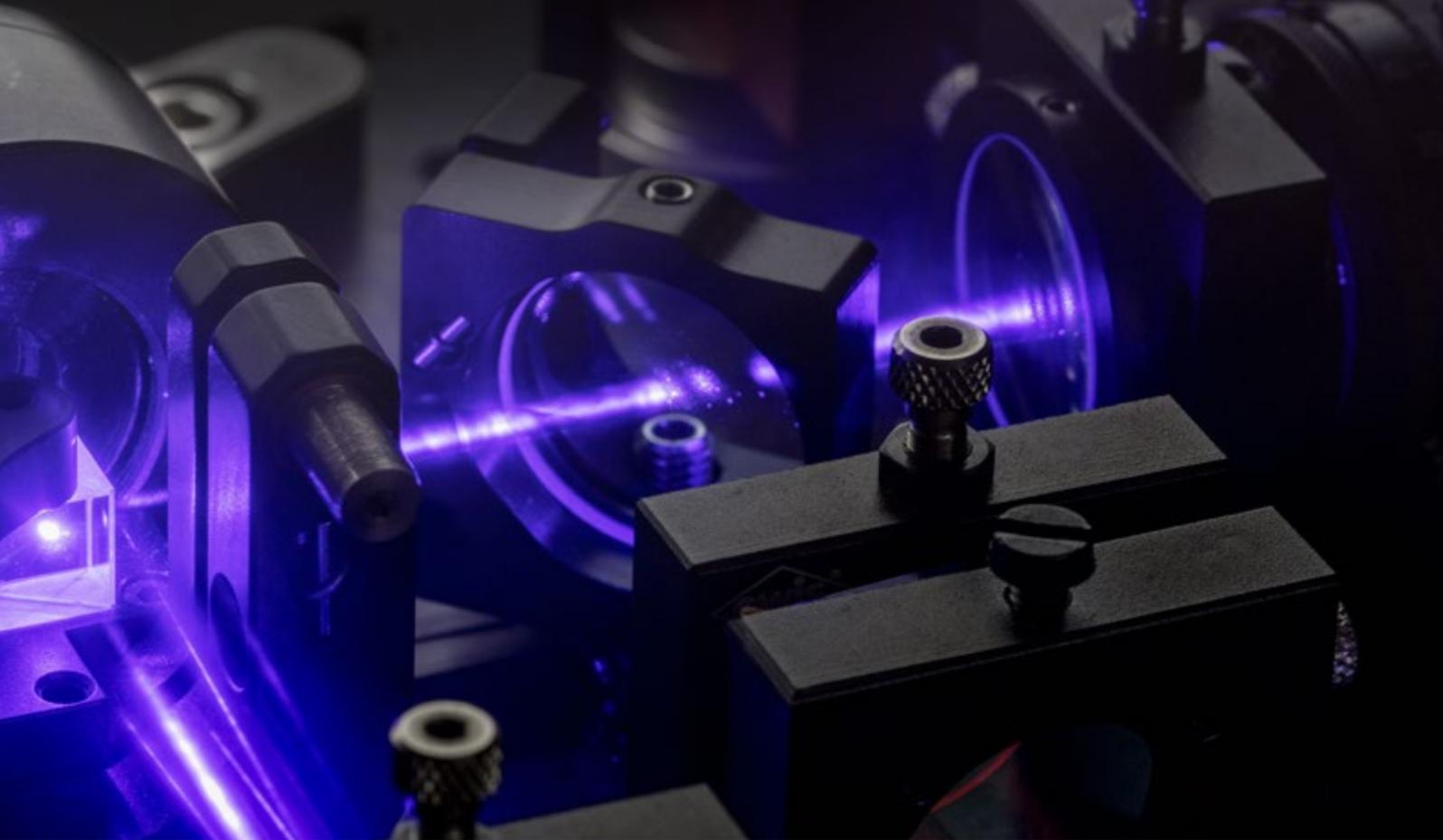
QuNET

Mit der QuNET-Initiative gehen wir einen wichtigen Schritt Richtung Wahrung nationaler Souveränität in der digitalen Kommunikation. Und zwar im Schulterschluss mit dem BMBF, der Max-Planck-Gesellschaft (MPG-MPL), dem deutschen Zentrum für Luft- & Raumfahrt (DLR-IKN), der Fraunhofer-Gesellschaft (Fraunhofer IOF und HHI), der deutschen Industrie und Sicherheitsbranche, sowie dem Bundesamt für die Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). Gemeinsam werden wir im Verlauf der QuNET-Initiative mit weiteren Partnern aus Wissenschaft und Forschung den Weg von originärer und zukunftsfähiger Forschung hin zu zertifizierbaren Systemen quantensicherer Kommunikation gehen.

The Fraunhofer IOF has a wide range of competencies to generate new innovative solutions in the field quantum technologies. In the year 2020 Fraunhofer IOF has successfully demonstrated its expertise in the development of quantum optical systems in the following projects:

QuNET

With the QuNET initiative, we contribute in an essential way to preserve Germany's national sovereignty in digital communication. This project is a BMBF funded collaboration bringing together the expertise of the Max-Planck Society (MPG-MPL), the German Aerospace Center (DLR-IKN), Fraunhofer Gesellschaft (the Fraunhofer IOF and HHI), and the German industry and security sector as well as the Federal Office for Information Security (BSI). Together with current and prospective partners from science, industry, and research, we will enable the transfer of innovative research to real-world applications using quantum-safe communication. The results of this project will ensure long-term



Damit begegnen wir nachhaltig den Bedrohungen unserer IT-Sicherheit zum Schutz der Daten aller Bürgerinnen und Bürger.

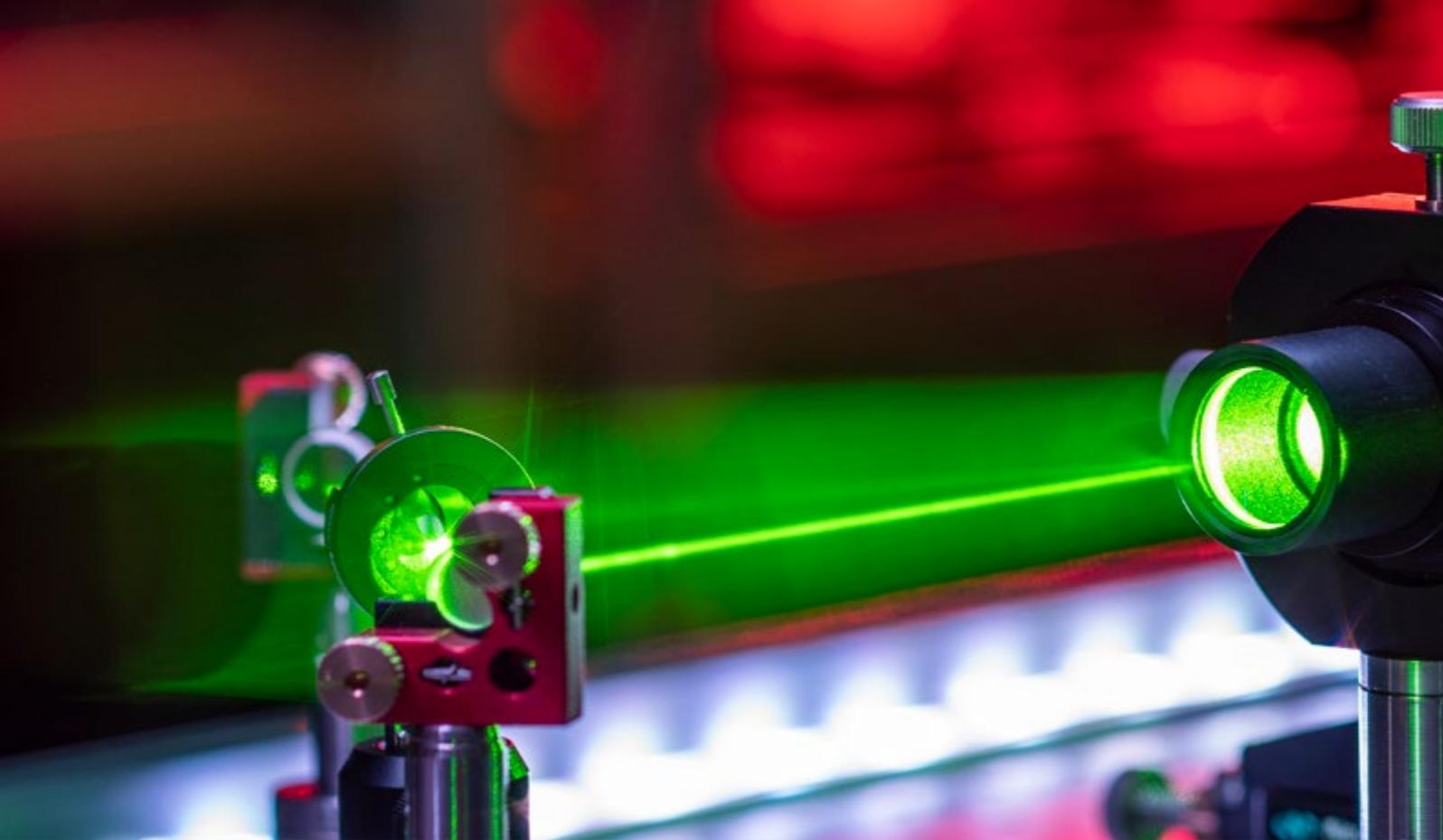
In der ersten Phase der QuNET-Initiative wurde bereits eine breite Palette an Technologien demonstriert, um eine quantensicheren Videokonferenz zwischen Bundesforschungsministerin Karliczek und dem BSI im Sommer 2021 vorzubereiten. Hierzu wurde von den vier Kerninstituten (MPL, HHI, IOF, DLR-IKN) verschieden Experimente und Komponenten an den jeweiligen Standorten demonstriert. Zu diesen gehören die Übertragung von Quantensignalen auf Freistrah- und Faserverbindungen mit unterschiedlichen QKD-Systemen. Im Einklang mit den Empfehlungen des BSI wurde hierbei ein hybrider und kryptoagiler Ansatz verfolgt, und zwar in Verbindung mit Post-Quanten-Kryptografie und weiteren anerkannten Verfahren.

In der nächsten Phase der QuNET-Initiative werden über zu nächst vier Jahre innovative Ansätze weiter vorangetrieben, gefördert vom BMBF. Zentral wird dabei auch der Aufbau

protection against IT-security threats and therefore will ensure safe data for all citizens.

In the first phase of QuNET, technologies have been demonstrated in a press conference. The showcased hardware will enable a secure video conference between the federal secretary of education and research Karliczek and the BSI in the summer of 2021. In preparation, the four core institutes (MPL, HHI, IOF, DLR) developed different aspects of the coming experiment, including quantum channels via free-space and fiber as well as QKD transmitters and receivers. The partners have pursued, in accordance with the recommendations of the BSI, a hybrid approach incorporating post-quantum cryptography along with other established methods.

TOP *Lichtquelle zur Erzeugung von verschränkten Photonenpaaren für die quantensichere Kommunikation. | Light source for the generation of entangled photon pairs for quantum-safe communication.*



EXZELLENZNETZWERK QUANTENTECHNOLOGIEN NETWORK OF QUANTUM TECHNOLOGIES EXCELLENCE

eines wirtschaftlich-wissenschaftlichen Innovationsökosystems sein, wobei ein Roadmapprozess den Dialog mit potenziellen Nutzern der QKD-Technologie (z. B. staatlicherseits) sowie Wissenschaftlern und Herstellern unter Federführung des Fraunhofer IOF strukturieren wird.

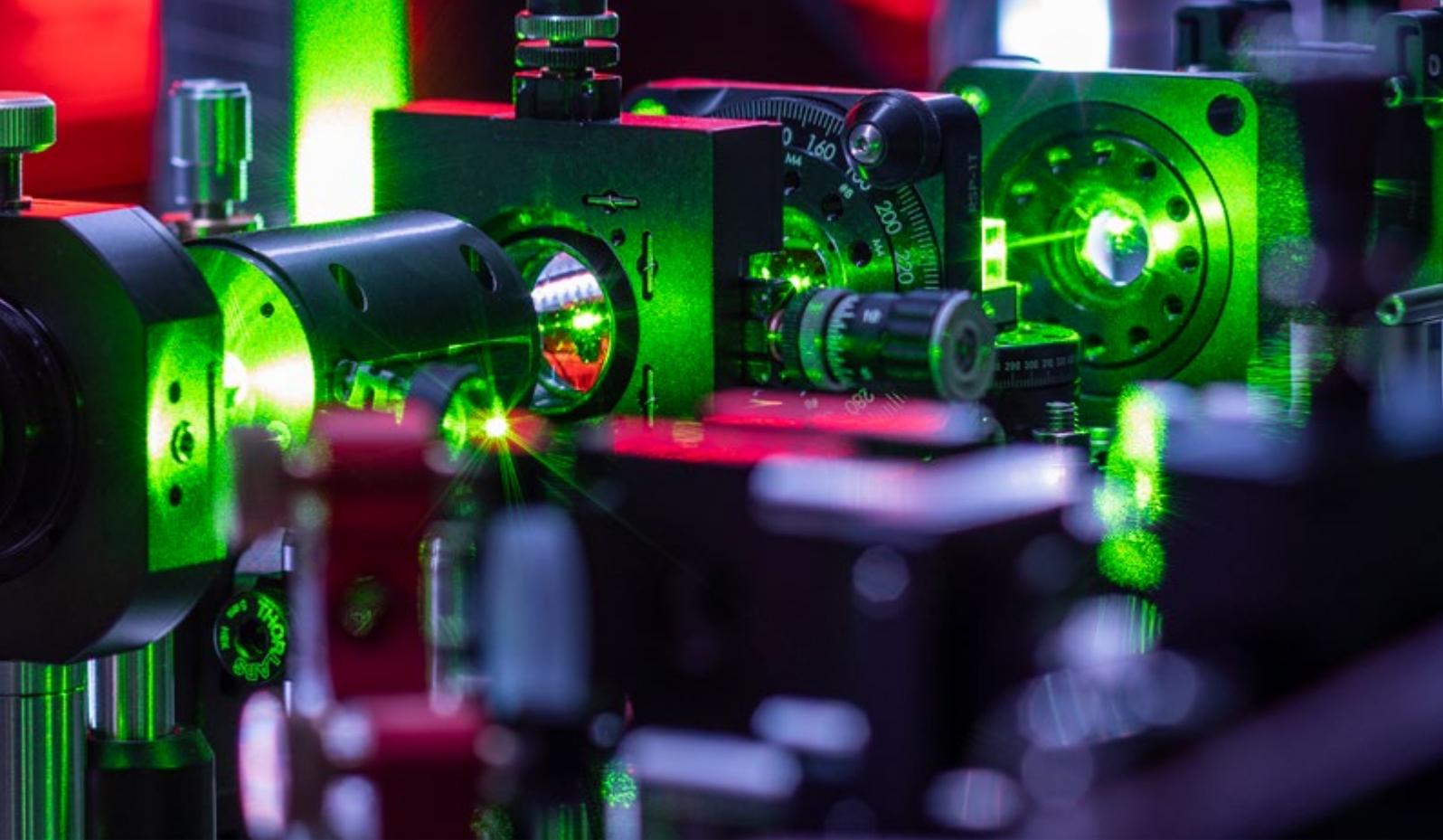
QPL, Quantenapplikationslabor Erfurt, QUILT

Das Thema Quantentechnologien bleibt ein starkes Wachstumsthema für das Fraunhofer IOF. So ist das Fraunhofer IOF durch laufende Projekte (EU: AQTION, Q-MIC, FastGhost; BMBF: QPL, QuNET-alpha, QSource, QUANTIFISENS; Industrie/ESA: QKDSat; FhG: InteQuant, QUILT, QCtech; Thüringen: FastPhoton, InQuoSens, Quanten Applikationslabor @MEOS, QKD freespace testbed) und die dabei aufgebaute Expertise gut aufgestellt, um kommende Ausschreibungen in den Anwendungsfeldern des Quantencomputings, der quantenbasierten Bildgebung, der Quantensensorik und -messtechnik, sowie der Quantenkommunikation zu adressieren. Treibend bleiben hierbei öffentliche Fördermittelgeber, wobei zuletzt ca. 2 Milliarden Euro im Rahmen

In the next phase of QuNET – over the following four years – these and other approaches will be further developed. This phase will again be funded by the BMBF. A central part of QuNET is the development of an economic and scientific innovation-ecosystem for QKD. This development will be accompanied by a roadmap process, organized and structured within the IOF. The roadmap-process will keep the dialog between potential users of the QKD-technology, like federal agencies, and the scientific and industrial communities.

QPL, Quantum-application lab Erfurt, QUILT

The field of quantum technology continues to be a topic of increasing importance for the Fraunhofer IOF. Due to ongoing projects (EU: AQTION, Q-MIC, FastGhost; BMBF: QPL, QuNET-alpha, QSource, QUANTIFISENS; Industrie/ESA: QKDSat; FhG: InteQuant, QUILT, QCtech; Thüringen: FastPhoton, InQuoSens, quantum application lab @MEOS, QKD freespace testbed) and the expertise gained within these activities, we are well-prepared to address future

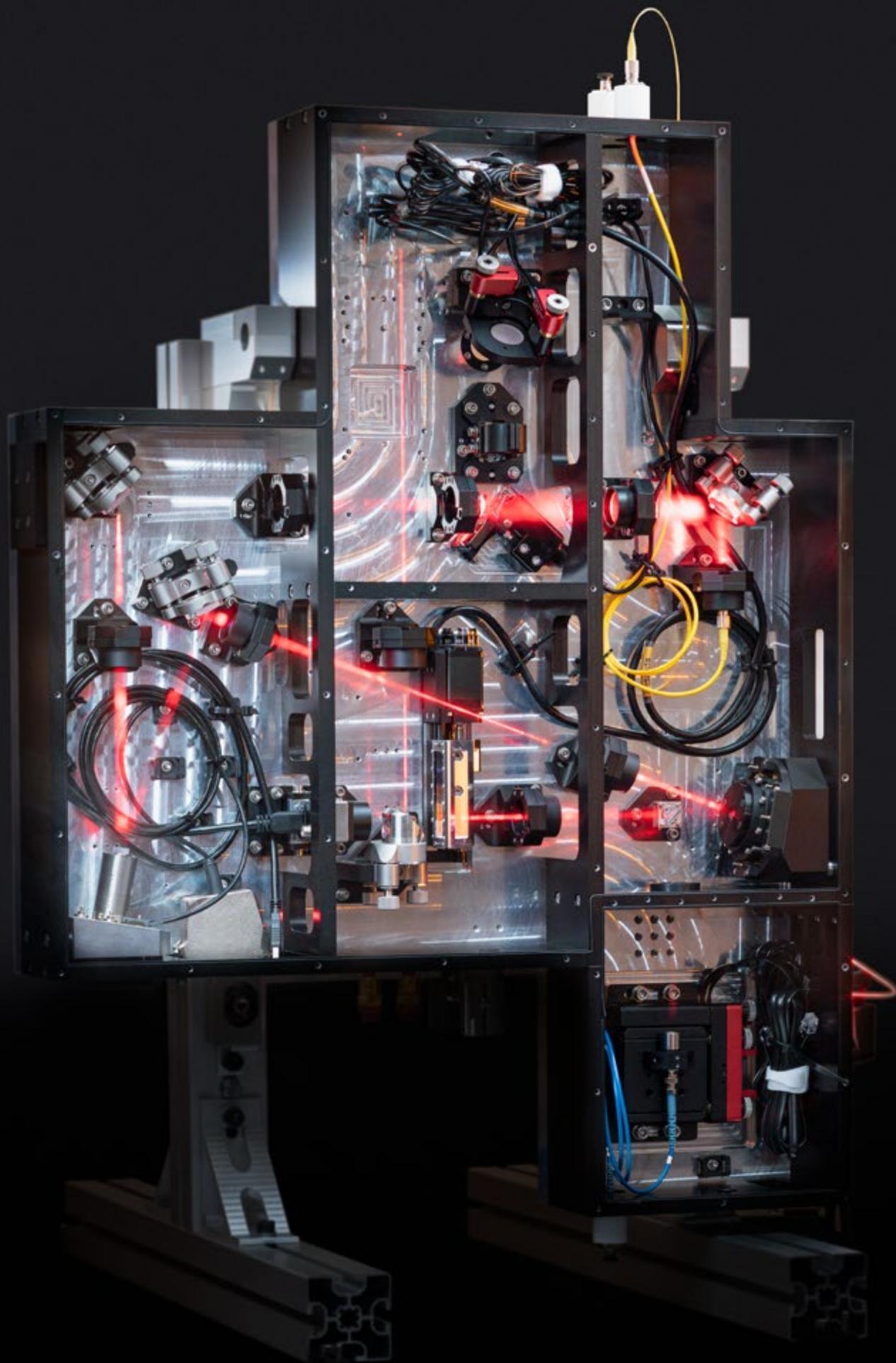


des Konjunkturprogramms in Aussicht gestellt wurden, und zwar zusätzlich von dem Engagement der Regierung im Umfang von ca. 650 Millionen Euro zu den Quantentechnologien im Allgemeinen. Hier bleibt das Fraunhofer IOF der Aufgabe verschrieben, anwendungsorientiert Mehrwerte der neuen Technologien für Wirtschaft und Gesellschaft aufzuzeigen.

tenders in the fields of applied quantum computing, quantum imaging, quantum meteorology, and quantum communication.

Public funding agencies remain committed to this field. In addition to the 650 million euros funding initially targeted at quantum technologies the latest corona stimulus package announced an extra 2 billion euros funding in this sector. The Fraunhofer IOF will retain their mission to enable relevant applications for the society and economy.

TOP *Laboraufbau einer verschränkten Photonenquelle. |
Lab setup of an entangled photon source.*



ZUKUNFTSTECHNOLOGIEN

EMERGING TECHNOLOGIES

Im Bereich der Zukunftstechnologien liegt der Fokus der Forschung und Entwicklung im Fraunhofer IOF derzeit auf zwei Themenfeldern:

Das Fraunhofer IOF ist ein Pionier in der angewandten Forschung zur Quantenphotonik für wissenschaftliche und industrielle Anwendungen. Dazu zählen beispielweise die abhörsichere Quantenkommunikation, rauscharme Quantenabbildungssysteme und fortschrittliche Ionenfallen für Quantencomputer. Das Fraunhofer IOF integriert, optimiert und miniaturisiert quantentechnologische Systeme.

Zudem werden am Fraunhofer IOF deformierbare Spiegel zur aktiven Beeinflussung der Wellenfront entwickelt, um die Systemeigenschaften gezielt zu verbessern. Unsere Expertise wird für Systeme der Laser- und Quantenkommunikation zwischen Bodenstationen und geostationären Satelliten, zum Ausgleich von Bildstörungen in Weltraumteleskopen oder auch zur Fokusadaptation und Fokuspachführung in der Lasermaterialbearbeitung genutzt. Die Spiegel können hierzu mit bis zu 10.000 Aktuatoren versehen sein und werden in Echtzeit – basierend auf Wellenfrontmesstechnik – gesteuert.

Nachfolgend sind einige Themen aus 2020 dargestellt: Hybride Quantenkommunikation über Freistrahl und Faser Verbindung, Hologramme nicht-detektierter Photonen und Adaptiv-optische Box für Quantenkommunikation-Bodenstation.

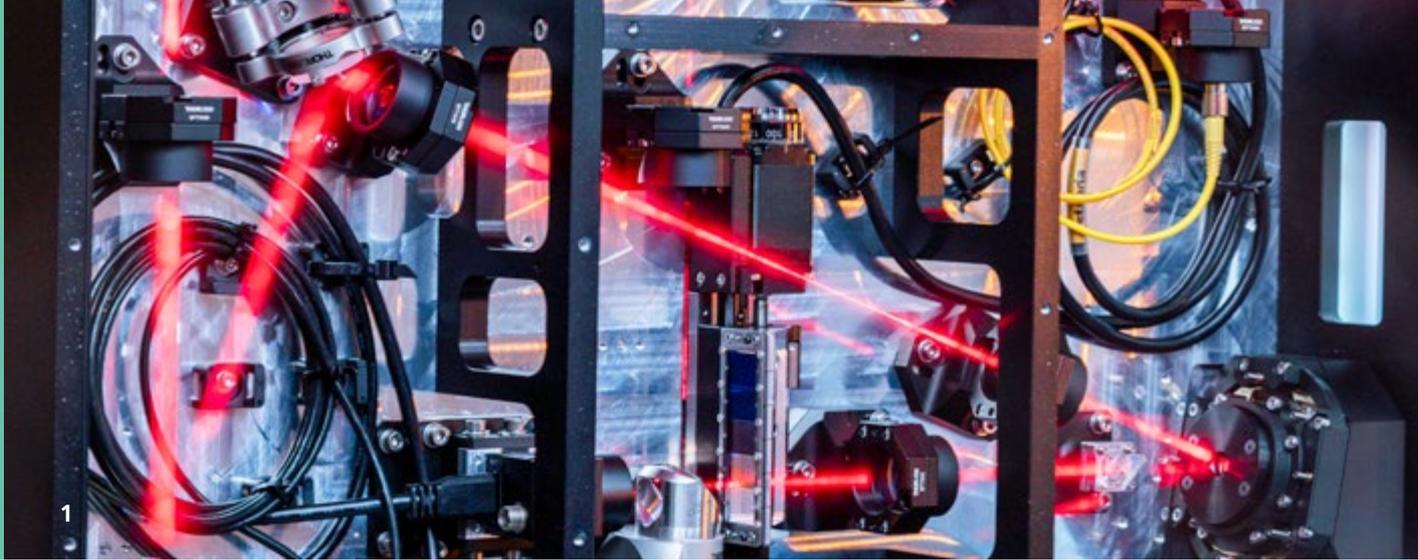
In the field of emerging technologies, the research and development at Fraunhofer IOF currently focuses on two thematic areas:

Fraunhofer IOF is a pioneer in applied research on quantum photonics for scientific and industrial applications. This includes, for example, tap-proof quantum communication, low-noise quantum imaging systems, and advanced ion traps for quantum computers. Fraunhofer IOF integrates, optimizes, and miniaturizes quantum technology systems.

In addition, Fraunhofer IOF develops deformable mirrors to influence the wavefront actively to improve the system properties in a targeted manner. Our expertise is used for laser and quantum communication systems between ground stations and geostationary satellites, for the compensation of image perturbations in space telescopes, or focus adaptation and focus tracking in laser material processing. The mirrors can be equipped with up to 10,000 actuators and are controlled in real-time based on wavefront measurement technologies.

Below are some topics from 2020: Hybrid quantum communication via free-space and fiber link, holograms of undetected photons, and adaptive optical box for quantum communication ground station.

LEFT *Adaptive optische Box für die Bodenstation einer satellitengestützten Quantenkommunikation. | Adaptive optical box for the ground station of satellite-based quantum communication.*



ADAPTIV-OPTISCHE BOX FÜR QUANTEN-KOMMUNIKATION BODENSTATION

ADAPTIVE OPTICS BOX FOR QUANTUM COMMUNICATION GROUND STATION

Das Fraunhofer IOF hat in Zusammenarbeit mit Synopta GmbH (Schweiz) ein adaptiv-optisches Modul für die optische Bodenstation der Universität Wien entwickelt. Die »Quantum Communication Adaptive Optics Box« (QC-AO-Box) kann an ein 80 cm Ritchey-Chrétien Teleskop angebracht werden und korrigiert die durch atmosphärische Turbulenz verursachten Phasenfehler des an der Bodenstation ankommenden Lichtes. Durch diese Korrektur wird die Einkopplung eines Quantensignals in eine Singlemode-Faser ermöglicht.

Eine Quelle im Satelliten emittiert ein Quantensignal und einen helleren Leitstrahl mit unterschiedlichen Wellenlängen. In der Bodenstation analysiert die QC-AO-Box den Einfluss der atmosphärischen Turbulenz auf den ankommenden Leitstrahl mithilfe eines Wellenfrontsensors. Das Analyseergebnis wird anschließend dazu verwendet, einen Kippspiegel und einen deformierbaren Spiegel zu regeln, welche sowohl den Leitstrahl als auch das Quantensignal in Echtzeit und unabhängig von ihrer Wellenlänge korrigieren. Das eingekoppelte Quantensignal kann anschließend gemessen oder über ein angebundenes Fasernetzwerk weitergeleitet werden.

Together with Synopta GmbH (Switzerland), Fraunhofer IOF has developed an adaptive optics module for a quantum communication ground station for the Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI), Austria. The "Quantum Communication Adaptive Optics Box" (QC-AO-box) will be mounted on the flange of an 80 cm Ritchey-Chrétien telescope and will correct the atmospheric turbulence-induced phase aberrations of the incoming satellite-to-ground quantum signal, enabling coupling of the signal into a single-mode optical fiber.

A satellite source emits a quantum signal and a brighter "beacon" beam at two different wavelengths. On the ground, the QC-AO-box measures the atmospheric turbulence effects on the beacon using a wavefront sensor. This is then used to control a tip-tilt- and multi-actuator deformable mirror which corrects both the beacon and quantum signals in real-time, regardless of the wavelength difference. This enables single-mode fiber coupling of the quantum signal, which then can be directly measured or shared further via a fiber network.

1 Aufnahme der am Fraunhofer IOF justierten QC-AO-Box vor der Integration der letzten optischen Geräte, der staubdichten Verschlüßung und der Anbringung der thermischen Isolierung. Die »User-Box« ist auf Seite 22 in der rechten unteren Ecke zu sehen. |

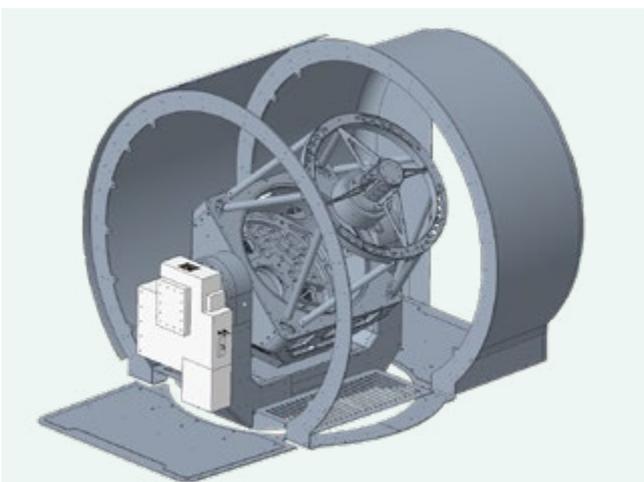
The QC-AO-box after alignment at Fraunhofer IOF, prior to integration of the final optical devices, sealing, dustproofing, and thermal isolation. The "User-box" can be seen in the bottom right corner on page 22.

Bei der Entwicklung des Systems wurde die maximale Wellenlängenflexibilität zukünftiger Experimente angestrebt. Dementsprechend ist das Optikdesign der QC-AO-Box so konzipiert, dass sie für einen breiten Wellenlängenbereich (650 – 860 nm) nutzbar ist.

Das optische System ist in eine höchst stabile, transportfähige, temperaturgeregelte und staubdichte Box integriert. Die Faserkuppeleinheit ist über die separat isolierte »User-Box« zugänglich (unten rechts im System), welche eine flexible Integration von zusätzlichen Optiken ermöglicht.

For maximum flexibility in the choice of future experiments, the QC-AO-box has been designed for a wavelength range of 650 – 730 nm for the beacon and 770 nm – 860 nm for the quantum signal. It has the critical property for quantum experiments; it is polarisation independent and has very high transmission over the wavelength range.

The optical system is integrated into an extremely stable, transportable, temperature-regulated, and dustproof box. The fiber-coupling unit is accessible via the separately isolated "User-box" (bottom right of the unit) which includes a mini-breadboard for the flexible integration of additional optics.



2 Ein CAD-Modell der QC-AO-Box zeigt, wie die geplante Integration in die optische Bodenstation der Universität Wien aussehen wird. | A CAD model of the QC-AO-box shows how it will be integrated into the optical ground station of the IQOQI.

AUTHORS

Aoife Brady
Andreas Kamm
Teresa Kopf
Edgar Fischer¹
Rupert Ursin²

¹ Synopta GmbH

² IQOQI - Vienna, Austrian

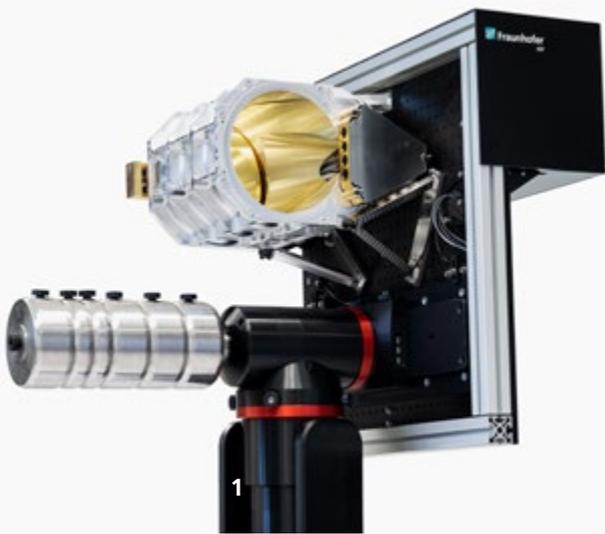
Academy of Sciences

CONTACT

Dr. Fabian Steinlechner

Phone: +49 3641 807 733

fabian.steinlechner@iof.fraunhofer.de



HYBRIDE QUANTENKOMMUNIKATION ÜBER FREISTRABL UND FASERVERBINDUNG

HYBRID QUANTUM COMMUNICATION VIA FREE-SPACE AND FIBER LINKS

Die Quantenkommunikation ermöglicht den abhörsicheren Austausch von Schlüsseln für das Kodieren sicherheitsrelevanter Information. Im Gegensatz zu algorithmischen Kryptographieverfahren, deren Sicherheit durch den mit einer Entschlüsselung verbundenen Rechenaufwand gewährt wird, basiert die Sicherheit dabei auf physikalischen Prinzipien, wie etwa der Quantenverschränkung oder dem Superpositionsprinzip.

Das Fraunhofer IOF entwickelt gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Wirtschaft im Rahmen der QuNET-Initiative die physikalisch-technischen Grundlagen von Quantenkommunikationssystemen und optischer Linktechnologien für den Einsatz in realer Infrastruktur – zielgerichtet für die Anwendung in Hochsicherheitsnetzen. Forschungs- und Entwicklungsbeiträge des Fraunhofer IOF werden dabei durch Expertise und Kompetenz entlang der gesamten quantenphotonischen Prozesskette getragen: Neben Komponenten und Schlüsseltechnologien werden dabei auch Gesamtsysteme für die Quantenkommunikation in realer Freistrah- und Fasernetzinfrastruktur untersucht und demonstriert.

In der ersten Projektphase von QuNET wird ein Schlüsselexperiment an der Schnittstelle zwischen Quantenkanälen in unterschiedliche Wellenlängenbändern und Übertragungsgs-

Quantum communication enables the tap-proof exchange of keys for encoding security-relevant information. In contrast to algorithmic cryptography methods, whose security is guaranteed by the computing effort involved in decryption, the security of quantum cryptography is based on physical principles such as quantum entanglement or the superposition principle. Fraunhofer IOF is developing actively, together with partners in research and industry, quantum communication systems, which can be applied to existing fiber-networks as well as in terrestrial-free space links.

The goal of the QuNET initiative is to develop the physical-technical fundamentals of quantum communication systems and optical link technologies for use in real infrastructure - targeted for application in high-security networks. R&D contributions of Fraunhofer IOF are supported by expertise and competence along the entire quantum photonic process chain. In addition to components and key technologies, overall systems for quantum communication in real free-beam and fiber network infrastructure are investigated and demonstrated.

In the first phase of the project QuNet a key experiment is conducted at the interface between quantum channels in different wavelength bands and transmission media: a necessary development for future integration into a heterogeneous

1 *Teleskopsystem für die Quantenkommunikation. | Telescope system for quantum communication.*

2 *Blick ins Teleskopsystem ohne abschattenden Fangspiegel. | View into the telescope system without obscuring secondary mirror.*

medien durchgeführt: eine erforderliche Entwicklung für die zukünftige Integration in eine heterogene Netzarchitektur. In einem Technologie-Demonstrator wird über einen optischen Freistrahllink eine sicherere Verbindung zwischen zwei Gebäuden und deren Anbindung an ein Glasfasernetz ermöglicht. Elementare Bausteine des Demonstrators sind präzisionsoptische Spiegelteleskope für die optimierte Übertragung von polarisations-kodierten Quantenzuständen (siehe Seite 34), eine polarisationsverschränkte Photonenpaarquelle, sowie ein Detektionssystem für Photonpaarkorrelationsmessungen mit hoher Zeitauflösung. Die Teleskope sind jeweils mit einer aktiven Strahlnachführung ausgestattet und ermöglichen mit einer Apertur von 20 cm einen Freistrahllink. Die Verschränkungsquelle emittiert Photonen mit zwei Wellenlängen: 810 nm für verlustarme Freistrahllinks und 1550 nm für absorptionsarme Glasfaserübertragung. Das Detektionssystem erzeugt aus den Quantenzuständen schnelle Schlüsselaustauschraten. Mittels hoher Zeitauflösung und präziser Synchronisation im Pikosekunden-Bereich garantiert es eine abhörsichere Kommunikation zwischen den Endpunkten.

Die Sicherheit der Quantenkommunikation basiert in diesem Fall auf dem sogenannten BBM92-Protokoll /1/ für polarisationsverschränkte Photonen.

Literatur / References

/1/ C. H. Bennett et al.: Quantum cryptography without Bell's theorem, Phys. Rev. Lett. 68, 557-559 (1992).

network architecture. In a technology demonstrator, a secure connection between two buildings is made possible via an optical free-space link. Elementary building blocks of the demonstrator are reflective telescopes with precision optics for the optimized transmission of polarization-encoded quantum states (see page 34), a polarization-entangled photon-pair source, and post-processing units, which include single-photon state analyzers and key management system to generate quantum keys.

Each of the telescopes is equipped with an active beam tracking system and they provide an aperture of 20 cm, which allow a free beam link. The entangled photon-pair source emits photon-pairs with a rate of up to 1 Million photons per second at a wavelength of 810 nm. A second source, which is non-degenerate and thus emits at 810 and 1550 nm, can be implemented to connect the optical free-space link to an optical fiber network. The detection system guarantees tap-proof communication between the endpoints using high time resolution and precise synchronization in the pico-second range.

The security of quantum communication in this case is based on the so-called BBM92 protocol /1/ for polarization-entangled photons.

AUTHORS

Daniel Rieländer
Fabian Steichlechner
Matthias Goy
Christopher Spiess
Andrej Krzic
Gregor Sauer
Sakshi Sharma
Sebastian Töpfer

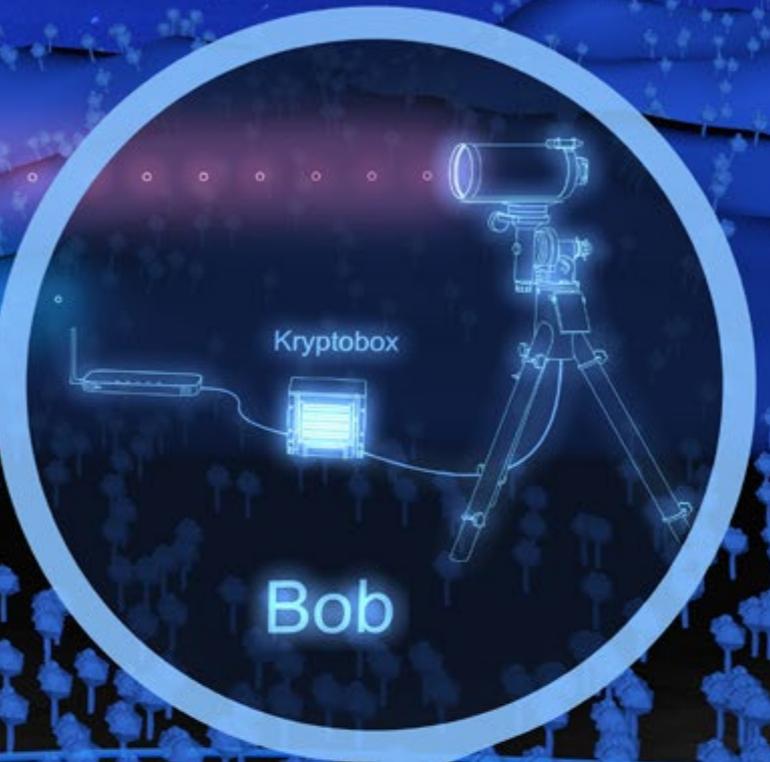
CONTACT

Dr. Fabian Steichlechner
Phone: +49 3641 807 733
fabian.steichlechner@iof.fraunhofer.de



Die QuNET-Initiative liefert einen Beitrag zu Deutschlands quantensicherer IT-Infrastruktur der Zukunft. Dazu wird die Technik der sogenannten Quantenschlüsselverteilung (engl.: Quantum Key Distribution, QKD) aus den Forschungslaboren einen entscheidenden Schritt näher Richtung praxisnaher Anwendungen gebracht. Die schematische Darstellung von Paarquelle, Teleskopen, Alice und Bob-Modul, jeweils optisch verbunden via Glasfaser oder Freistrahllink und öffentlichen RF-Kanal. |

The QuNET initiative is contributing to Germany's quantum-safe IT infrastructure of the future. To this purpose, the technology of so-called quantum key distribution (QKD) is being brought a significant step closer from the research laboratories towards practical applications. Schematic representation of pair source, telescopes, Alice and Bob module, each optically connected via optical fiber or free-space link and public RF channel.





HOLOGRAMME NICHT-DETEKTIERTER PHOTONEN HOLOGRAMS OF UNDETECTED PHOTONS

Die optische Bildgebung ist eines der wichtigsten Instrumente für Beobachtungen in den Biowissenschaften, die von der Grundlagenforschung bis zur Diagnostik reichen. Dabei kann es aufgrund von Absorption und Streuung ziemlich schwierig sein, ein Bild mit ausreichendem Kontrast von einer Probe zu erhalten, insbesondere wenn man in vivo Zellen betrachtet. Daher wird eine aufwändige Behandlung mit Kontrastmitteln notwendig /1/. Sinnvoll ist in dieser Situation die Ausnutzung der Objektphase zur Visualisierung. Hier ist die Holographie ein heute üblicher Ansatz. Im Detail erlaubt die digitale Phasenverschiebungsholographie, die dreidimensionale Verteilung von Amplitude und Phase einer Probe zu rekonstruieren /2/.

Neben den klassischen Ansätzen ermöglichen quanteninspirierte Sensortechniken neue Möglichkeiten der Bildgebung /3/. Ein prominentes Beispiel ist die »Bildgebung mit nicht-detektierten Photonen«, die es erlaubt, ein Objekt mit Licht einer Wellenlänge zu beleuchten und sein Bild mit einer Kamera bei einer anderen Wellenlänge aufzunehmen /4/. Natürlich sind beide spektral unterschiedlichen Strahlen miteinander korreliert. Dies kann z. B. durch die Verwendung von Signal- und Idlerstrahlen aus einem parametrischen Fluoreszenzprozess erreicht werden.

Im Rahmen der Fraunhofer Leitprojekt »Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions« (QUILT) werden beide Konzepte zu einem praktisch stabilen und schnellen Abbil-

Optical imaging is one of the major tools for making observations in life sciences, ranging from fundamental research to diagnostics. Due to absorption and scattering it can be especially challenging to obtain an image with sufficient contrast of a specimen, in particular when considering in vivo cells. Hence, an elaborate treatment with contrast agents becomes necessary /1/. Exploiting the object's phase for visualization makes this process more expedient. Holography is a common approach under these conditions nowadays. In detail, digital phase shift holography allows for the reconstruction of the three-dimensional distribution of both the amplitude and phase of a specimen /2/.

Apart from classical approaches, quantum-inspired sensing techniques allow new imaging capabilities /3/. One prominent example is "imaging with undetected photons", which enables the illumination of an object with the light of one wavelength and to record its image on a camera at another wavelength /4/. Naturally, both spectrally different beams are correlated with each other. This can be achieved, e.g., by using signal and idler beams from a parametric down-conversion process.

Within the framework of Fraunhofer Lighthouse project "Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions" (QUILT), both concepts are combined towards a practically stable and fast imaging technique to exploit exotic spectral ranges with visible light detectors efficiently. Imaging this way with undetected photons becomes more powerful by revealing complete

1 *Portabler Demonstrator für die Bildgebung mit nicht-detektierten Photonen einschließlich des digitalen Phasenverschiebungsholographie-Ansatzes.* | *Portable demonstrator for imaging with undetected photons including the digital phase shift holography approach.*

dungsverfahren kombiniert, um exotische Spektralbereiche mit Detektoren für sichtbares Licht effizient auszunutzen. Auf diese Weise wird die Bildgebung mit nicht-detektierten Photonen leistungsfähiger, da sie vollständige Informationen über die Phase und Amplitude des Objekts liefert, ohne dass die gesamte Phase interferometrisch abgetastet werden muss. Zu diesem Zweck sind nur vier Messungen mit fester relativer Phasenbeziehung, aber unbestimmter absoluter Phasenbeziehung erforderlich.

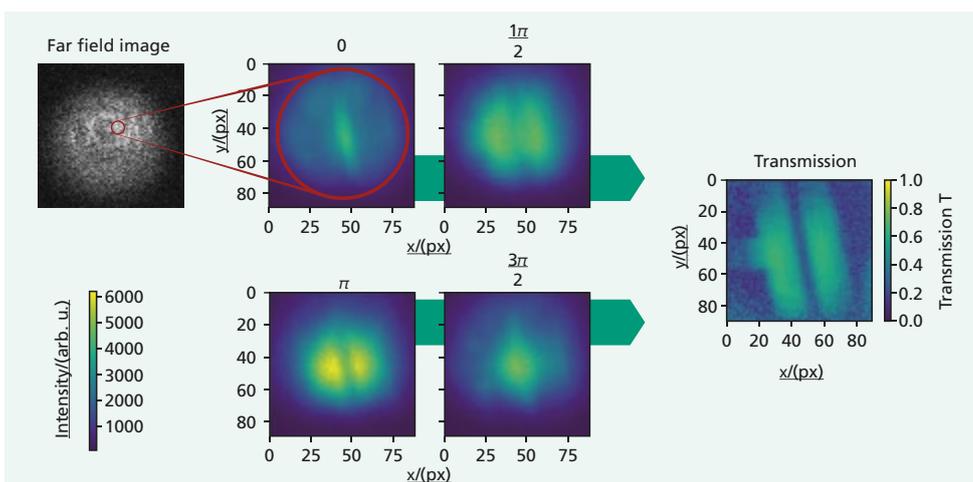
Dies ebnet den Weg zu effizienteren Quantenabbildungsgeräten. Es vereinfacht die Messung von Amplituden- und Phasenobjekten bei maximalem Kontrast mit minimalem technologischen Aufwand. Darüber hinaus wird eine erfolgreiche Implementierung innerhalb eines portablen Demonstrationssystems realisiert.

information about the object's phase and amplitude without the need to scan the whole phase interferometrically. To this end, only four measurements with fixed relative phase relation but undetermined absolute phase relation are necessary.

This paves the way towards more efficient quantum imaging devices. It simplifies the measurement of amplitude and phase objects at maximum contrast with minimum technological effort. Moreover, a successful implementation within a portable demonstration system is realized.

References / Literatur

- /1/ G. Popescu: Quantitative phase imaging of cells and tissues, McGraw-Hill (2011).
- /2/ I. Yamaguchi and T. Zhang, Optics Lett. 22, 1268 (1997).
- /3/ M. Gilaberte et al.: Laser Photon. Rev. 13, 1900097 (2019).
- /4/ G. B. Lemos et al.: Nature 512, 409 (2014).



2 Falschfarbenbild von einem nichtlinearen Interferometer. Das erste Bild zeigt das Fernfeld (»#NEXT« verkehrt herum). Die folgenden vier Bilder zeigen den vergrößerten Bereich (mit einem roten Kreis markiert) für verschiedene Phaseneinstellungen. Das letzte Bild rechts zeigt das rekonstruierte digitale Phasenverschiebungsholographie-Bild. | False-color image from a non linear interferometer. The first image shows the far-field ("#NEXT" upside down). The following four images show the enlarged region (marked with a red circle) for different phase settings. The last image on the right shows the reconstructed digital phase shift holography image.

AUTHORS

Sebastian Töpfer
Marta Gilaberte Basset
Markus Gräfe

CONTACT

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

QuNET

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Fraunhofer
IPV

QuNET

QuNET



OPTISCHES UND MECHANISCHES SYSTEMDESIGN OPTICAL AND MECHANICAL SYSTEM DESIGN

Zentrale Kompetenz und Basis aller Entwicklungen am Fraunhofer IOF sind Optik- und Mechanik-Design sowie die Simulation und Analyse optischer und opto-mechanischer Systeme einschließlich thermischer und thermooptischer Effekte. Die Nutzung von umfangreichen Design- und Modellierungswerkzeugen erlaubt die Simulation und Optimierung von Optiken und Systemen aus Metall, Glas oder Kunststoff – von Mikrooptiken bis hin zu astronomischen Teleskopen, von Lasersystemen bis zur Quantenoptik. Hierfür werden refraktive und reflektive sowie diffraktive Systeme, sphärische, asphärische und freiformoptische Komponenten, faseroptische und quantenoptische Komponenten, Gitter bis hin zu Mikrolinsen-Arrays berechnet.

Schwerpunkte liegen hier auf mikrooptischen Systemen, Hochleistungs- und Spezialoptiken – von Automotive bis Space. Diese Systeme werden nach Design und Simulation auch realisiert und charakterisiert.

Die in diesem Kompetenzbereich abgeschlossenen Projekte im Jahr 2020 zeigen auch in den nachfolgenden Beiträgen eine große Bandbreite von Wellenlängen und Anwendungen: von Design und Konstruktion eines Snap-Together Spiegelteleskops über das Systemdesign einer Time-of-Flight Kamera hin zum Design tiefer diffraktiver Elemente.

Central competence and basis of all developments at Fraunhofer IOF are optical and mechanical design as well as the simulation and analysis of optical and opto-mechanical systems including thermal and thermo-optical effects. The use of comprehensive design and modeling tools allows the simulation and optimization of optics and systems made of metal, glass or plastic - from micro-optics to astronomical telescopes, from laser systems to quantum optics. For this purpose, refractive and reflective as well as diffractive systems, spherical, aspherical, and freeform optical components, fiber-optical and quantum-optical components, gratings up to microlens arrays are calculated.

The focus is on micro-optical systems, high-performance and special optics - from automotive to space. These systems are also realized and characterized after design and simulation.

The projects completed in this competence area in 2020 show a wide range of wavelengths and applications in the following contributions: from design and construction of a snap-together mirror telescope to the system design of a time-of-flight camera and design of deep diffractive elements.

LEFT *Technologie-Demonstratorsystem für einen optischen Freistrahllink mit kompaktem Hochleistungsspiegelteleskop im QuNET-Projekt. | Technology demonstrator system for an optical free-space link with compact high-power mirror telescope in the QuNET project.*



SNAP-TOGETHER: SCHNELLE HOCHPRÄZISIONSMONTAGE VON SPIEGELTELESKOPEN

SNAP-TOGETHER: FAST HIGH PRECISION MOUNTING OF MIRROR TELESCOPES

Für die optische Quantenkommunikation werden neben der etablierten Infrastruktur von Glasfasernetzen auch Freiraum-Links benötigt, um z. B. die sichere Kommunikation zwischen Bodenstationen und Satelliten zu ermöglichen. Für das Senden und Empfangen von Photonen sind leistungsfähige und kompakte Teleskope erforderlich, die eine verlustarme Verbindung zwischen den zwei Kommunikationsstationen erlauben. Hierbei kommt neben der Fertigungsqualität der Einzelkomponenten der finalen Montage und Justage eine Schlüsselrolle zu, um eine beugungsbegrenzte Gesamtleistung des Systems zu erzielen. Herkömmlicherweise ist hierfür ein kosten- und zeitintensives iteratives Justieren der Einzelkomponenten in jeweils bis zu sechs Freiheitsgraden notwendig.

Durch den am Fraunhofer IOF entwickelten Snap-Together-Ansatz für Spiegelteleskope kann dieser Prozess auf wenige Stunden Montage- und Justagezeit verkürzt werden. Dies ermöglicht qualitativ hochwertige Systeme in größeren Stückzahlen und zu geringeren Kosten herzustellen und erlaubt damit deren Einsatz auch für kommerzielle Anwendungsfälle außerhalb der Grundlagenforschung.

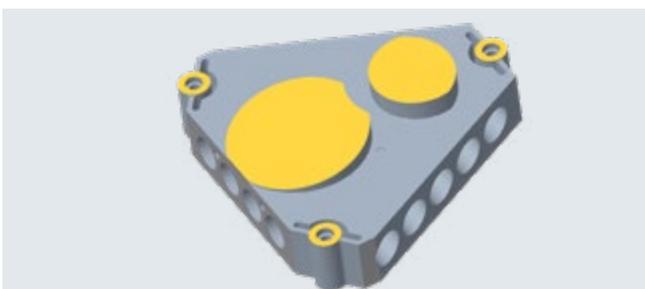
Kernelement des Snap-Together-Ansatzes ist es, mehrere Spiegelflächen sowie hochpräzise Montage- und Referenzflächen auf einer mechanischen Komponente zu integrieren. Diese

In addition to classical optical fiber networks, optical free-space links are required for a future quantum-communication infrastructure, e.g., for the secure communication between ground stations and satellites. To send and receive single photons transmitted by such links, high-performance telescopes are required to establish a low-loss connection between two communication terminals. In addition to the high manufacturing quality of the components used, the final assembly and alignment are crucial to obtain a diffraction-limited performance of the complete system. Commonly, a costly and time consuming iterative alignment procedure with up to six degrees of freedom per component is used.

At Fraunhofer IOF, a novel construction and manufacturing strategy, the snap-together approach, for mirror telescopes was developed to reduce the assembly and alignment time to only a few hours. These high-quality systems can be built in large numbers by reducing costs and enabling the use of such systems for commercial applications outside of fundamental science projects and proof-of-concept demonstration. A key feature of the snap-together approach is the integration of several mirror surfaces as well as high-precision mounting and reference surfaces within a single mechanical component. All these surfaces will be manufactured together with high optical quality and using the same intrinsic reference

1 *Kompaktes Hochleistungsspiegelteleskop für die optische Quantenkommunikation.* |
Compact high-performance mirror telescope for optical quantum communication.

Flächen werden in einem Bearbeitungsschritt mit optischer Qualität in einem gemeinsamen Referenzkoordinatensystem gefertigt. Die Lagebeziehungen zwischen den Flächen sind bereits durch den Fertigungsprozess mit hoher Präzision festgelegt. Die Zahl der anschließend noch zu justierenden Freiheitsgrade kann durch dieses Konzept drastisch verringert werden, wodurch sich die notwendige Anzahl an Justageschritten auf einen geringen einstelligen Betrag reduzieren lässt. Die Umsetzung des beschriebenen Ansatzes für ein Teleskop für die Freiraumquantenkommunikation ist in Abbildung 1 zu sehen. Das kompakte Spiegelteleskop besitzt eine Öffnung von 200 mm und eine 20-fache Vergrößerung. Ausgeführt ist das Teleskop mit vier off-axis Spiegelflächen, welche paarweise als Duolithen gefertigt worden sind. Die optischen Flächen wurden mittels Einkorn-Diamant-Bearbeitung und einer abschließenden magnetorheologischen Nachbearbeitung hergestellt, wodurch eine beugungsbegrenzte Abbildungsqualität erreicht wird. Die Ausführung des Spiegelsystems als Duolithen mit integrierten hochpräzisen Montageflächen ist in Abbildung 2 zu sehen. Durch den gefalteten Strahlengang sowie dem speziellen Snap-Together-Ansatz konnte somit ein äußerst kompaktes Hochleistungsteleskop für die optische Quantenkommunikation über einen Freiraumkanal realisiert werden.



2 *Integration zweier Spiegel- und hoch präziser Montageflächen auf einem Bauteil. | Integration of two mirrors and high precision mounting surfaces into one component.*

coordinate system. The relative position between all surfaces is fixed by the high precision of the manufacturing process. During this procedure, the number of remaining degrees of freedom is highly reduced and typically a single-digit number of alignment steps is sufficient for the system assembly.

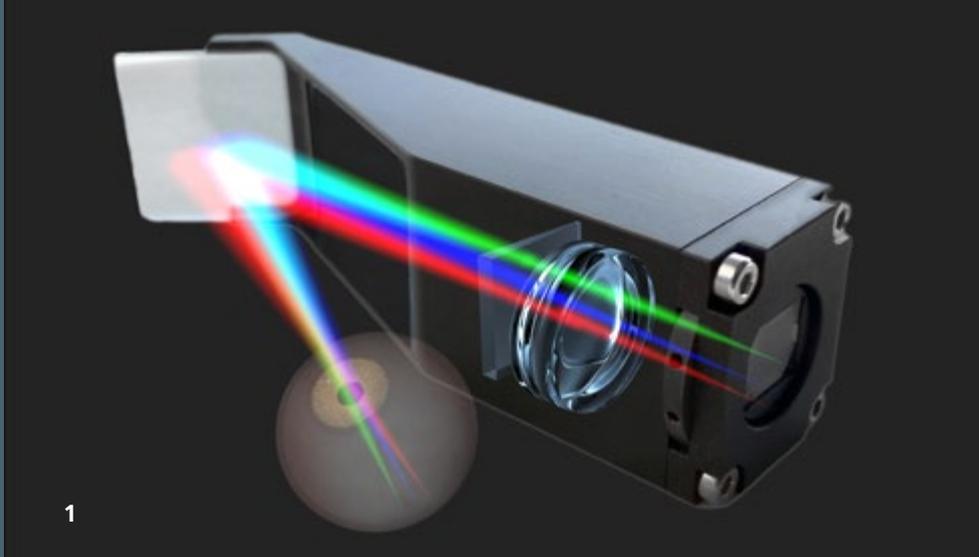
The realization of the described approach for a telescope developed for the free-space quantum communication is shown in figure 1. The compact mirror telescope has an opening of 200 mm and a magnification of 20. The telescope is realized by four off-axis mirror surfaces, which are manufactured as duoliths with two mirrors on each component. The optical surfaces are manufactured by single-point-diamond turning and additional magneto-rheological finishing resulting in a diffraction-limited performance of the optical system. The implementation of the mirror system and the high-precision mounting surfaces within one of the two duoliths is illustrated in figure 2. The folded optical path in combination with the snap-together approach enabled Fraunhofer IOF to realize a very compact high-performance telescope for free-space quantum communication.

AUTHORS

Thomas Peschel
Christoph Damm
Robert Brüning

CONTACT

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



1

MIKROOPTIK-DESIGN – VOM GITTER ZUR FRESNELSTRUKTUR MICRO-OPTICS DESIGN - FROM GRATING TO FRESNEL STRUCTURE

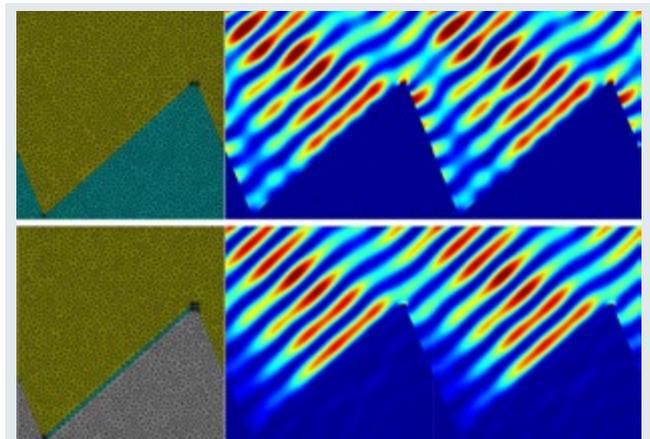
Die flexible optische Response von Mikrostrukturen mit Strukturgrößen im Submikrometerbereich bis hin zu einigen hundert Mikrometern ermöglicht die Miniaturisierung optischer Systeme. Optische Effekte im Zwischenbereich zwischen Strahlenoptik und diffraktiver Optik erschweren dabei Design und Modellierung.

Im diffraktiven Limit von periodischen Gittern werden rigorose Standardmethoden, wie die Finite-Elemente-Methode (FEM), unter Berücksichtigung von technologischen Randbedingungen angewendet. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel einer FEM-Simulation eines Blazegitters (Periode $\sim 6 \mu\text{m}$) für eine spektrometrische Multiband-Weltraumanwendung. Eine partiell abgeschattete Beschichtung (Abb. 2b) verringert Wellenfrontstörungen der TM-Polarisation durch Oberflächenwellen (Abb. 2a), was u. a. zu verbesserter Polarisationsinvarianz führt.

Für großflächige Fresnelemente mit erheblich vergrößerten Strukturgrößen (typischerweise $> 100 \mu\text{m}$) und ohne strikte Periodizität, werden approximative Methoden (z. B. Lokale-Gitter-Approximation) zur Überführung der rigorosen Response in die Strahlenoptik eingesetzt. Ein AR-Headset-Demonstrator (Abb. 1) nutzt einen semitrans-

The flexible optical response of microstructures with feature sizes from the sub-micrometer range up to several hundred micrometers enables the miniaturization of optical systems. However, optical effects in the intermediate range between ray optics and diffractive optics complicate design and modeling.

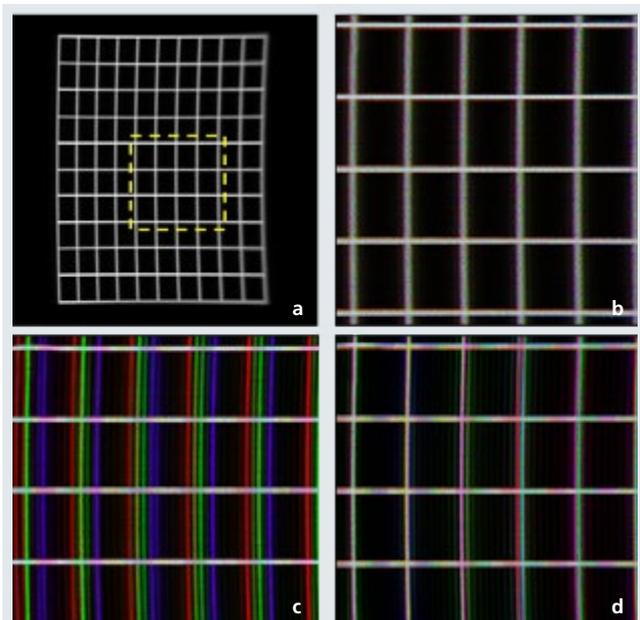
In the diffractive limit of periodic gratings, rigorous standard methods, such as the finite element method (FEM), are applied, taking into account technological constraints. Figure 2 shows an example of a FEM simulation of a blazed grating (period $\sim 6 \mu\text{m}$) for a multiband spectrometric space



1 *AR-Headset-Demonstrator mit halbdurchlässiger, vergrabener Fresnelstruktur, Inset: Silizium-Master der Fresnelstruktur. | AR headset demonstrator with buried, semi-transparent Fresnel combiner, inset: Si-wafer Fresnel master.*

2 *Reflektives Blazegitter (TM-Felder) mit und ohne einseitiger Beschichtung. | Reflective blazed gratings (TM field) with potential one-sided coating.*

parenten, vergrabenen Fresnel-Combiner zur Überlagerung von Bildinformation und Durchsicht. Die Simulation der Projektion zeigt eine typische Smile-Verzeichnung und anamorphotische Vergrößerung (Abb. 3a). Ohne Farbkorrektur (Abb. 3c) sind zueinander verschobene RGB-Gitterordnungen deutlich sichtbar. Verbleibende diffraktive Farbsäume nach der refraktiven Farbkorrektur durch das Prisma (Abb. 3d) werden von einer diffraktiven Farbmischung (Abb. 3b) unterdrückt /1/. Die Elementherstellung erfolgt durch eine Kombination von Lithographie, Ätz-, Beschichtungs- und Replikationstechnologien.



3 RGB-Abbildung eines Liniengitters mit dem AR-Headset, a: refraktive/diffraktive Farbkorrektur, b: Ausschnitt aus a (gelbe Berandung), c: ohne Farbkorrektur, d: refraktive Farbkorrektur. | RGB line grid image of AR headset demonstrator, a: refractive/diffractive color correction, b: detail of picture a (yellow boundary), c: without color correction, d: refractive color correction.

application. A partially shadowed coating (Fig. 2b) reduces TM polarized wavefront distortions by surface waves (Fig. 2a) leading to, e.g., an improved polarization invariance.

For large-area Fresnel elements with considerably enlarged feature sizes (typically $> 100 \mu\text{m}$) and without strict periodicity, approximate methods (e.g. local grating approximation) are used to transfer the rigorous response to ray optics. Figure 1 shows an AR headset demonstrator with a semi-transparent, buried Fresnel combiner that superimposes projection and see-through information. The simulation of the projection reveals a typical smile distortion and anamorphic magnification (Fig. 3a). Without color correction (Fig. 3c), different RGB grating orders shifted in relation to each other are visible. Remaining diffractive color fringes after refractive color correction by a prism (Fig. 3d) are suppressed by diffractive color mixing (Fig. 3b) /1/. The micro-optical elements are realized by a combination of electron beam lithography, wet chemical etching of off-axis cut silicon wafers (inset of Fig. 1) as well as coating technologies and potential UV replication.

References / Literatur

/1/D. Michaelis et al.: Proc. SPIE 11310 (2020).

AUTHORS

Dirk Michaelis
Peter Schreiber
Axel Bodemann
Torsten Harzendorf
Thomas Flügel-Paul
Peter Dannberg

CONTACT

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



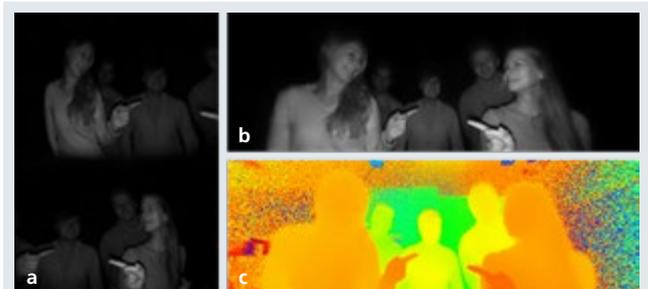
SYSTEMDESIGN EINER ULTRA-KOMPAKTEN TIME-OF-FLIGHT-KAMERA

SYSTEM DESIGN OF ULTRA-COMPACT TIME OF FLIGHT CAMERA

Bei der Weiterentwicklung des automatisierten Fahrens spielt die Kontrolle des Fahrzeuginnenraums eine wichtige Rolle. Neben der Überwachung der Fahrbereitschaft des Fahrenden können durch Kamerasysteme ganz neue Bedienkonzepte realisiert sowie weitere Sicherheitsfunktionen unterstützt und auch ersetzt werden. Beispiele hierfür sind die Überprüfung des Anschnallzustands oder die automatische Deaktivierung von Airbags bei der Verwendung von Kindersitzen.

In Hinblick auf die vielfältigen Anwendungen ergeben sich anspruchsvolle Anforderungen an die Sensorauflösung, den zu erfassenden Objektraum und die Systemstabilität. Gleichzeitig ist für die Integration ins Fahrzeug eine geringe Baugröße des Systems von max. 10 mm notwendig. Diese Anforderungen lassen sich durch das stark erweiterte Gesichtsfeld mit klassischen Weitfeld-Kameraoptiken nur unzureichend erzielen. Zur Lösung des Problems wird im Projekt »MinTOFKA« ein neues, mehrkanaliges Kamerakonzept realisiert, bei dem das große Gesichtsfeld in vordefinierte Einzelkanäle aufgeteilt wird. Das erlaubt eine deutliche Reduktion der Baugröße sowie der Komplexität der Optik. Die Integration auf einem Time-of-Flight (TOF)-Kamerachip ermöglicht dabei die dreidimensionale Erfassung des Fahrzeuginnenraums. Am Fraunhofer IOF fand die Entwicklung der Optik vom Design über Konstruktion und Aufbau bis zur Charakterisierung statt. Zusätzlich erfolgte die digitale Vorverarbeitung der Einzelbilder, die dabei zu einem

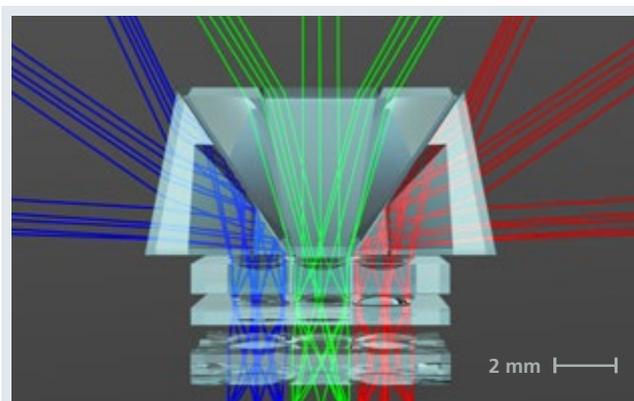
On the way to autonomous driving, the monitoring of the vehicle interior is essential. Camera systems can control the driver's attention and readiness to take over in critical situations. In addition, they allow new interactive user interfaces as well as the support or even replacement of further safety features. Examples of this are the seat belt control and automatic airbag deactivation when using a child seat. The various applications set high requirements on the sensor resolution, the dimension of the object space, and the system stability. Further, for the integration of the system into a car, high compactness is necessary and limits the system length to a maximum of 10 mm. The classical approach with fisheye lenses cannot satisfy sufficiently all of these aspects. In the "MinTOFKA" project, we approach the problem with the development of a new multi-channel camera, which divides the large full field of view (FOV) into smaller sub-channels.



2 Zweikanalsystem: a) Rohbilder, b) zusammengesetztes Panoramabild, c) Tiefenkarte. | 2-channel system: a) raw data, b) assembled panoramic image, c) depth map.

1 *Visualisierung der ultra-kompakten Time-of-Flight-Kamera. | Visualization of the ultra-compact time-of-flight camera .*

Gesamtbild mit großen Gesichtsfeld zusammenfügt wurden. Das Projekt ist in zwei Phasen aufgeteilt, in denen jeweils ein Demonstrator gebaut wird. Im Ergebnis der ersten Projektphase zeigt Abbildung 2 die Aufnahme der Einzelkanäle, das aus diesen zusammengesetzte Panoramabild sowie die resultierende Tiefenkarte. Dort ist zu erkennen, dass die zur Gestenerkennung notwendige Auflösung eines Fingers sehr gut gelingt. Weitere Tests und Auswertungen zu den Anwendungsfällen erfolgen bei den Projektpartnern gestigon und BMW. Während in Projektphase 1 ein zweikanaliges System mit $110^\circ \times 50^\circ$ Field of View (FOV) entwickelt wurde, wird in Phase 2 zur weiteren Miniaturisierung ein System bestehend aus sechs Kanälen auf dem gleichen TOF-Chip aufgebaut. Damit wird ein FOV von ca. $170^\circ \times 130^\circ$ erreicht. Abbildung 3 zeigt einen Schnitt durch die Anordnung aus 3×2 Kanälen. Jeder optische Kanal besteht aus zwei sphärischen und einer asphärischen Linse. Die außenliegenden Kanäle werden über einseitig verspiegelte Prismen zur Seite umgelenkt, so dass alle Kamerakanäle in die verschiedenen Richtungen sehen. Die brechende Wirkung der Prismen erlaubt zudem einen kompakteren Aufbau sowie einen für das Aneinanderfügen der Einzel-FOVs notwendigen Überlappbereich.



3 *Optikdesign für Multiapertur-Weitwinkelobjektiv . |*
Lens design for multi-aperture wide-angle objective.

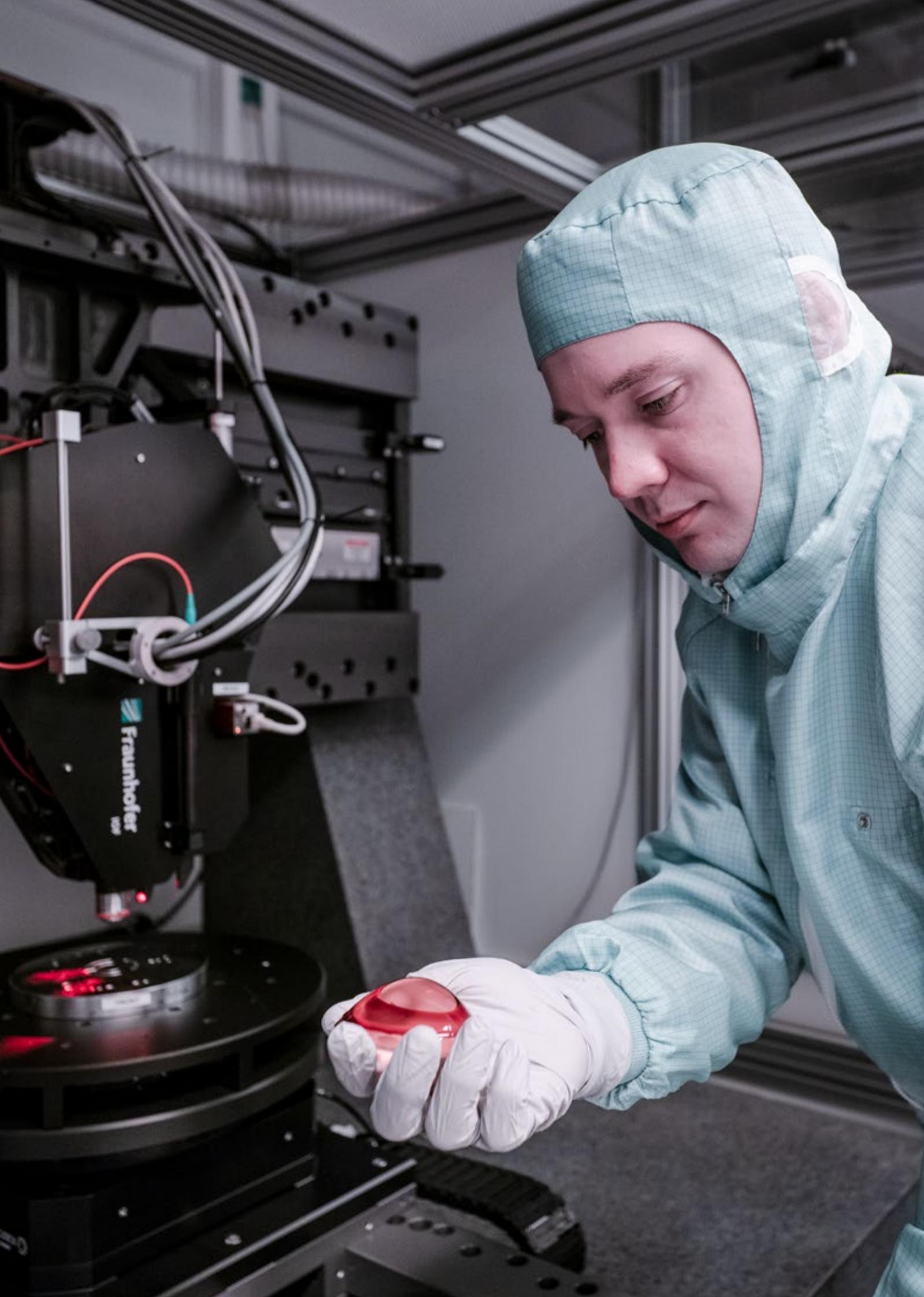
This concept leads to a significant reduction in lens volume and complexity. Further, with the integration of a time-of-flight (TOF) camera chip, it captures the vehicle interior in three dimensions. Fraunhofer IOF develops the optical setup, from the lens design and system construction to the setup of the prototype and its characterization. Afterward, we process digitally the image data of the single channels to combine them correctly to arrive at the full FOV. Within two phases of the project, two demonstrators are built. As a result of phase 1, figure 2 shows the images taken with the demonstrator. From left to right, it shows the images of the single channels, the assembled panoramic image, and finally the resulting depth map. Gesture recognition required the detection of a single finger. The figure shows that the demonstrator resolution meets this requirement easily. Further tests and data processing for several use cases are performed by project partners gestigon and BMW. While a two-channel system with $110^\circ \times 50^\circ$ FOV was realized in project phase 1, the second phase further miniaturized the lens. Thus, a 6-channel lens concept was developed on the same TOF chip to increase the FOV to about $170^\circ \times 130^\circ$. Figure 3 shows a sectional view of the 3×2 setup. Each channel contains two spherical and one aspherical lens. Prisms reflect the side channels to the different viewing directions with mirror faces. Further, the prism refraction allows a more compact folding angle as well as an overlap between the single-channel FOVs, which is necessary for the image reconstruction of the full field.

AUTHORS

Britta Satzer
Robert Brüning
Christin Gassner
Alexander Oberdörster

CONTACT

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



MIKRO- UND NANOSTRUKTURIERTE OPTIK MICRO- AND NANOSTRUCTURED OPTICS

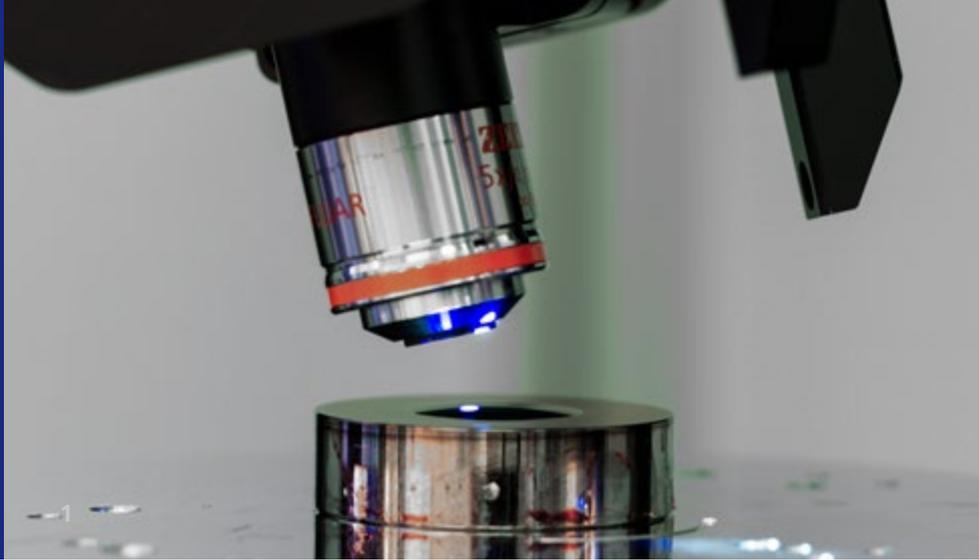
Die Erzeugung und Replikation optischer Mikro- und Nanostrukturen ist Grundlage für moderne komplexe optische Systeme. Die am Fraunhofer IOF vorhandene technologische Basis – wie z. B. Grautonlithographie, Elektronenstrahlolithographie, reaktives Ionenätzen, Step & Repeat Replikation, Wafer-Level- Fertigung oder auch Abformtechniken – erlauben die Fertigung und Charakterisierung von High-End mikro- und nanooptischen Elementen höchster Auflösung auf bis zu 12"-Substraten und auch auf gekrümmten Oberflächen. Anwendungsfelder sind zum Beispiel Beugungsgitter, CGHs (Computergenerierte Hologramme), Mikrolinsen-Arrays, Diffusoren oder auch stochastische Strukturen. Lithographische Techniken erlauben die simultane Herstellung einer großen Zahl von Elementen mit höchster lateraler Genauigkeit. Als äußerst flexibles direkt-schreibendes Verfahren ermöglicht die maskenlose Grautonlithographie die Erzeugung hochpräziser Mikrostrukturen und Oberflächenprofilen.

Die nachfolgenden Beiträge beschreiben exemplarisch die Projektbandbreite, die in 2020 bearbeitet wurde: Nichtlineare Nanophotonik in Metaoberflächen aus Lithiumniobat, Nanogitter als integriert-optische Quantengatter, Mikrooptische Elemente für kompakte quantenoptische Systeme, Flexible Fotolithographie auf stark gekrümmten Oberflächen und breitbandige Entspiegelung für den infraroten Spektralbereich mittels Sub-Wellenlängen-Strukturen in Diamant.

The generation and replication of optical micro- and nanostructures is the basis for modern complex optical systems. The technology available at Fraunhofer IOF - such as grayscale lithography, electron beam lithography, reactive ion etching, step & repeat replication, wafer-scale fabrication, or even molding techniques - allows the fabrication and characterization of high-end micro- and nanooptical elements of the highest resolution on up to 12" substrates and also on curved surfaces. Fields of application are for example diffraction gratings, CGHs (computer-generated holograms), microlens arrays, diffusers, or stochastic structures. Lithographic techniques allow the simultaneous production of a large number of elements with the highest lateral accuracy. As an extremely flexible direct-writing process, maskless grayscale lithography allows the generation of high-precision microstructures and surface profiles.

The following articles describe exemplarily the project scope that was worked on in 2020: nonlinear nanophotonics in lithium niobate metasurfaces, nanogrids as integrated optical quantum gates, microoptical elements for compact quantum optical systems, flexible photolithography on strongly curved surfaces, and broadband antireflection coating for the infrared spectral range using sub-wavelength structures in diamond.

LEFT *Neuartiges Fotolithographie-System zur Strukturierung stark gekrümmter Oberflächen. | Novel photolithography system for structuring highly curved surfaces.*



FLEXIBLE FOTOLITHOGRAPHIE AUF STARK GEKRÜMMTEN OBERFLÄCHEN

VERSATILE PHOTOLITHOGRAPHY TOOL FOR STRONGLY CURVED SURFACES

Zahlreiche fortschrittliche optische Konzepte erfordern hochaufgelöste Strukturen auf nichtplanaren Oberflächen oder den Flächen von Volumenkörpern. Zu nennen sind hier Beugungsgitter für abbildende Spektrometer (bspw. Offner- und Dysonkonfiguration, GRISMs), diffraktive Spektralfilter (z. B. für EUV-Kollektorspiegel), und diffraktiv-optische Elemente zur Aberrationskorrektur. Mit der Möglichkeit, refraktive und diffraktive Funktionsweisen in einem einzelnen Bauelement zu kombinieren, eröffnen sich vielfältige neue Anwendungen und Möglichkeiten für die Realisierung extrem kompakter Systeme.

Es wurde ein neuartiges Fotolithographie-System entwickelt, welches ein mit einer UV-LED beleuchtetes Mikrodisplay als dynamisches Reticle und eine austauschbare Projektionsoptik nutzt. Dank eines hochpräzisen mehrachsigen Bewegungssystems ist es möglich, sehr flexibel Oberflächen zu strukturieren. Mit Hilfe eines aktiven optischen Autofokus kann bei Belichtung sehr genau der Projektionsabstand eingehalten werden. Das Lithographie-System ist insbesondere geeignet, axial-symmetrische Substrate und Oberflächen mit Kanten oder Diskontinuitäten, bspw. Zylinder, Axicons oder Prismen, zu strukturieren.

Im Vergleich zu anderen Technologien verringert die Verwendung eines Step & Repeat Ansatzes in Verbindung mit einem Mikrodisplay zum einen die benötigte Belich-

Numerous advanced optical concepts demand the high-resolution patterning of non-planar surfaces and facets of bulky objects. Examples are dispersive gratings for various imaging spectrometer configurations (e.g., Offner and Dyson arrangements, GRISMs), diffractive spectral purity filters (e.g., on EUV-collector mirror surfaces), or diffractive optical elements for aberration correction. The possibility to combine refractive and diffractive functionalities in a single optical element opens the path towards numerous applications and the realization of extremely compact systems.

A novel photolithography tool has been developed, which uses a UV-LED-illuminated micro-display as a dynamic lithography mask and an exchangeable projection optics. Thanks to the high-precision multiaxial motion system, nearly arbitrary-shaped surfaces can be patterned. An active optical autofocus system allows for accurate alignment of exposure distances. This lithography tool is particularly suitable for the structuring of axial symmetric samples and surfaces containing edges or discontinuities like lateral surfaces of cylinders or axicons, prisms, respectively.

In comparison to other patterning techniques, using a micro-display in a step-and-repeat approach reduces the structuring time drastically while enabling complex pattern characteristics down to critical feature sizes of a few micrometers. However, the complexity of the exposure data

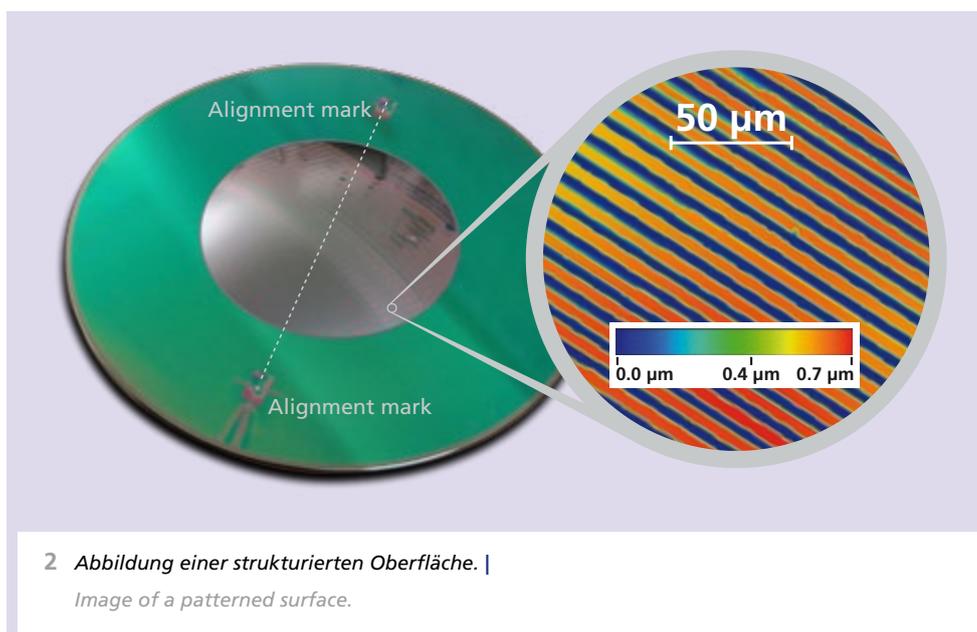
1 *UV-Fotolithographie auf einer gekrümmten Oberfläche. | UV-exposure of a non-planar surface.*

tungszeit. Zum anderen ermöglicht es die Realisierung komplexer Texturen bis zu einer Strukturgröße von einigen wenigen Mikrometern. Dennoch steigt die rechenintensive Belichtungsdatengenerierung aufgrund der Komplexität erheblich. Aktuelle Projekte betreffen die Strukturierung mit Grautondaten, die Verbesserung der Leistung der Ablaufsteuerung bei asymmetrischen Oberflächen und die Integration einer Kollisionsprävention.

Das Fraunhofer IOF bietet das fotolithographische Strukturmasterning von hochpräzisen Substraten in der gesamten Prozesskette an. Durch reaktives Plasmaätzen (RIE) können die Texturen in die Oberfläche von silikatischen Substraten wie Silizium, Kieselglas oder Borofloatglas übertragen werden.

generation and the computational requirements increase significantly. Current projects target patterning with grayscale data, improving asymmetric surface-processing performance, and implementing a collision prevention control.

Fraunhofer IOF offers the complete lithographic mastering process chain on high-precision substrates. In the case of siliceous materials, like silicon, fused silica, or borofloat glass, reactive ion (beam) etching can be applied to transfer the realized patterns onto the substrate's surface.



AUTHORS

Dmitriy Mitin
Robert Leitel

CONTACT

Dmitriy Mitin
Phone +49 3641 807-439
dmitriy.mitin@iof.fraunhofer.de



DETERMINISTISCHE AR-STRUKTUREN IN DIAMANT FÜR TIEFES INFRAROT DETERMINISTIC AR-STRUCTURES IN DIAMOND FOR FAR INFRARED

Die neunte Earth Explorer Mission (FORUM) der Europäischen Weltraumagentur ESA widmet sich der Detektion und Analyse von elektromagnetischer Strahlung im mittleren bis fernen Infrarotbereich. Eines der entwickelten Instrumentenkonzepte beruht auf dem Einsatz eines Fourier-Transform-Spektrometers, welches den gesamten Wellenlängenbereich zwischen $6\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ abdeckt ^{1/}. Zentrales Element des Spektrometers stellt ein optisches Fenster – genauer ein Strahlteiler – dar, welches aus synthetischem Diamant gefertigt wird. Synthetischer Diamant weist einen großen Transmissionsbereich auf, welcher bei $\sim 1\ \mu\text{m}$ beginnt und bis in Wellenlängenbereiche größer $100\ \mu\text{m}$ reicht. Diamant ist demzufolge eines von wenigen Materialien, die zur Herstellung von Transmissionsoptiken im mittleren und fernen Infrarotbereich geeignet sind. Zur Steigerung der optischen Performance dieses Strahlteilers wurde am Fraunhofer IOF eine Technologiekette zur Herstellung tiefer Mikrostrukturen entwickelt, welche in die Oberfläche des Diamantsubstrats eingebracht werden. Der entwickelte Prozess beruht auf Elektronenstrahlolithographie kombiniert mit reaktivem plasma-unterstütztem Trockenätzverfahren. Durch die Flexibilität der etablierten Technologiekette ist die Herstellung einer Vielfalt von optischen Elementen, wie z. B. diffraktive Gitter oder auch Antireflexstrukturen möglich. Wir möchten hiermit zwei Diamantstrahlteiler-Elemente vorstellen, auf welchen deterministische subwellenlängen-Antireflex (AR)-Strukturen entwickelt wurden.

The ninth Earth Explorer Mission (FORUM) of the European Space Agency ESA is dedicated to the detection and analysis of electromagnetic radiation in the mid to far-infrared range. One of the instrument concepts developed is based on the use of a Fourier Transform spectrometer, which covers the entire spectral range between $6\ \mu\text{m}$ and $100\ \mu\text{m}$ ^{1/}. The central element of the spectrometer is an optical window - more precisely a beam splitter - made of synthetic diamond. Synthetic diamond has a wide transmission range, which starts at $\sim 1\ \mu\text{m}$ and extends to wavelength ranges larger than $100\ \mu\text{m}$. Diamond is therefore one of only a few materials suitable for manufacturing transmission optics in the mid and far-infrared range. To increase the optical performance of this beam splitter, a technology chain for the fabrication of deep microstructures was developed at Fraunhofer IOF, which are implemented into the surface of the diamond substrate. The process developed relies on electron-beam-lithography combined with a deep reactive-ion-etching process. The flexibility of the established technology chain allows the manufacturing of a variety of optical elements, e.g., diffraction gratings or anti-reflection structures. We present two full-size samples, which show the realization of a deterministic sub-wavelength anti-reflection (AR) structure established on diamond beam-splitting devices.

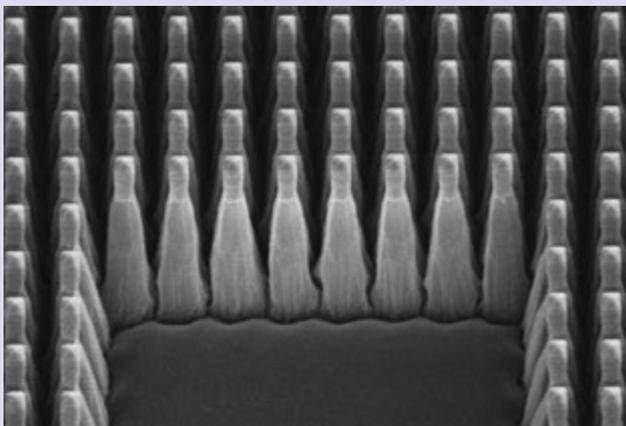
The realized AR-structure geometry comprises a periodic, two-dimensional pattern with a pitch of $2.2\ \mu\text{m}$. Etching depths down to $8\ \mu\text{m}$ were achieved successfully. To realize such deep

¹ *AR-strukturierter Strahlteiler. | AR-structured beamsplitter.*

Die realisierten AR-Strukturen bestehen aus einem periodischen, zwei-dimensionalen Strukturmuster mit einer Periode von $2.2 \mu\text{m}$ und einer erfolgreich erzielten Ätztiefe von $8 \mu\text{m}$. Um derart tiefe Strukturen in einem Diamanten zu erzeugen, musste eine dedizierte Optimierung des Ätzprozesses erfolgen. Diese ermöglichte die letztendliche, einseitige AR-Strukturierung von planen Diamantsubstrat-Demonstratoren.

Erzielt wurde eine Transmission von $\sim 81 \%$ für einen Wellenlängenbereich von $6 \mu\text{m}$ bis $25 \mu\text{m}$ (aufgrund von Messbeschränkungen) für beide Strahlteiler-Elemente mit AR-Strukturen. Zum Vergleich: Eine unstrukturierte einzelne Diamantfläche erreicht lediglich eine Transmission von 83% , bedingt durch Fresnel Reflexionen. Somit ist die nachgewiesene Transmissionseffizienz der AR-Struktur $> 96 \%$.

Diese Arbeit entstand in Kooperation mit OHB System AG innerhalb des Rahmens der Aktivitäten der Phase A/B1 des FORUM Erdentdeckungs-Programms der ESA.



2 REM-Aufnahme der deterministischen AR-Strukturen. |
SEM picture of deterministic AR-structures.

structures in diamond, a dedicated optimization of the etching process was necessary. The manufactured demonstrators are plane diamond substrates comprising the AR-structure on one of their surfaces.

The measured transmittance of the diamond beamsplitter substrates with AR-structure is $\sim 81 \%$ over the spectral range from $6 \mu\text{m}$ to $25 \mu\text{m}$ (due to measurement restrictions). For comparison, the unstructured single surface achieves a transmission of only 83% due to Fresnel reflections. Therefore, the verified transmission efficiency of the manufactured AR-structures is $> 96 \%$.

This work was in cooperation with OHB System AG within the framework of Phase A/B1 activities of ESA's FORUM earth-explorer program.

References / Literatur

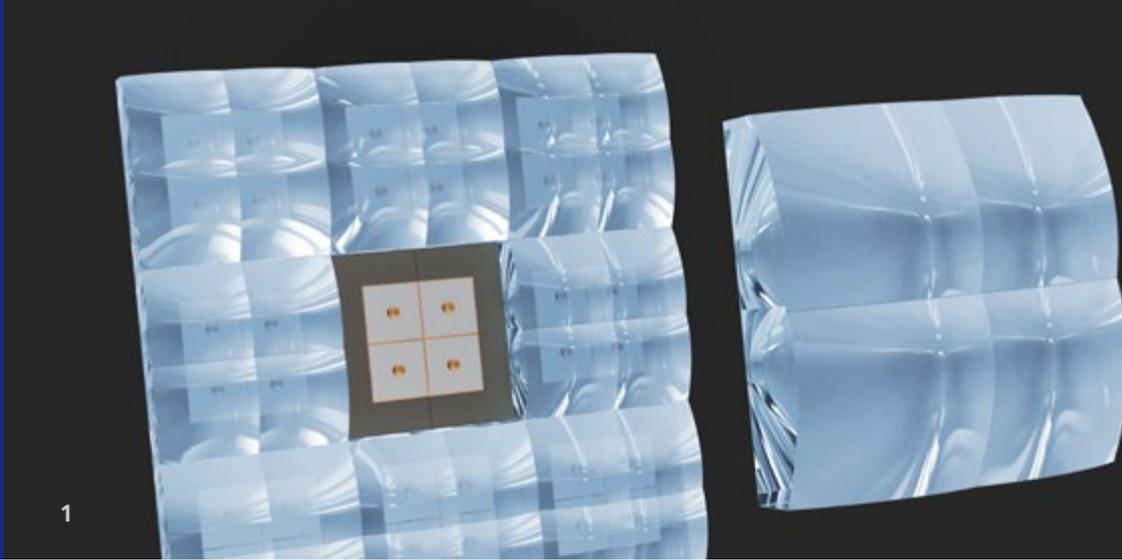
/1/ C. Pachot et al.: The infrared Fourier Transform Spectrometer and the infrared imager instrument concepts for the FORUM mission, ESA's 9th Earth Explorer, Proc. of SPIE Vol. 11530, doi: 10.1117/12.2570867 (2020).

AUTHORS

Susann Sadlowski
Thomas Käsebier
Frank Burmeister
Uwe Zeitner
Thomas Flügel-Paul

CONTACT

Dr. Thomas Flügel-Paul
Phone +49 3641 807-434
thomas.fluegel-paul@iof.fraunhofer.de



MIKROOPTISCHE ELEMENTE FÜR KOMPACTE QUANTENOPTISCHE SYSTEME MICROOPTICS ENABLES COMPACT QUANTUM OPTICS SETUPS

Zur Realisierung quantenoptischer Prinzipien wie Ghost-Imaging oder Quantenkryptografie werden optische Systeme mit effizienter Strahlformung, Strahlenlenkung und, aufgrund der geringen Anzahl an erzeugten Photonen, erhöhte Empfindlichkeit bei der Detektion benötigt. Mikrooptische Elemente leisten einen entscheidenden Beitrag beim Übergang von Experimenten zur industriellen Anwendung durch Miniaturisierung und deutliche Erhöhung des Integrationsgrads.

Lithographisch hergestellte Mikrooptiken profitieren von einer außerordentlich hohen lateralen Präzision und Profilqualität, die für effiziente Strahlformung und geringe Verluste zwingend sind. Direktschreibende Grautonlithographie ermöglicht die Fertigung vielfältigster Elemente wie Phasenplatten, CGHs, Strahlteiler, (a)sphärischer Linsen oder Freiformen mit kontinuierlichen Oberflächenprofilen. Die Schreibgeschwindigkeit der im Fraunhofer IOF entwickelten Lithographie-Anlage »HighFive« ermöglicht eine wirtschaftliche Herstellung im Wafermaßstab. Die Masterstrukturen können in die Oberfläche von Substraten übertragen oder durch Abformung in hochtransparente Polymere repliziert werden. Mikrooptiken in Polymer-auf-Glas Replikationstechnologie behalten die Präzision des Masteringprozesses bei und sind serientauglich.

The exploitation of quantum effects in photonics, like ghost imaging or quantum cryptography, requires optical set-ups with efficient beam shaping, light guiding, and increased detection sensitivity due to the low number of photons generated and used. Microoptical elements contribute to the move from experiments into industrial application, especially by reducing the size and substantially increasing the level of integration.

Lithographically realized microoptics benefit from excellent lateral and surface profile precision, which is mandatory for efficient beam shaping and thus low loss of photons. Direct-writing grayscale lithography is a versatile method to generate diffractive and refractive elements such as phase plates, CGHs, beam splitters, (a)spheric lenslets, or freeforms with continuous surface profiles. The writing speed of the photolithography tool "HighFive" developed at Fraunhofer IOF enables the economic mastering process of large-scaled arrays as a pre-requisite for wafer-level manufacturing. Depending on needs, the master structures are transferred into the substrate by reactive ion etching or molded into highly transparent polymer layers. Microoptical elements built from a polymer on glass replication maintain the lateral and surface profile precision of the mastering process. The replication process also facilitates series production.

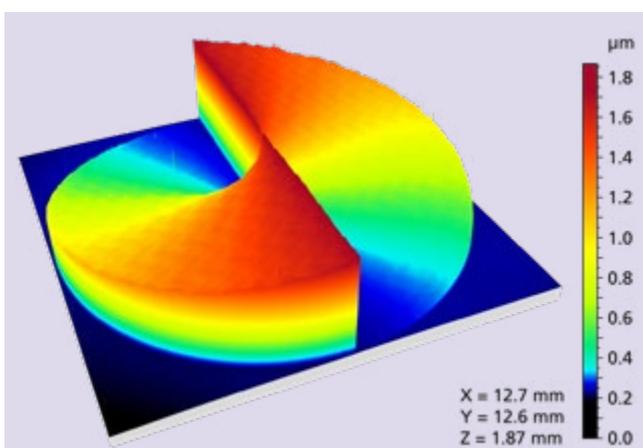
1 *Freiform-Mikrolinse zur Erhöhung der Empfindlichkeit von SPAD-basierten Sensoren. |*

Freeform lens to increase sensitivity of SPAD-based sensors.

So nutzen z. B. Mode-Sorter Baugruppen mehrere Phasenelemente, um einen komplexen Strahl in seine räumlichen Grundmoden zu zerlegen. Nach Durchgang durch solche Elemente unterscheiden sich die Strahlen hinsichtlich ihrer Eigenschaften wie Ausbreitungsrichtung oder Bahndrehimpuls, welche mit einer Quanteninformation belegt sind. In aktuellen Projekten werden hochaufgelöste Phasenplatten designt und hergestellt, die eine effiziente Strahlformung mit einer geringen Anzahl von Elementen ermöglicht. Um eine geringe Anzahl an Photonen detektieren zu können, werden häufig SPAD (single-photon avalanche diode) Arrays eingesetzt. Die aufwendige Signalverarbeitung im Chip führt zu einem sehr kleinen Pixelfüllfaktor, welcher durch die Verwendung von Mikrolinsen direkt auf den SPADs wirksam um eine Größenordnung erhöht werden kann. Innerhalb eines internen Forschungsprojekts wird die Prozesskette für Design, Mastering und selektive Abformung von Mikro-Freifform-Arrays entwickelt, die an die Pixelanordnung der SPADs und die abbildende Primäroptik angepasst sind. Die Umsetzung auf 200-mm-Wafern stellt die Wirtschaftlichkeit des Prozesses sicher.

As an example, multi-plane light converting (MPLC) phase plates are used in mode-sorting configurations for the decomposition of waves-packages into their spatial basis. The beams differ in their characteristics like a linear or orbital angular momentum that are bound to quantum information. In current projects, Fraunhofer IOF designs and generates low-loss highly resolving phase plates that enable an effective beam shaping within a short number of optical planes.

To detect a low photon count, SPAD (single-photon avalanche diode) arrays are used frequently. The complex post-processing circuits cause a low pixel filling factor in the focal plane array (FPA), which can be increased effectively by an order of magnitude through introducing microlenses directly on top of the SPAD areas. Within an internal research project, Fraunhofer IOF develops the process chain for freeform arrays that match the pixel layout of the FPA and the primary imaging optics. The wafer-level replication on 200 mm diameter substrates ensures the profitability of the process.



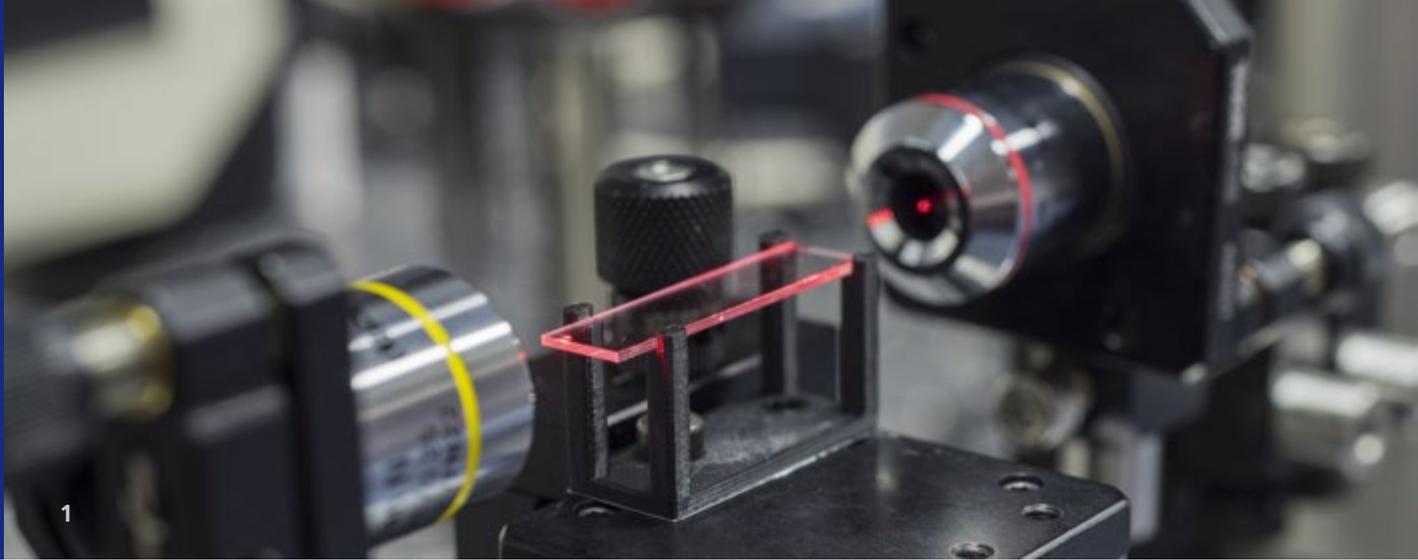
2 Vortex-Phasenplatte für die Erzeugung von Gauss-Laguerre-Moden. | Vortex phase plates to generate orbital angular momentum beams.

AUTHORS

Robert Leitel
Peter Dannberg

CONTACT

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



NANOGITTER ALS INTEGRIERT- OPTISCHE QUANTENGATTER NANOGRATING-BASED OPTICAL QUANTUM GATES ON A CHIP

Für optische Quantencomputer bieten integrierte optische Schaltkreise viele Vorteile gegenüber Freistrahl-Optiken: Sie sind kompakt, phasenstabil und robust. Zur Herstellung dieser Schaltkreise kann das Femtosekundenlaser-Direkt-schreiben verwendet werden. Bei diesem Verfahren wird eine Glasprobe durch den Fokus eines UltrakurzpulsLasers bewegt (Abb. 2). Durch die hohen Intensitäten im Fokus kommt es zu nichtlinearer Absorption, was lokale Modifizierungen des Materials ermöglicht. Niedrige Pulsenergien knapp über der Modifikationsschwelle führen dabei in Quarzglas zu einer lokalen Erhöhung des Brechungsindex. Aus diesem Modifikationstyp werden Wellenleiter hergestellt. Bei hohem Pulsüberlapp und höheren Pulsenergien entsteht der Modifikationstyp »Nanogitter«, der durch periodisch angeordnete nanoskopische Poren gekennzeichnet ist. Diese Subwellenlängen-Struktur führt zu einer hohen Doppelbrechung des Materials, so dass aus Nanogittern Verzögerungsplatten hergestellt werden können. Werden die Nanogitter in die Wellenleiter eingebettet, wirken sie dort lokal als integrierte Wellenplatten.

In Freistrahl-Experimenten werden Verzögerungsplatten als Einzelqubit-Quantengatter für polarisationscodierte

Integrated optical circuits show many benefits for optical quantum computing, including compactness and robustness to external perturbations. To fabricate these circuits, we use femtosecond laser direct writing, which is based on moving the focus of an ultrashort laser pulse through a transparent sample (Fig. 2). Due to the high intensities in the focal volume, nonlinear absorption processes can occur, allowing the material to be modified locally. When irradiating fused silica with a pulse energies just above the modification threshold, its refractive index increases. This modification allows the fabrication of waveguides. For larger pulse energies, the "nanogratings" modification type will develop in fused silica. Nanogratings consist of subwavelength pores, exhibiting form birefringence. By embedding nanogratings into waveguides, they can act as integrated waveplates.

In optical quantum computing, waveplates act as quantum gates for polarization-encoded single photons. To implement this in integrated optical circuits, the waveguides must be polarization-maintaining, which can be achieved in femtosecond laser writing by shaping the inscription laser beam [1]. Secondly, the birefringence properties of

1 *Charakterisierung von lasergeschriebenen Strukturen mittels kontinuierlichem Laserlicht. | Characterization of laser written waveguides using a probe laser beam to find optimal inscription parameters.*

2 *Ein Ultrakurzpuls Laser schreibt Wellenleiter in eine Quarzglasprobe. Das Positioniersystem bewegt die Probe durch den Laserfokus. | Ultrashort laser pulses inscribe waveguides into a fused silica sample. A positioning system moves the sample with respect to the laser focus.*



Photonen verwendet. Um dies auf laser-geschriebene Schaltkreise zu übertragen, müssen die Wellenleiter den Polarisationszustand der Photonen erhalten, was durch stark astigmatische Strahlformung des Einschreibelasers erreicht wird /1/. Weiterhin müssen die Orientierung und die Phasenverschiebung der Nanogitter-Doppelbrechung zur gewünschten Funktion passen. Diese Eigenschaften werden durch die Einschreibeparameter bestimmt. Die Polarisationsrichtung des Einschreibelasers bestimmt bei den Nanogittern die Ausrichtung ihrer optischen Achse. Mit der Pulsenergie lässt sich die von den Nanogittern hervorgerufene Phasenverschiebung steuern. Die Kontrolle, ob die fertig eingeschriebenen Strukturen die gewünschten Eigenschaften besitzen, erfolgt im ersten Schritt mit klassischem Laserlicht. Durch Stokes-Parameter-Analyse werden die Doppelbrechungseigenschaften der Strukturen bestimmt (Abb. 1). Um die Charakterisierung der Quantengatter zu vervollständigen, wurde ihre Funktionalität mit Quantenobjekten, sprich Einzelphotonen, getestet. Dies konnte in Kollaboration mit der Gruppe von Prof. Szameit an der Universität Rostock durchgeführt werden. Die Photonen wurden in die Strukturen eingekoppelt und ihr Polarisationszustand am Ausgang überprüft. Auf diese Weise wurden die Gatter Hadamard, Pauli-X, Pauli-Z und Pi-8tel in ihrer Funktion bestätigt /2/.

the embedded nanogratings have to match the desired functionality. This is controlled by the inscription parameters: the polarization of the inscription beam determines the orientation of the optical axis and the pulse energy changes the optical retardation induced by the nanogratings. To monitor the properties of the inscribed structures, a Stokes parameter analysis is performed with laser light (Fig. 1). The final characterization using single-photon sources was done in collaboration with Prof. Szameit from the University of Rostock. The functionality of Hadamard, Pauli-X, Pauli-Z, and Pi-8th was confirmed /2/.

References / Literatur

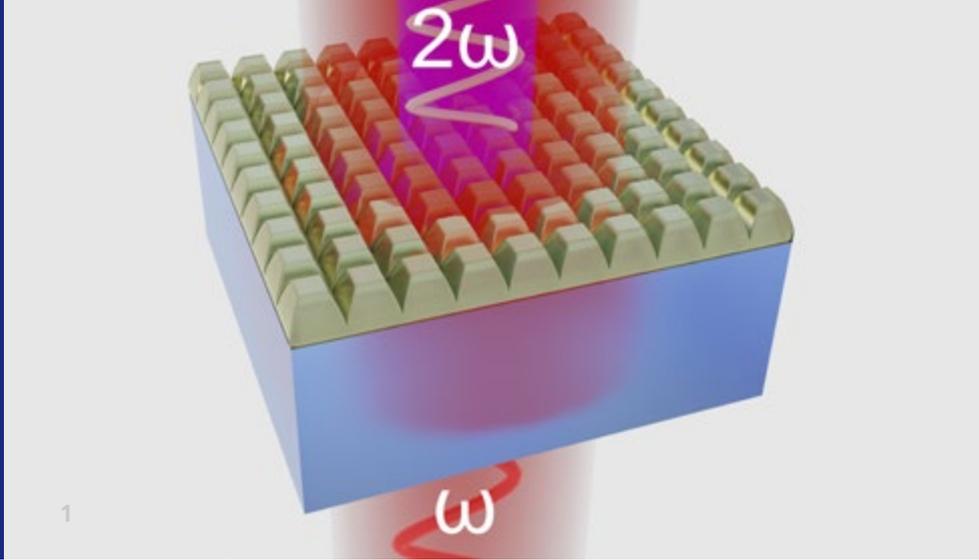
- /1/ K. Lammers et al.: Nanograting based birefringent retardation elements in integrated photonic circuits, Laser-based Micro-and Nanoprocessing XIV. Vol. 11268, International Society for Optics and Photonics (2020).
- /2/ K. Lammers et al.: Embedded nanograting-based waveplates for polarization control in integrated photonic circuits, Opt. Mater. Express 9.6, 2560 (2019).

AUTHORS

Kim Lammers
Alessandro Alberucci
Stefan Nolte

CONTACT

Kim Lammers
Phone +49 3641 9-47897
kim.lammers@uni-jena.de



NICHTLINEARE NANOPHOTONIK IN METAOBERFLÄCHEN AUS LITHIUMNIOBAT

NONLINEAR NANOPHOTONICS IN LITHIUM NIOBATE METASURFACES

Lithiumniobat ist ein weitverbreitetes optisches Material mit einzigartigen Eigenschaften /1/. Unter anderem weist es einen sehr breiten Transparenzbereich und eine sehr hohe Nichtlinearität 2. Ordnung auf. Diese Eigenschaften machen Lithiumniobat sehr geeignet für die nichtlinear-optische Frequenzkonversion, z. B. durch die Erzeugung der zweiten Harmonischen. Dabei wird einfallendes Licht bei der Fundamentallwellenlänge in Licht mit der halben Wellenlänge konvertiert. Die Nanostrukturierung dieses attraktiven Materials war bisher aber nur schwer möglich /2/. Es wäre aber von großem Vorteil, die Materialeigenschaften von Lithiumniobat mit der durch Nanostrukturierung möglichen Kontrolle der räumlichen und spektralen Eigenschaften des Lichts zu kombinieren und dadurch sowohl bereits etablierte Bauelemente wesentlich kleiner herstellen als auch nanoskopische optische Elemente mit neuartiger Funktionalität entwickeln zu können.

In den letzten Jahren konnten wir einen Prozess zur Herstellung von Nanostrukturen auf dünnen Filmen aus Lithiumniobat etablieren und haben diesen zur Herstellung von Lithiumniobat-Metaoberflächen genutzt, wie in Abbildung 1 dargestellt. Diese periodischen Arrays von Nanoresonatoren weisen eine hohe Qualität der einzelnen Nanostrukturen mit sehr kleiner Oberflächenrauigkeit auf. Die hergestellten Metaoberflächen sind resonant für Licht bei der Fundamentallwellenlänge, wobei durch die spezifische Resonatorgeometrie und die Kopplung der

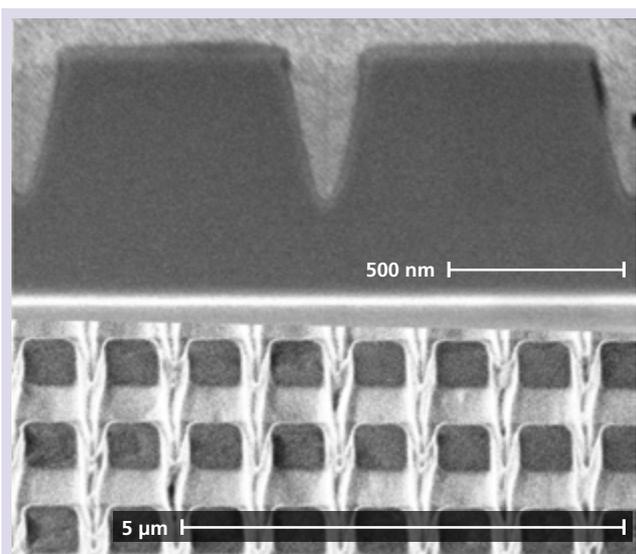
Lithium niobate is an established photonic material that possesses a unique combination of optical properties /1/. Its wide transparency range, spanning from the ultraviolet to the mid-infrared, and the high second-order nonlinearity make it a perfect medium for nonlinear frequency conversion processes such as second-harmonic generation, where two photons of the fundamental wavelength are converted into one photon at the second harmonic with half the wavelength. However, its nanostructuring remained a challenge until now /2/. On the other hand, making use of lithium niobate's exceptional properties in nanophotonics is highly beneficial, as it enables the miniaturization of established bulk optical devices and the realization of new functionalities by adding advanced control over the spatial and spectral properties of light.

We were able to establish a process for the realization of nanostructures from lithium niobate thin films and produced two-dimensional metasurfaces shown in figure 1. These periodic arrays of nanoresonators show high quality of the individual nanostructures and small side-wall roughness. Our metasurfaces are resonant for the fundamental wavelength, where, due to the specific geometry of each nanoresonator and the coupling between them, the electromagnetic field inside the lithium niobate nanoresonators is enhanced, providing a strong second-harmonic signal. Moreover, different resonance types support different configurations of the field inside a nanoresonator,

1 *Schematische Darstellung der Erzeugung der zweiten Harmonischen in einer Lithiumniobat-Metaoberfläche.* | *Schematic visualization of the second-harmonic generation from lithium niobate metasurfaces.*

Nanoresonatoren eine Feldverstärkung im Resonatormaterial erreicht wird. Dies ermöglicht eine Erhöhung der Konversionseffizienz der nichtlinearen Erzeugung der zweiten Harmonischen. Weiterhin ermöglichen unterschiedliche Resonanzen die Kontrolle der Polarisationsseigenschaften der erzeugten zweiten Harmonischen. Bestimmt durch die Form der Nichtlinearität in Lithiumniobat wird die zweite Harmonische senkrecht zur Metaoberfläche abgestrahlt, so dass sie effizient detektiert werden kann, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Neben der klassischen Frequenzkonversion können die realisierten Metaoberflächen zukünftig auch zur Erzeugung von quantisiertem Licht in Form von Photonenpaaren eingesetzt werden. Diese werden durch den spontanen Zerfall eines Photons in ein Paar innerhalb der nichtlinearen Metaoberfläche erzeugt. Nanostrukturen in Lithiumniobat sind damit eine flexibel einsetzbare Plattform für die Erzeugung und Kontrolle von klassischem und nichtklassischem Licht.



2 Rasterelektronenmikroskopbilder der hergestellten Metaoberfläche aus Lithiumniobat. | Scanning electron microscope images of a lithium niobate metasurface.

which leads to interesting polarization properties of the photons generated. Owing to the form of the nonlinear second-order susceptibility tensor of lithium niobate, a considerable amount of the generated second-harmonic is emitted in the direction normal to the sample plane as schematically shown in figure 2, which ensures its effective collection.

In addition to being efficient in classical nonlinear processes, these lithium niobate metasurfaces have the potential to serve as subwavelength sources of entangled photons generated by the quantum process of spontaneous parametric down-conversion when a single photon spontaneously decays into a pair of lower-energy photons. Thus, the fabricated lithium niobate metasurfaces are a versatile platform for classical and quantum nonlinear nanophotonics.

References / Literatur

- /1/ R. S. Weis et al.: Lithium niobate: summary of physical properties and crystal structure, Applied Physics A 37.4, 191-203 (1985).
- /2/ R. Geiss et al.: Photonic crystals in lithium niobate by combining focussed ion beam writing and ion-beam enhanced etching, physica status solidi (a) 211(10), 2421-2425 (2014).

AUTHORS

Anna Fedotova
Mohammadreza Younesi
Thomas Pertsch
Isabelle Staude
Frank Setzpfandt

CONTACT

Prof. Dr. Thomas Pertsch
Phone +49 3641 947-840
thomas.pertsch@iof.fraunhofer.de



PRÄZISIONSOPTISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME PRECISION OPTICAL COMPONENTS AND SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF entwickelt und fertigt optische Komponenten und Systeme basierend auf Metallwerkstoffen, Keramiken oder optischen Gläsern.

Je nach adressierter Wellenlänge werden unter Verwendung ultrapräziser Diamantbearbeitung sowie unterschiedlicher Formkorrektur- und Polierprozesse, wie dem Magnetorheologischen Finishing (MRF) oder dem Chemisch-Mechanischen Polieren (CMP), beugungsbegrenzte Optiken für Infrarot bis EUV gefertigt, integriert und charakterisiert.

Verwendung finden diese Optiken sowohl in Systemen für den Weltraum als auch in der terrestrischen Astronomie. Darüber hinaus kommen sie in der Industrie, der Halbleiterfertigung und der Laserbearbeitung zum Einsatz.

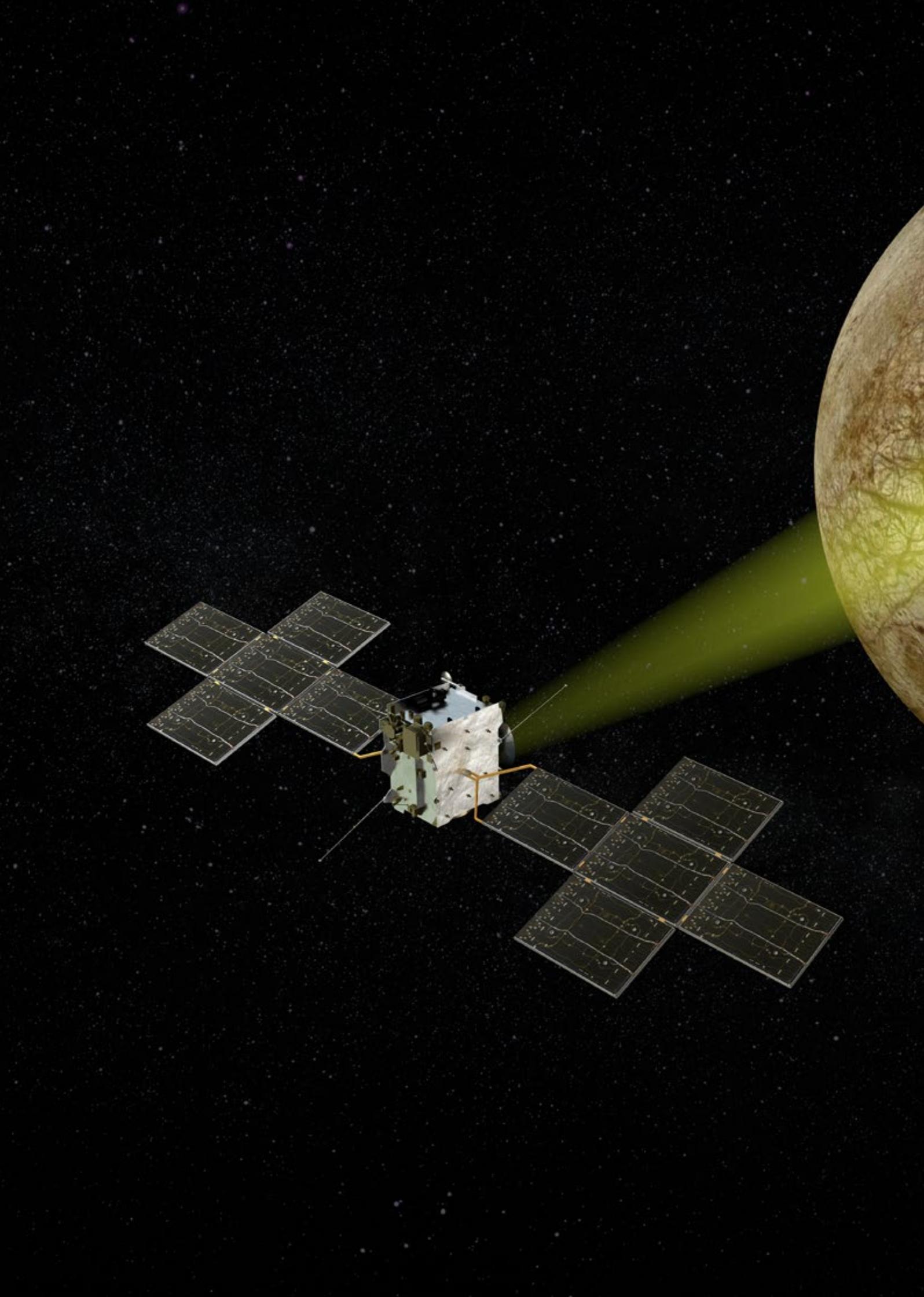
Die Bandbreite der in diesem Kompetenzfeld in 2020 bearbeiteten Projekte zeigen die nachfolgenden Beiträge. Die Themen reichen von der Entwicklung und Fertigung von Hochleistungsoptiken, metallisierter Keramik für reflektive Komponenten über die additive Fertigung gewichtsoptimierter Bauteile bis zur Entwicklung des Receiver Teleskope (TEL) des Ganymed-Laser-Altimeters (GALA) für die JUICE Mission zum Jupiter.

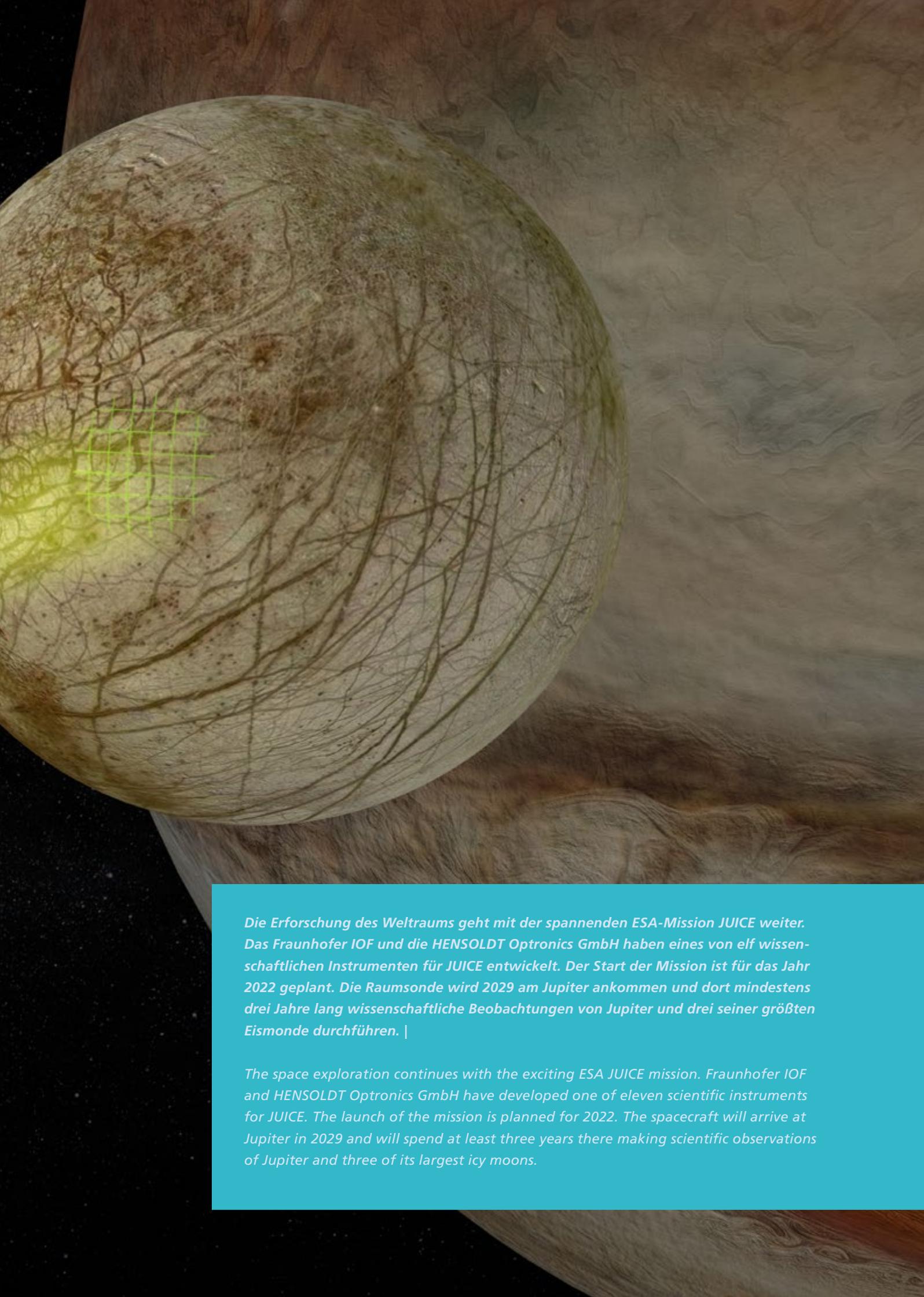
Fraunhofer IOF develops and manufactures optical components and systems based on metal materials, ceramics, or optical glasses.

Depending on the addressed wavelength, diffraction limited optics for infrared to EUV are fabricated, integrated, and characterized using ultra-precise diamond machining as well as different shape correction and polishing processes, such as Magnetorheological Finishing (MRF) or Chemical Mechanical Polishing (CMP).

These optics are used both in systems for space and in terrestrial astronomy. In addition, they are used in industry, semiconductor manufacturing, and laser processing.

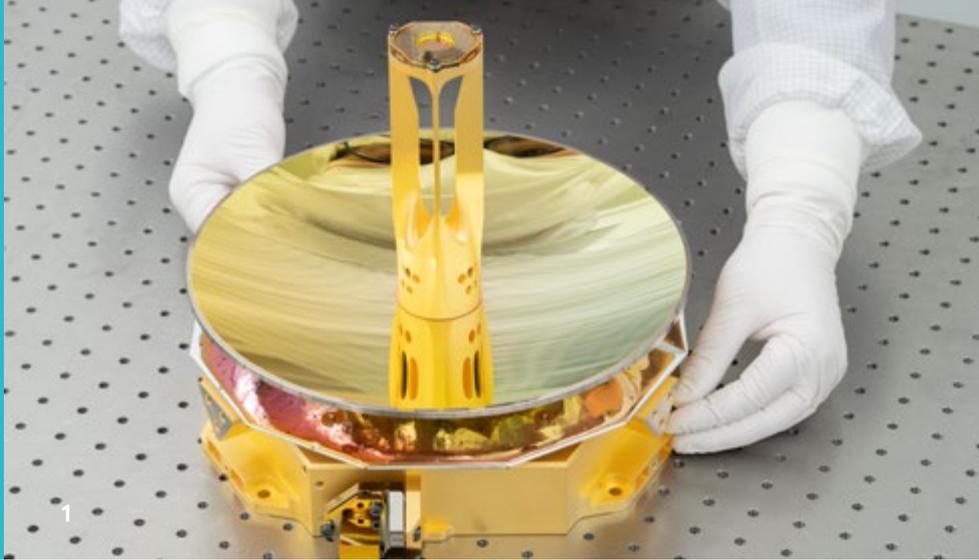
The range of projects worked on in this field of competence in 2020 is shown in the following contributions. Topics range from the development and fabrication of high-performance optics, metallized ceramics for reflective components, and additive manufacturing of weight-optimized components to the development of the Receiver Telescope (TEL) of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission to Jupiter.





Die Erforschung des Weltraums geht mit der spannenden ESA-Mission JUICE weiter. Das Fraunhofer IOF und die HENSOLDT Optronics GmbH haben eines von elf wissenschaftlichen Instrumenten für JUICE entwickelt. Der Start der Mission ist für das Jahr 2022 geplant. Die Raumsonde wird 2029 am Jupiter ankommen und dort mindestens drei Jahre lang wissenschaftliche Beobachtungen von Jupiter und drei seiner größten Eismonde durchführen. |

The space exploration continues with the exciting ESA JUICE mission. Fraunhofer IOF and HENSOLDT Optronics GmbH have developed one of eleven scientific instruments for JUICE. The launch of the mission is planned for 2022. The spacecraft will arrive at Jupiter in 2029 and will spend at least three years there making scientific observations of Jupiter and three of its largest icy moons.



1

ENTWICKLUNG DES TELESKOPS DES GANYMEDE LASER ALTIMETERS (GALA) DEVELOPMENT OF THE TELESCOPE OF THE GANYMEDE LASER ALTIMETER (GALA)

Das GALA (Ganymede Laser Altimeter) ist eins von elf wissenschaftlichen Instrumenten der ESA-Mission JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer) mit dem Ziel die Eis-Monde des Jupiters zu erkunden. Ein besonderes Interesse besteht dabei am Eis-Mond Ganymed, welcher mit seiner Atmosphäre, Magnetfeld und Wasservorkommen der Erde ähnelt /1, 2/.

GALA ist ein Laser-Altimeter, das auf Basis eines emittierten und an der 500 km entfernten Mondoberfläche reflektierten Laserimpulses ein Oberflächenprofil mit einer Auflösung von < 15 cm erstellt /2/.

Das Gesamtsystem wird vom DLR-Institut für Planetenforschung verantwortet, welches HENSOLDT mit der Entwicklung der Transmitter und Transceiver-Unit sowie die Beschaffung des Receiver-Teleskops und dessen Integration in die Transceiver-Unit beauftragte. Das Fraunhofer IOF war als Unterauftragnehmer seit 2016 sehr erfolgreich mit der Entwicklung und Fertigung des Empfangsteleskops engagiert.

Die Mechanikentwicklung des RC-Teleskops mit einem extrem dünnwandigem Primärspiegel (Dicke 4 – 8 mm; Durchmesser ~ 300 mm) war getrieben von Randbedingungen wie geringem Bauraum und Massebudget sowie gleichzeitig hohen mechanischen Belastungen wie einer

The GALA (Ganymede Laser Altimeter) is one of eleven scientific instruments of the ESA mission JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer) designed to explore the icy moons of Jupiter, with a special interest in the ice moon Ganymede, which is with its atmosphere, magnetic field, and water resources similar to Earth /1, 2/.

GALA is a laser altimeter that generates a surface profile with a resolution of < 15 cm based on an emitted laser pulse that is reflected on the surface of the moon 500 km away /2/.

The overall system is the responsibility of the DLR Institute of Planetary Research, which commissioned HENSOLDT with the development of the transmitter and transceiver unit as well as the procurement of the receiver telescope and its integration into the transceiver unit. At the beginning of 2016, Fraunhofer IOF was entrusted with the development and manufacture of the receiving telescope on behalf of HENSOLDT.

The mechanical development of the RC telescope with an extremely thin-walled primary mirror (thickness 4 - 8 mm; diameter ~ 300 mm) was driven by tough boundary conditions, such as small envelope and mass budget, and at the same time high by mechanical loads, such as an acceleration of 120 g during rocket launch and temperature gradients from up to 100 K.

1 GALA Receiver-Teleskop. | GALA Receiver-Telescope.

Beschleunigung von 120 g beim Raketenstart und Temperaturgradienten von bis zu 100 K.

Die hohe Strahlungsbelastung von 10^{12} Protonen / cm^2 @ 10 MeV stellte eine weitere Herausforderung dar, weswegen ein goldbasiertes HR-Coating auf Basis von Nanolaminat mit $R > 98\%$ @ 1064 nm mit hoher Widerstandsfähigkeit entwickelt und qualifiziert wurde. Somit konnten nahezu alle Prozessschritte von der Konstruktion, über die Fertigung bis hin zur Integration und Charakterisierung am Fraunhofer IOF durchgeführt werden.

Mit einem WFE (Wavefront Error, Wellenfrontfehler) von 26 nm RMS des Primärspiegels und 8 nm RMS des Sekundärspiegels konnte eine Systemperformance von 90 % Encircled Energy bei einem Pupillen-Radius von 38 μm erreicht werden. Das Teleskop wurde im Frühjahr 2020 an HENSOLDT übergeben und wird 2022 auf die achtjährige Reise zum Jupiter starten.

Danksagung

Das GALA-Projekt wurde vom DLR Raumfahrtmanagement mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50 QJ 1401 gefördert.

Literatur / References

/1/ESA.

/2/K. Lingenauber, H. Hussmann, H. Michaelis, J. Oberst, M. Kobayashi, N. Namiki, N. Thomas, K. Seiferlin, L. M. Lara & the GALA team: The Ganymede Laser Altimeter (GALA) on ESA's JUICE mission: Overview of the instrument design, International Workshop on Instrumentation for Planetary Missions (2014).

The high radiation load of 10^{12} protons / cm^2 @ 10 MeV presented a further challenge. Fraunhofer IOF developed and qualified a Gold HR coating based on nanolaminate with $R > 98\%$ @ 1064 nm, and with high resistance. Therefore, almost all process steps from development to manufacturing to integration and characterization could be performed at Fraunhofer IOF. With a wavefront error (WFE) of 26 nm RMS of the primary mirror and 8 nm RMS of the secondary mirror, a system performance of 90 % encircled energy with a pupil radius of 38 μm could be achieved. The telescope was handed to HENSOLDT in spring 2020 and will start its eight-year journey to Jupiter in 2022.

Acknowledgment

Financial support for GALA was provided under grant 50 QJ 1401 on behalf of the DLR Space Administration by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

AUTHORS

Henrik von Lukowicz

Stefan Risse

Sandra Müller

Mathias Rohde

Kai Weidlich¹

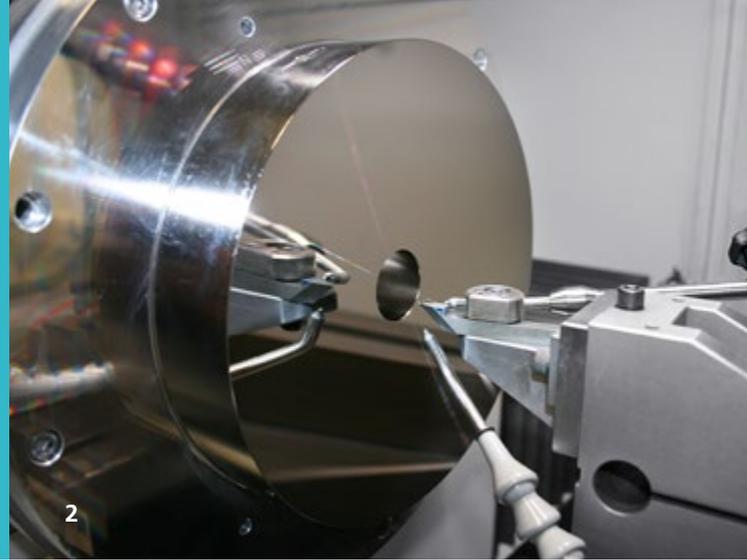
¹HENSOLDT Optronics GmbH

CONTACT

Dr. Stefan Risse

Phone: +49 3641 807-313

stefan.risse@iof.fraunhofer.de



ADDITIVE FERTIGUNG VON HOCHLEISTUNGSOPTIKEN

ADDITIVE MANUFACTURING OF HIGH-PERFORMANCE OPTICS

Hochleistungsoptiken müssen neben den hohen Anforderungen an die optische Funktionalität auch verschiedensten mechanischen und thermischen Randbedingungen genügen. Durch die Nutzung des Selektiven Laserschmelzens können neuartige und optimierte Designs für metallische Spiegelkörper entwickelt und additiv gefertigt werden. Die erfolgreiche Einbindung der Grundkörper in die Prozesskette zur Herstellung von Hochleistungsoptiken aus einem Aluminium-Silizium Werkstoff (AlSi40) wurde an Hand von drei Demonstratoren erfolgreich nachgewiesen.

Durch interne, wabenförmige Leichtgewichtsstrukturen konnte ein Spiegelgrundkörper für Weltraumanwendungen mit einem Gewicht kleiner 35 g gefertigt werden (Abb. 1) der zum vergleichbaren Vollmodell eine Gewichtsreduzierung von 57 % aufweist. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass nach der Weiterbearbeitung durch ultrapräzises Diamantdrehen in einer aufgetragenen Nickel-Phosphor Schicht und durch anschließende Korrekturverfahren (MRF-Politur) eine Rauheit kleiner 2 nm RMS (50x WLI) und eine Formabweichung im Prüfbereich (\varnothing 14 mm) kleiner 30 nm PV erreicht werden kann.

High-performance optics must fulfill high optical requirements as well as different mechanical and thermal specifications. By using the benefits of the selective laser melting process, novel and optimized designs for metal mirror base bodies can be designed and additively fabricated. The successful implementation of the base bodies into the process chain for the manufacturing of high-performance metal optics made from an Aluminum-Silicon material (AlSi40) is demonstrated on three different demonstrators.

Using an internal, honeycomb-like structure, a mirror base body for space applications weighs less than 35 g (Fig. 1), realizing a weight reduction of 57 % compared to a solid model. After coating the mirror with an electroless nickel polishing layer, an ultra-precise diamond turning step, and a final shape correction (MRF polishing) of the optical surface, the optical performance was achieved with a roughness below 2 nm RMS (50x WLI) and a shape deviation within the specified area (\varnothing 14 mm) below 30 nm PV.

For an application in the area of EUV lithography, the second optic must be optimized for high power usage by integrating a highly efficient cooling structure (Fig. 2).

1 **Leichtgewichteter Spiegel für Weltraumanwendungen nach UP-Bearbeitung.** |

Light-weighted mirror for space applications after UP machining.

2 **EUUV-Spiegel mit interner Kühlstruktur auf UP Maschine.** |

EUUV-mirror with integrated cooling structure on UP machine.

3 **Bionischer Scanspiegel auf Poliermaschine.** | *Bionic scanning mirror on polishing machine.*

Für eine Anwendung im Bereich der EUV-Lithographie muss die zweite Optik für hohe Leistungen ausgelegt werden und ist deshalb mit hocheffizienten, integrierten Kühlstrukturen ausgestattet (Abb. 2). Es wurde nachgewiesen, dass komplexe interne Kanäle additiv hergestellt und genutzt werden können. Auch die Anforderungen an die optische Performance sind in der EUV-Lithographie sehr hoch. Durch spezielle Poliertechniken wurde final eine Rauheit von kleiner 0,3 nm RMS (AFM 10 x 10 µm²) erzielt. Somit konnte ein mehrlagiges Beschichtungssystem aufgebracht werden, das bei einer Wellenlänge von 13,5 nm eine Reflektivität von mehr als 67,4 % ermöglicht.

Die Topologie-Optimierung des Designs eines hochdynamischen Scanspiegel für Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung erzeugt eine bionische Rückseitenstruktur und führt zu einer Optikfläche mit einer Wandstärke von nur 700 µm (Abb. 3). Das Design mit minimierter Massenträgheit wurde additiv gefertigt und die Nachbearbeitungsschritte der Prozesskette konnten genutzt werden. Der finale Spiegel erfüllt durch eine Formabweichung von kleiner 150 nm PV die optische Funktion und das innovative Design erreicht im Vergleich zu einem traditionellen Scanspiegel aus Quarzglas eine um Faktor 2 verbesserte Dynamik.

It has been proven that complex internal channels can be made additively and used for this application. For EUV lithography, the extreme optical requirements could be realized by a special polishing technique to obtain a roughness of below 0,3 nm RMS (AFM 10 x 10 µm²). Thus, a multilayer coating could be deposited, achieving a reflectivity of above 67.4 % at 13.5 nm wavelength.

Topology optimization of a design for a high dynamic scanning mirror for laser material processing applications resulted in a bionic backside structure and led to an optical surface with a wall thickness of only 700 µm (Fig. 3). The design comprises a minimized moment of inertia and was realized by additive manufacturing and the successive process chain. Optical requirements are fulfilled by realizing a shape deviation of below 150 nm PV. The innovative design improves the dynamic characteristic compared to a conventional used fused silica scanning mirror by a factor of 2.

Acknowledgment / Danksagung

The research project "AM-OPTICS" is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the Program "Innovations for Tomorrow's Production, Services, and Work" (02P15B204) and managed by the Project Management Agency Karlsruhe (PTKA).

AUTHORS

Nils Heidler

Enrico Hilpert

CONTACT

Dr. Nils Heidler

Phone: +49 3641 807-379

nils.heidler@iof.fraunhofer.de



3D-DRUCK HOCH-STEIFER LEGIERUNGEN MITTELS ULTRAKURZER LASERPULSE 3D PRINTING OF HIGH STIFFNESS ALLOYS USING ULTRASHORT LASER PULSES

Die additive Fertigung von Aluminium-Basislegierungen ermöglicht die Entwicklung neuartiger Leichtgewichtsstrukturen in Kombination mit einer Anpassung der Materialeigenschaften. Für diverse Anwendungsbereiche in der Optik sowie Luft- und Raumfahrt sind gewichtsreduzierte Bauteile mit hoher Formgenauigkeit und Stabilität von besonderem Interesse. Die erforderliche hohe spezifische Steifigkeit, die das Verhältnis aus Elastizitätsmodul und Dichte beschreibt, lässt sich u. a. durch Beimischung hoher Konzentrationen an Silizium (Si) oder Lithium (Li) erhöhen. Zudem kann bei Aluminium-Silizium-Legierungen (AlSi) auch die Zugfestigkeit gesteigert und der Wärmeausdehnungskoeffizient verringert werden. Li ist mit einer Dichte von $0,53 \text{ g/cm}^3$ das leichteste Metall und ermöglicht eine effiziente Erhöhung der spezifischen Steifigkeit. Das Laser-induzierte Pulverbett-schmelzen ermöglicht durch das selektive Schmelzen eine rasche Erstarrung mit Abkühlraten von mehr als 10^4 K/s , was zu einer signifikanten Verfeinerung der Gefügebestandteile und erhöhter Löslichkeit der Legierungselemente führt. Die Schmelzpoolgröße und Wärmeeinflusszone bei herkömmlich eingesetzten Dauerstrich-Lasersysteme liegen im Bereich von mehreren $100 \mu\text{m}$, wodurch die Präzision und die Abkühlgeschwindigkeiten verringert werden.

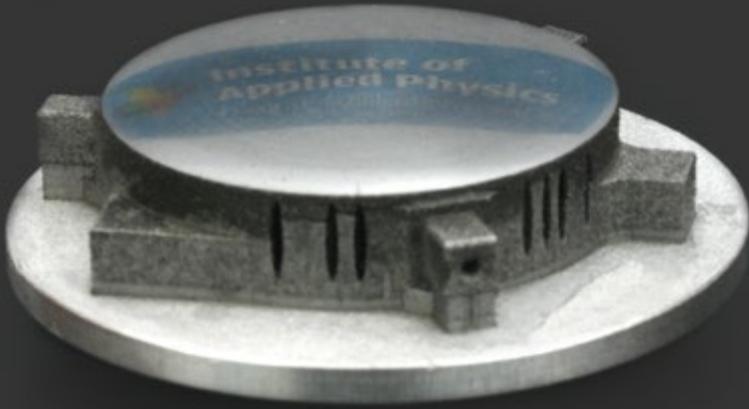
In den letzten Jahren wurden erstmals ultrakurze Laserpulse zum Verschmelzen des Pulvermaterials eingesetzt /1, 2/.

Additive manufacturing of aluminum-based alloys allows the realization of innovative lightweight structures in combination with adapted material properties. Weight-reduced components with high dimensional accuracy and stability under mechanical and thermal load are of particular interest for various applications in optics and aerospace. The required high specific stiffness can be increased significantly by adding high concentrations of silicon (Si) or lithium (Li) to the alloy. Moreover, the tensile strength of aluminium-silicon (Al-Si) alloys can also be increased, and the coefficient of thermal expansion reduced. Li is the lightest metal with a density of 0.53 g/cm^3 and increases the specific stiffness in an Al alloy significantly. During laser powder bed fusion, rapid solidification with cooling rates of more than 10^4 K/s appears, which yields a significant refinement of the microstructure. The melt pool size and heat-affected zone using conventional continuous wave (CW) lasers are in the range of several $100 \mu\text{m}$, which limits the geometric precision and achievable cooling rates.

Recently, ultrashort laser pulses were used for the first time to fuse powder-based material /1, 2/. Here, the light-matter interaction is typically in the range of a few ps to fs, whereby pulse peak power in the MW range is achieved. By adjusting the pulse energy, repetition rate, and scanning velocity, the accumulated heat can be controlled directly, yielding structure widths down to $50 \mu\text{m}$.

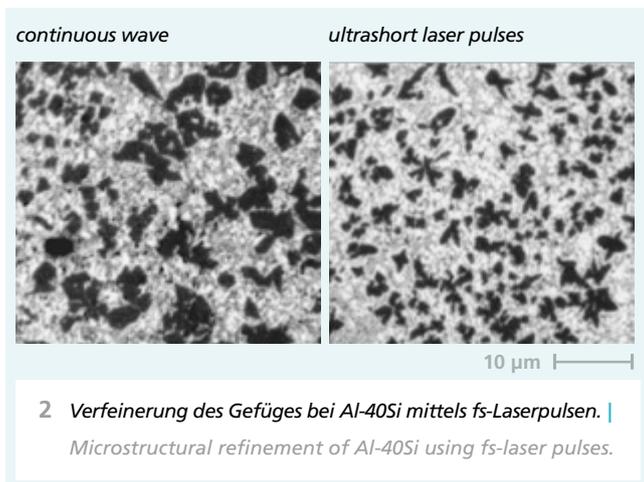
1 Komplexe leichtgewichtige Demonstratoren aus Al-40Si (links und Mitte) und Al-70Si (rechts). |

Complex light-weight demonstrators made of Al-40Si (left and middle) and Al-70Si (right).



Hierbei liegen die Licht-Materie-Wechselwirkungszeiten typischerweise im Bereich von wenigen ps bis fs, wodurch Pulsspitzenleistungen im MW-Bereich erzielt werden. Durch die Anpassung der Pulsenergie, Pulsfrequenz und Vorschubgeschwindigkeit kann die induzierte Wärme kontrolliert akkumuliert und minimale Schmelzbreiten von bis zu 50 μm realisiert werden.

Im Vergleich zu CW-Strahlung bei gleicher Leistung liefert das Pulverbettsschmelzen mit fs-Laserpulsen eine deutliche Verfeinerung der Primärsiliziumphase und des Eutektikums (Abb. 2) /3/, was u. a. zu einer Steigerung des Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit führt. Des Weiteren wurde erstmals binäres Al-4Li Pulver – in Kooperation mit der Gruppe von Prof. Rettenmayr des Otto-Schott-Instituts für Materialforschung in Jena – hergestellt und verarbeitet. Der Anteil der spröden δ -AlLi Phase konnte erheblich reduziert werden /4/, wodurch die Basis für hochsteife, feste Bauteile aus Al-Li Legierungen geschaffen wurde, deren Gefügeeigenschaften mit Hilfe konventioneller Gießverfahren nicht erreicht werden können.



In comparison with CW-irradiation, powder bed fusion with fs-laser pulses provides a refinement of the primary silicon phase and the eutecticum (Fig. 2) /3/, which leads to an increase of Young's modulus and tensile strength. Furthermore, binary Al-4Li powder was produced for the first time in collaboration with the group of Prof. Rettenmayr at the Otto Schott Institute of Materials Research and the brittle δ -AlLi phase was reduced considerably by fs-laser powder bed fusion /4/. This provides the basis for highly rigid solid components made of Al-Li alloys, where the structural properties are improved in comparison to conventional casting processes.

References / Literatur

- /1/ T. Ullsperger et al.: Selective laser melting of hypereutectic Al-Si40-powder using ultra-short laser pulses, Appl. Phys. A 123, 798 (2017).
- /2/ T. Ullsperger et al.: Optimization of mechanical properties and as-built quality of additive manufactured Al-Si alloys using ultra-short laser pulses, Lasers in Manufacturing (2019).
- /3/ T. Ullsperger et al.: Ultrashort pulsed laser powder bed fusion of Al-Si alloys: Impact of the pulse duration and energy in comparison to continuous-wave excitation, submitted in Additive Manufacturing (2020).
- /4/ B. Yürekli et al.: Additive manufacturing of binary Al-Li alloys. Procedia CIRP 94, 69-73 (2020).

AUTHORS

Tobias Ullsperger
 Burak Yürekli
 Lisa Schade
 Gabor Matthäus
 Stefan Nolte

CONTACT

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



METALLISIERTE KERAMIK FÜR REFLEKTIVE KOMPONENTEN

METALLIZED CERAMICS FOR REFLECTIVE COMPONENTS

Hochreflektierende Komponenten werden für optische Anwendungen im Weltraum eingesetzt, z. B. in Teleskopen oder Spektrometern. Diese Optiken werden großen mechanischen sowie thermischen Belastungen bei variabler Einsatztemperatur ausgesetzt. Für solche optischen Komponenten werden Gläser, Siliziumcarbid-basierte Werkstoffe und Aluminium- bzw. Beryllium-Legierungen verwendet. Durch den Einsatz keramischer Werkstoffe als Substratmaterial, welche insbesondere eine hohe spezifische Steifigkeit aufweisen, können mechanisch stabilere und steifere Optiken für Weltraumanwendungen erzielt werden. Metallische Substratwerkstoffe können durch ultrapräzises (UP-) Drehen bzw. Fräsen fertigungstechnisch variabler realisiert werden. Um Anforderungen niedriger Rauheiten und Formabweichungen im Nanometerbereich zu erreichen, werden metallische Substrate typischerweise mit einer polierfähigen Funktionsschicht, speziell einer röntgenamorphen Nickel-Phosphor-Legierung (NiP), beschichtet. Ein hybrider Werkstoffverbund bestehend aus einem SiC-basierten Werkstoff – HB-Cesic® – mit einer NiP-Beschichtung ermöglicht die Kombination beider Vorteile der Werkstoffgruppen. Grundlage dieses hybriden Werkstoffverbunds für optische Komponenten ist eine hohe Haftfestigkeit der NiP-Schicht auf dem keramischen Substrat. Dabei ist das Verständnis der entstehenden Grenzfläche und der chemischen und mechanischen Haftungsmechanismen essenziell.

Um die mechanischen Haftungsbeiträge zu erhöhen, werden die Substrate aus HB-Cesic® nasschemisch geätzt. Anschließend wird zur chemischen Aktivierung der Oberfläche

Highly reflective components are used for optical space applications, e.g., for telescopes or spectrometers. These optics are exposed to large mechanical and thermal stresses within variable operational temperatures. For such optical components glasses, silicon carbide based materials and aluminum or beryllium alloys are typically used. By using SiC based materials as substrate material, which have a high specific stiffness, it is possible to realize mechanically and thermally more stable optics for space applications. Metallic substrate materials can be manufactured more variably in terms of production technology by ultra-precise (UP) turning or milling. To achieve the requirements of low roughness and shape deviations in the nanometer range, metallic substrates are coated typically with a polishable functional layer, an X-ray amorphous nickel-phosphorus alloy (NiP).

A hybrid material composite consisting of a ceramic SiC material - HB-Cesic® - with a NiP coating enables the combination of both advantages of the material groups. The basis of this hybrid material compound for optical components is the high adhesive strength of the NiP layer on the ceramic substrate. Understanding the interface and the chemical and mechanical adhesion mechanisms is essential.

To increase mechanical adhesion, the HB-Cesic® substrates are etched wet-chemically. For chemical activation of the

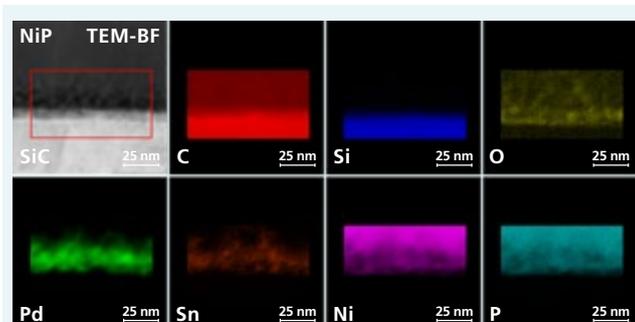
1 *HB-Cesic® Proben mit NiP beschichtet, (links) partiell beschichtet, (rechts) ultrapräzise gedreht. | HB-Cesic® samples plated with electroless NiP, (left) partial plated, (right) ultra-precise turned.*

eine für den nasschemischen Abscheidungsprozess notwendige autokatalytisch wirksame Oberfläche generiert. Dies wird durch nasschemisch abgeschiedene Palladiumpartikel erreicht. Der durch die chemischen Vorbehandlungen entstehende Schichtaufbau wurde mit den hochauflösenden Analyseverfahren Scanning Transmissionselektronenmikroskopie (STEM) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) quantifiziert. An der Grenzfläche konnten einzelne Palladiumpartikel nachgewiesen werden (Abb. 1). Der Schichtaufbau besteht aus einem sauerstoffreichen Bereich sowie Zinn- und autokatalytisch wirksamen Palladiumpartikeln.

Für ultrapräzise optische Komponenten wird ein keramisches Substrat aus HB-Cesic® verwendet, welches endkonturnah durch typische Herstellungsverfahren in Zusammenarbeit mit ECM Engineered Ceramic Materials GmbH gefertigt wurde. Das keramische Substrat wird anschließend allseitig mit einer röntgenamorphen, polierfähigen NiP-Schicht nasschemisch beschichtet und weitere für metallische Substrate typische Prozessschritte werden durchgeführt, wie UP-Drehen/-Fräsen, MRF-Formkorrektur und andere Politurtechnologien. Diese Fertigungskette ermöglicht die Realisierung ultrapräziser Freiformoptiken für optische Systeme mit mechanischen Eigenschaften keramischer Substrate.

surface, an autocatalytically active surface required for the wet-chemical deposition process is generated subsequently. This is achieved by wet-chemically deposited Pd particles. The layer structure resulting from the chemical pretreatment was quantified by scanning transmission electron microscopy (STEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Individual Pd particles could be detected at the interface (Fig. 1). The layer structure is composed of an oxygen-rich layer as well as tin- and autocatalytic Pd particles.

A ceramic substrate HB-Cesic® is used for ultra-precise optical components, which has been manufactured near-net-shape by typical manufacturing processes in cooperation with ECM Engineered ceramic Materials GmbH. Subsequently, the ceramic substrate is electroless plated with an X-ray amorphous NiP alloy. In addition, further process steps typical for metallic substrates such as UP-turning/-milling, MRF-shape correction, and other polishing technologies are performed. This production chain enables the manufacturing of ultra-precise freeform optics for optical systems with the mechanical properties of ceramic substrates.



2 STEM-EDX-Mapping des Schichtaufbaus HB-Cesic® mit Ni-P-Schicht im Querschliff. | STEM-EDX-Mapping of the layer structure HB-Cesic® with NiP coating in cross-section.

AUTHORS

Tatjana Porwol

Jan Kinast

Andreas Undisz¹

¹Friedrich-Schiller-Universität Jena,

Otto-Schott-Institut für Materialforschung

CONTACT

Dr. Jan Kinast

Phone: +49 3641 807-364

jan.kinast@iof.fraunhofer.de



FUNKTIONELLE OBERFLÄCHEN UND SCHICHTEN FUNCTIONAL SURFACES AND COATINGS

Funktionale Beschichtungen und Oberflächen sind wesentliche Bestandteile optischer Systeme. Umfangreiche Kompetenzen im Fraunhofer IOF bestehen im Design optischer Schichtsysteme, in der Entwicklung von Beschichtungsverfahren für unterschiedliche Anwendungen und in der Charakterisierung von Oberflächen und Schichten. Hervorzuheben sind Beschichtungen für Weltraumanwendungen und Quantenkommunikation, hochreflektierende Schichtsysteme für Optiken im EUV- und im Röntgenbereich, extrem breitbandige Schichtsysteme auch auf stark gekrümmten Flächen sowie die Funktionalisierung von Kunststoffoberflächen. Eingesetzt werden verschiedenste Technologien: von Sputterverfahren über ALD (Atomic Layer Deposition) bis hin zu nanostrukturierten Oberflächen. Das Fraunhofer IOF ist dank seiner einzigartigen Ausstattung in der Lage, extreme Anforderungen in Bezug auf Substrate, Gradienten, spektrale Eigenschaften und Umweltbedingungen zu erfüllen.

Ebenso bestehen starke Kompetenzen in der Entwicklung und Anwendung von Streulichtmesstechniken zur Charakterisierung von Optiken und Oberflächen.

Die in 2020 in diesem Kompetenzfeld laufenden und abgeschlossenen Projekte zeigen in den nachfolgenden Beiträgen eine große Bandbreite: Abbildungsdegradation durch Streulicht von Kontaminationen, konforme Beschichtungen für hocheffiziente Spektrometergitter, Entspiegelungen von Polycarbonat für LIDAR-Anwendungen und multispektrale Reflektoren für Synchrotronoptiken.

Functional coatings and surfaces are essential components of optical systems. Fraunhofer IOF has extensive expertise in the design of optical layer systems, in the development of coating processes for different applications, and the characterization of surfaces and layers. Particularly noteworthy are coatings for space applications and quantum communication, highly reflective coating systems for optics in the EUV and X-ray range, extremely broadband coating systems even on strongly curved surfaces, and the functionalization of plastic surfaces. Various technologies are used, from sputtering processes to ALD (atomic layer deposition) and nanostructured surfaces. Thanks to its unique capabilities, Fraunhofer IOF can meet extreme requirements in terms of substrates, gradients, spectral properties, and environmental conditions.

The development of functional surfaces and coatings is complemented by strong competencies in the development and application of scattered light measurement techniques for the characterization of high end (high performance) optics.

The projects in this competence field show a wide range in the following articles: image degradation by scattered light from contaminations, conformal coatings for highly efficient spectrometer gratings, antireflection coatings of polycarbonate for LIDAR applications, and multispectral reflectors for synchrotron optics.

LEFT *Beschichtung von Dömen für LIDAR-Anwendungen.* |
Coating of domes for LIDAR applications.



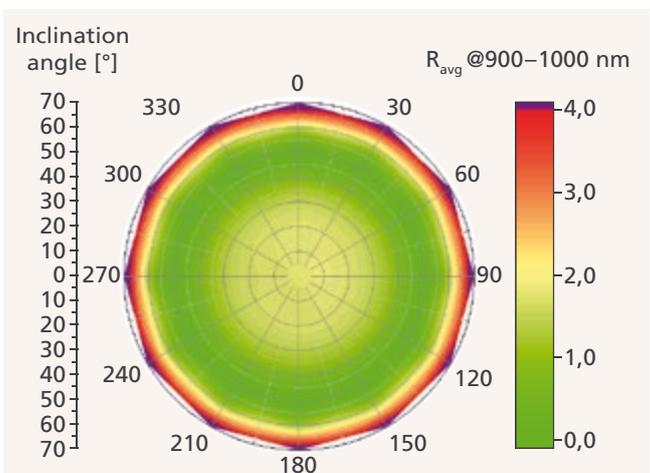
ENTSPIEGELUNG VON POLYCARBONAT FÜR LIDAR-ANWENDUNGEN

ANTIREFLECTION OF POLYCARBONATE FOR LIDAR APPLICATIONS

Im Zeitalter des autonomen Fahrens benötigen Fahrzeuge vielfältige optische Systeme zur Distanzkontrolle und Überwachung, darunter miniaturisierte Kameras und LIDAR-Systeme. Transparentes Polycarbonat (PC) kommt dabei in vielfältiger Weise u. a. für optische Linsen, Displays und schützende Abdeckungen zum Einsatz. Dabei wird meist eine hohe Transmission gefordert, die nur durch Antireflex (AR)-Funktionalisierung zu gewährleisten ist. Im Rahmen eines von der AiF geförderten Projektes untersucht und vergleicht das Fraunhofer IOF Polycarbonate und alternative transparente Polymere bezüglich ihrer für die AR-Beschichtung relevanten Oberflächeneigenschaften. Dabei werden verschiedene Parameterkombinationen evaluiert, um mehrschichtige AR-Systeme mittels Plasma-ionengestütztem Aufdampfen (PIAD) mit hoher Haftfestigkeit an die Oberflächen anzubinden. Die Parameter sind in der Regel für jeden Polymertyp spezifisch zu optimieren. So dürfen typische Polycarbonate nur unter sehr milden Plasmabedingungen beschichtet werden, um spätere Defektbildungen auszuschließen. Eine ausgezeichnete Schichthaftung wurde bereits auch auf alternativen hochbrechenden Polymeren wie OKP-1 und EP6000 erreicht.

Wenn für eine LIDAR-Anwendung ein kuppelförmiges Bauteil zu entspiegeln ist, muss das AR-Design für PIAD-Schichtabscheidung sehr breitbandig ausgelegt werden. Abbildung 2 zeigt die Reflexion an einem solchen Bauelement aus PC.

In the age of autonomous driving, vehicles need a variety of optical systems for distance control and monitoring, including miniaturized cameras and LIDAR systems. Transparent polycarbonate (PC) is used, i.e., for optical lenses, displays, and protective covers. In most cases, high transmittance is required, which can only be guaranteed by anti-reflective (AR) functionalization. In a project funded by the AiF, Fraunhofer IOF investigates and compares polycarbonates and alternative transparent polymers with respect to their surface properties relevant for AR coating deposition. Different combinations of parameters were evaluated to bond multilayer AR systems to



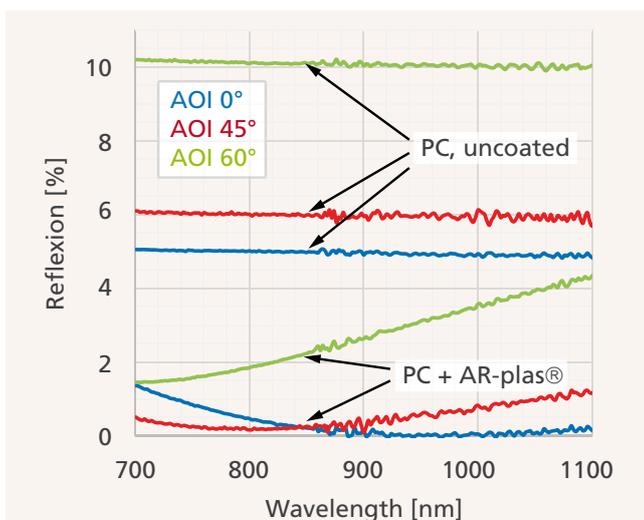
2 Reflexionswerte einer mittels PIAD beschichteten Kuppel aus PC mit AR-Beschichtung. | Reflection values of PIAD coated PC-dome with AR coating.

1 Mittels ALD konform beschichtete Kuppeln aus PC mit AR-Beschichtung. | Conformal ALD coated PC-domes with AR coating.

Im Mantelbereich bis zu einem Neigungswinkel von 60° beträgt die Restreflexion weniger als 1 %. Bauteile komplexer Geometrie lassen sich noch besser mittels ALD-Prozess entspiegeln, da dieses Verfahren konforme Schichten, also solche mit gleicher Schichtdicke, liefert (Abb. 1). Mit Nanostrukturen AR-plas® kann auch für höhere Lichteinfallswinkel eine ausgezeichnete Entspiegelung erreicht werden (Abb. 3). Für LIDAR-Wellenlängen wurden im Auftrag verschiedener Industriekunden Muster mit entsprechenden AR-Nanostrukturen gefertigt. Insgesamt umfasst die Expertise des Fraunhofer IOF umfangreiches Wissen zur Oberflächenoptimierung von Polymeren sowie mehreren polymertauglichen Entspiegelungsverfahren wie PIAD, ALD und Plasmaätzen AR-plas®.

Danksagung / Acknowledgment

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des IGF-Projektes »Polymere 2020«, (20663 BR der EFDS e.V., gefördert durch BMWI) sowie im Projekt for+ (Wachstumskern, gefördert durch BMBF) erzielt.



3 Reflexionsspektren eines PC-Bauteils mit strukturierter Beschichtung AR-plas® für die LIDAR-Wellenlänge 850 nm. | Reflection spectra of PC-element with nanostructured AR-plas® coating for LIDAR-wavelength 850 nm.

surfaces by means of plasma-ion-assisted deposition (PIAD) with high adhesive strength. In general, a polymer specific optimization of the deposition parameters is essential for each material type. Typical polycarbonates may only be coated under very mild plasma conditions to prevent subsequent defect formation. Excellent coating adhesion has already been achieved on alternative high refractive index polymers such as OKP-1 and EP6000. For dome-shaped components in LIDAR applications, the AR design targeted in PIAD must be extensively broadband. Figure 2 shows the reflection on such a PC component. In the cladding area up to an inclination angle of 60°, the residual reflection is below 1 %. Components with complex geometries can be coated even better using the ALD technology as conformal coatings can be achieved in this way (Fig. 1).

With AR-plas® nanostructures, excellent AR functionality can be obtained for higher angles of light incidence (AOI) (Fig. 3). For LIDAR wavelengths, samples with corresponding AR nanostructures were developed and produced for various industrial customers. In summary, the expertise of Fraunhofer IOF comprises extensive knowledge of surface optimization of polymers as well as several polymer-compatible anti-reflective coating processes such as PIAD, ALD and AR-plas® plasma etching.

AUTHORS

Ulrike Schulz
Kristin Pfeiffer
Adriana Szeghalmi
Nancy Gratzke
Tina Seifert
Friedrich Rickelt

CONTACT

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



KONFORME BESCHICHTUNG FÜR HOCHEFFIZIENTE SPEKTROMETERGITTER CONFORMAL COATING FOR HIGH- EFFICIENCY SPECTROMETER GRATINGS

Die Realisierung hocheffizienter Beugungsgitter, welche als dispersive Kernkomponenten in Erdbeobachtungsspektrometern mit NIR/SWIR-Kanälen zum Einsatz kommen, stellt höchste Anforderungen an den Herstellungsprozess. Am Fraunhofer IOF konnte in Zusammenarbeit mit der wissenschaftlichen Fachabteilung »Mikro- und nanostrukturierte Optik« eine hohe, nahezu polarisations-unabhängige Beugungseffizienz durch die Einbettung eines Quarzglas-Grundgitters in ein hochbrechendes Material (TiO_2) und einer abschließenden SiO_2 -Schicht mit entspiegelnder Wirkung erzielt werden (Abb. 1).

Voraussetzung für eine hohe Effizienz sind hierbei hochwertige, homogene und hohlraumfreie Beschichtungen. Die Einbettung erfolgt daher mittels Atomlagenabscheidung (ALD) (Abb. 2), einer Technologie, durch die tiefe Gittergräben strukturtreu beschichtet werden. Eine besondere Herausforderung ist das kontinuierlich steigende Aspektverhältnis während der Einbettung, die eine gezielte Prozessoptimierung zur Beschichtung solcher Gitter erfordert. Darüber hinaus ist es essenziell, die Brechzahl und Dicken der Schichten präzise zu kontrollieren.

In diesem holistischen Ansatz erfolgte eine Prozessoptimierung durch die Anpassung der Prozessparameter (Präkursor material, Dosis- und Spülzeiten, Plasmabedingungen

High-efficiency diffractive gratings, which comprise the key components of earth-monitoring spectrometers in the NIR/SWIR spectral range as dispersive elements, impose great challenges on the manufacturing process. At Fraunhofer IOF, in cooperation with the scientific department "Micro- and nanostructured optics", a high and nearly polarization-independent diffraction efficiency is achieved by embedding a fused silica grating into a high refractive index material (TiO_2) and an antireflective SiO_2 top layer (Fig. 1).

High quality, homogenous, and void-free coatings are required for high efficiency. The embedding is therefore done by atomic layer deposition (ALD) (Fig. 2), which can deposit conformal coatings onto deep gratings. The continuously increasing aspect ratio of the grooves is a particular challenge for their filling; thus, the deposition process must be optimized for such gratings. In addition, the refractive index and the coating thickness must be controlled precisely.

In this holistic approach, the optimization of process parameters (precursor material, dose and purge times, plasma conditions etc.) for the specific grating has been performed. Plasma-enhanced ALD (PEALD) processes enable TiO_2 coatings with a high refractive index. However, these coatings have a high roughness at the film thickness

1 *Eingebettetes Gitter. | Embedded grating.*

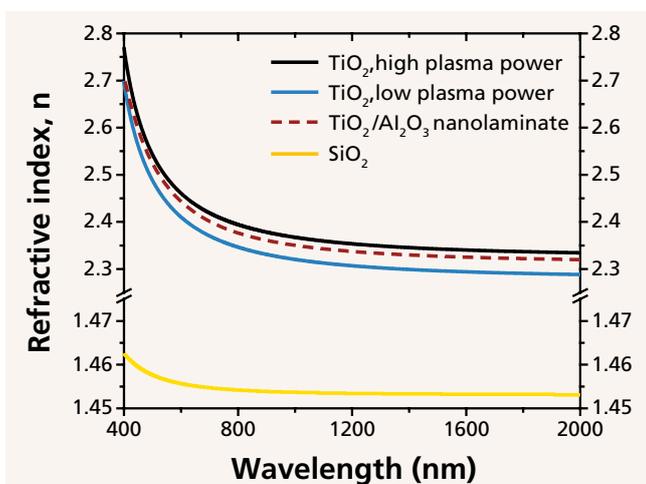
2 *PEALD-Beschichtungsanlage. | PEALD coating equipment.*

etc.) gezielt an die Gitterstruktur. Plasmagestützte ALD-Prozesse (PEALD) ermöglichen besonders hochbrechende TiO_2 -Schichten. Diese weisen allerdings bei zur Verfüllung notwendigen Schichtdicken von über 300 nm eine hohe Rauheit auf. Mittels $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Nanolaminaten werden sehr glatte Schichten (AFM-Rauheit, $\text{RMS} < 1 \text{ nm}$) erzeugt /1/. Zudem lässt sich durch die gezielte Einbindung von Al_2O_3 die Brechzahl an das optimale Gitterdesign anpassen. Die Kontrolle der Schichtdickenverhältnisse der Nanolaminat-Komponenten und der Plasma-Bedingungen ermöglichen einen hohen effektiven Brechungsindex von $2,32 \pm 0,01 @ 2 \mu\text{m}$ (Abb. 3). Somit wurden Transmissionsgitter mit einer gemittelten Beugungseffizienz von $\geq 90 \%$ bei einer Polarisations sensitivität $\leq 4 \%$ für den SWIR2-Kanal im Bereich von 1990 nm bis 2095 nm realisiert.

required for filling the grooves of above 300 nm. Smooth coatings are obtained by $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ nanolaminates (AFM roughness, $\text{RMS} < 1 \text{ nm}$). In addition, the refractive index can be adapted to the optimal grating design by adjusting the amount of Al_2O_3 in the nanolaminate. Controlling the ratio of the components in the nanolaminates and the plasma conditions allows a refractive index of $2.32 \pm 0.01 @ 2 \mu\text{m}$ (Fig. 3). Thus, transmission gratings with an average diffraction efficiency above 90 % and a polarization sensitivity below 4 % have been demonstrated for the SWIR2 channel in the 1900 nm to 2095 nm spectral range.

References / Literatur

/1/ L. Ghazaryan et al.: Structural, optical, and mechanical properties of TiO_2 nanolaminates, *Nanotechnology* 32 (2021) 095709.



3 Brechungsindex der SiO_2 - und TiO_2 -Schichten und des $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Nanolaminates. | Dispersion curves of SiO_2 and TiO_2 thin films and $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ nanolaminate.

AUTHORS

Kristin Pfeiffer
Vivek Beladiya
Torsten Harzendorf
Thomas Flügel-Paul
Adriana Szeghalmi

CONTACT

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



MULTISPEKTRALE REFLEKTOREN FÜR SYNCHROTRONOPTIKEN

MULTISPECTRAL REFLECTORS FOR SYNCHROTRON OPTICS

Für die Entwicklung neuer Materialien ist die Quantifizierung relevanter Materialparameter unabdingbar. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) betreibt in Berlin-Adlershof mit der Metrology Light Source (MLS) einen Niederenergie-Elektronenspeicherring für die Metrologie mit Synchrotronstrahlung. Für die Radiometrie im ultravioletten Spektralbereich (40 nm bis 400 nm) wird derzeit eine dedizierte Strahlführung aufgebaut. Diese Strahlführung soll die hochpräzise Kalibrierung von Strahlungsempfängern und optischen Komponenten ermöglichen, wodurch eine Quantifizierung relevanter Materialparametern ermöglicht wird. Der Umlenkspiegel, der die Strahlung auf die Messeinrichtungen zur Kalibration lenkt, wurde vom Fraunhofer IOF bereitgestellt.

Ein hohes Reflexionsvermögen in dem kurzwelligen und breiten Spektralbereich (40 nm bis 400 nm) konnte durch die Kombination von zwei Beschichtungen auf einem Substrat realisiert werden. Dafür stand eine Substratfläche von 90 x 150 mm² zur Verfügung, auf der zwei optisch aktive Flächen von 80 x 65 mm² mit unterschiedlichen Abscheidetechnologien beschichtet wurden (Abb. 1). Für den Spektralbereich 40 nm bis 121 nm (Extrem Ultraviolet: EUV) konnte mit einem speziell konfigurierten Multilayer das in Abbildung 2 dargestellte Reflexionsvermögen erreicht werden. Dieser Multilayer wurde mittels Magnetronspütern

The quantification of relevant material properties is essential for the development of new materials. The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) operates the Metrology Light Source (MLS) in Berlin-Adlershof, a low-energy electron storage ring for metrology with synchrotron radiation. A dedicated beamline is being constructed currently for radiometry in the ultraviolet and vacuum-ultraviolet spectral range (40 nm to 400 nm). This beamline is intended to enable the high-precision calibration of radiation receivers and optical components, which enables relevant material properties to be quantified. The deflecting mirror, which guides the radiation onto the measuring devices for calibration, was manufactured by Fraunhofer IOF.

A high reflectivity in the short wave and broad spectral range (40 nm to 400 nm) could be achieved by combining two different coatings on one substrate. A substrate area of 90 x 150 mm² was used, on which two coatings with clear apertures of 80 x 65 mm² were coated successfully through different coating technologies (Fig. 1). For the spectral range 40 nm to 121 nm (EUV: extreme ultraviolet), the reflectivity is shown in figure 2. This reflectivity could be achieved with a tailored multilayer, deposited by magnetron sputtering. For the range from 122 nm to 400 nm (FUV-NUV: from far-ultraviolet up to and including near-ultraviolet), a layer system was deposited by electron beam evaporation. This

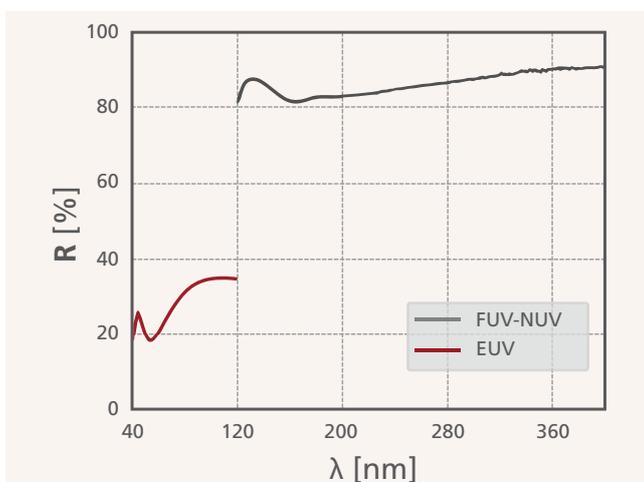
1 Substrat (90 x 150 mm²) mit hochreflektierender und multispektraler Beschichtung (von EUV bis NUV). |
Substrate with high-reflective multispectral coating (from EUV to NUV).

abgeschieden. Für den Bereich von 122 nm bis 400 nm, den fernen Ultraviolett (FUV) bis nahen Ultraviolett (NUV), wurde ein Schichtsystem mittels Elektronenstrahlverdampfen aufgebracht. Dieses Schichtsystem wurde speziell hierfür entwickelt und besteht u. a. aus einer hochreflektierenden Al-Schicht und einer Schutzschicht aus Magnesiumfluorid. Das Reflexionsvermögen ist ebenfalls in Abbildung 2 dargestellt.

Um einen Strahlversatz beim Wechsel zwischen den Beschichtungen zu vermeiden, wurden beide Beschichtungen mittels Maskierung auf demselben Substrat aufgebracht. Neben der hochreflektierenden und multispektralen Beschichtung (von EUV bis NUV) wurden die Einhaltung der Spezifikationen für das Glas-Substrat am Fraunhofer IOF kontrolliert. Eine Oberflächenrauheit von $< 0,3$ nm RMS in einem breiten Spektralbereich (10 μm bis 1 mm), ein Krümmungsradius von > 10 km und ein Tangentenfehler von < 2 arcsec konnten mittels unterschiedlichen Charakterisierungsmethoden bestätigt werden.

layer system is developed for this region and consists, among other layers, of a highly reflective Al layer and a protective layer made of magnesium fluoride.

To avoid a beam-offset when changing between the coatings, by masking, both coatings were applied to the same substrate. In addition to the implementation of the high-reflective multispectral coating (from EUV to NUV), compliance with the specifications for the glass substrate was determined at Fraunhofer IOF. A surface roughness of < 0.3 nm RMS in a broad spectral range (10 μm to 1 mm), a radius of substrate curvature > 10 km, and a slope error of < 2 arcsec were confirmed by different characterization methods.



2 Reflexionsvermögen der gesputterten EUV-Beschichtung und der aufgedampften FUV-NUV-Beschichtung. | Reflectivity of the sputtered EUV Coating (40 nm – 121 nm) and the evaporated FUV-NUV coating (122 nm – 400 nm).

AUTHORS

Sven Stempfhuber

Sergiy Yulin

Oskar Ogor¹

Stefan Schwinde

¹ Physikalisch-Technische

Bundesanstalt (PTB)

CONTACT

Dr. Stefan Schwinde

Phone +49 3641 807-297

stefan.schwinde@iof.fraunhofer.de



ABBILDUNGSDEGRADATION DURCH STREULICHT VON KONTAMINATIONEN CONTAMINATION BUDGETS AND THEIR IMPACT ON LIGHT SCATTERING

Innovative Technologien wie die Halbleiterlithographie zur Herstellung immer kleinerer und energieeffizienterer Chips, die satellitengestützte, hochauflösende Erdbeobachtung oder Grundlagenforschung im Bereich der Gravitationswellendetektion bringen heutige Fertigungstechnologien permanent an ihre technischen Grenzen. Ein Aspekt, der dabei oftmals unterschätzt wird, ist der Einfluss von Kontaminationen und Partikeln, der die optischen Abbildungseigenschaften wie den Abbildungscontrast oder das spektrale Auflösungsvermögen herabsetzt. Insbesondere bei der Systemintegration und Verifizierung sind Kontaminationen nicht vermeidbar oder können nicht mehr entfernt werden. Das Fraunhofer IOF verfolgt daher zwei Lösungsstrategien, um diese Problematik trotz ihrer hohen Komplexität auf elegante Weise zu umgehen. Das betrifft zum einen intelligente Schichtdesigns, die in ihrem Aufbau so angepasst sind, dass unvermeidbare Kontamination auf den optischen Oberflächen nahezu kein Streulicht erzeugen ¹. Dies ist in Abbildung 1 gezeigt, wo für die Anwendungswellenlänge 640 nm kaum Streulicht an dem kontaminierten Bereich registriert werden kann, während bei einer Bestrahlung mit 405 nm die starke Streulichterhöhung durch die Partikel sichtbar wird. Ein weiterer Ansatz, der im Rahmen eines gemeinschaftlichen

Innovative technologies, such as semiconductor lithography for the realization of ever smaller and more energy-efficient chips, satellite-based, high-resolution earth observation, or fundamental research in the field of gravitational wave detection, are pushing today's manufacturing technologies to their technical limits. However, an aspect that is often underestimated is the influence of contamination and particles, which reduce optical imaging properties such as imaging or spectral contrast. Especially during system integration and testing, contamination cannot be avoided or removed. Fraunhofer IOF, therefore, pursues two solution strategies to circumvent this highly complex problem elegantly. On the one hand, this involves intelligent thin-film designs whose structures are adapted in such a way that unavoidable contamination on the optical surfaces generates almost no scattered light ¹. This is shown in figure 1, in which the scattered light at the application wavelength 640 nm can hardly be registered at the contaminated area, whereas for irradiation at 405 nm, the strong increase of scattered light by the particles becomes visible. Another approach, which is being pursued in a joint project with ESA, is to simulate the influence of particle distributions after typical exposure times in controlled cleanroom and

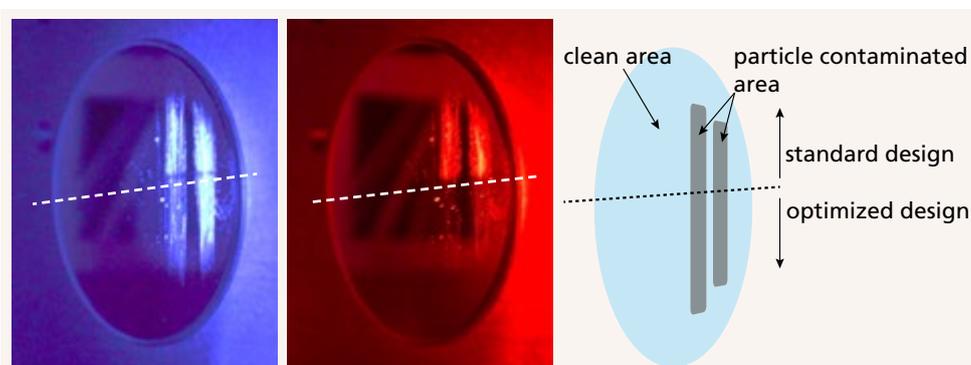
¹ *Kontaminationsinduzierte Abbildungsdegradation eines Gaußschen Doppelobjektivs ohne Berücksichtigung von Aberrationen, links: ideale Abbildung; rechts: Partikeleinfluss basierend auf einem Kontaminationslevel (PAC) von 0,1 %. | Contamination-induced image degradation of a Gaussian double lens without considering aberrations, left: ideal image; right: particle influence for a percentual area coverage (PAC) of 0.1 %.*

Projektes mit der ESA verfolgt wird, ist den Einfluss von Partikelverteilungen, wie sie bei typischen Expositionszeiten in kontrollierten Reinraum- und Laborumgebungen auftreten, zu simulieren. Dazu wurden die Fallout-Raten in unterschiedlichen Reinräumen von ISO5 bis ISO8 analysiert und die entsprechenden Partikelverteilungen bestimmt. In einem zweiten Schritt wurden die dazugehörigen Streulichtverteilungen experimentell im ultravioletten bis infraroten Spektralbereich bestimmt, um einfach handhabbare und aussagekräftige Streulichtmodelle zu entwickeln, mit denen eine Vorhersage der Streulichteigenschaften auf vergleichbaren Komponenten ermöglicht wird. Somit können für zukünftige optische Systeme die Auswirkungen von Kontaminationen und Expositionszeiten zielsicher vorhergesagt und damit Kontaminationsbudget verlässlich erarbeitet und dynamisch entlang der gesamten Fertigungskette angepasst werden. Dies ist auf Systemebene für ein abbildendes Gaußsches Doppelobjektiv in Abbildung 2 dargestellt. Durch das kontaminationsinduzierte Streulicht wird der Kontrast stark herabgesetzt und es kommt zu Artefakten in der Abbildung.

laboratory environments. For this purpose, the fallout rates in different cleanrooms from ISO5 to ISO8 were analyzed and the corresponding particle distributions determined. In a second step, the corresponding light scattering distributions were determined experimentally in the ultraviolet to infrared spectral range to develop easy-to-use and meaningful light scattering models that allow the prediction of light scattering properties on comparable components. For future optical systems, the effects of contamination and exposure times can be predicted accurately and thus contamination budgets can be determined reliably and adjusted dynamically along the entire production chain. This is shown on the system level for an imaging Gaussian double lens in figure 2. The contamination-induced straylight reduces the contrast and causes artifacts in the image greatly.

References / Literatur

/1/ A. von Finck et al.: Reducing light scattering from surface contaminations by thin film design, Advanced Optical Technologies 6 (2017).



2 *Optimiertes hochreflektierendes Schichtdesign mit reduziertem Streulicht von Oberflächenpartikeln bei der Anwendungswellenlänge 640 nm. | Demonstration of a light scattering optimized thin-film design of an antireflection coating to reduce the contamination induced light scattering at 640 nm.*

AUTHORS

Tobias Herffurth
Anne-Sophie Munser
Yusuf Sekman
Marcus Trost

CONTACT

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



BILDGEBUNG UND SENSORIK

IMAGING AND SENSING

Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative optische Messverfahren und -systeme nach kundenspezifischen Anforderungen. Hierzu gehören bildgebende optische 3D-Messsysteme mit hoher messtechnischer Genauigkeit für unterschiedlichste Anwendungen. Messvolumen von wenigen Kubikzentimetern bis einigen Kubikmetern können mit Messfrequenzen von bis zu 55.000 3D-Datensätzen pro Sekunde erfasst werden.

Des Weiteren werden miniaturisierte mikrooptische Abbildungssysteme basierend auf Einzelapertur- und Multiapertursystemen entwickelt und realisiert. Die Fertigung kann hier im Wafermaßstab erfolgen und direkt industriell umgesetzt werden.

Am Fraunhofer IOF sind zudem verschiedenste optische und nichtoptische Messsysteme vorhanden. Exemplarisch seien hier Interferometer unter Nutzung von CGHs (Computergenerierte Hologramme) oder ein Computertomograph mit einer Auflösung bis in den Mikrometerbereich genannt.

In diesem Jahresbericht sind nachfolgend einige ausgewählte Projekte aus dem Jahr 2020 dargestellt, die dieses Kompetenzfeld repräsentieren: Mobile Sensorplattform für die Qualitätskontrolle, Multimodaler 5D-Sensor zur Vitalparameter-Bestimmung und KI-basierte Qualitätssicherung bei manuellen Montageprozessen.

Fraunhofer IOF develops innovative optical measurement methods and systems according to customer-specific requirements. This includes optical 3D measurement systems with high metrological accuracy for a wide range of applications. Measurement volumes from a few cubic centimeters to several cubic meters can be acquired with measurement frequencies of up to 55,000 3D data sets per second.

Furthermore, miniaturized micro-optical imaging systems based on single- and multi-aperture systems are developed and realized. The production can be performed on a wafer-scale and can be implemented directly on an industrial level.

Fraunhofer IOF also holds a wide variety of optical and non-optical measuring systems. Examples are interferometers using CGHs (Computer Generated Holograms) as well as a computer tomograph with a resolution down to the micrometer range.

In this annual report, some selected projects from the year 2020 representing this field of competence are presented: Mobile sensor platform for quality control, multimodal 5D sensor for vital parameter determination, and AI-based quality assurance in manual assembly processes.

LEFT *Gestengesteuerte mobile Sensorplattform für die Qualitätskontrolle. | Gesture-controlled mobile sensor platform for quality control.*



MOBILE SENSORPLATTFORM FÜR DIE QUALITÄTSKONTROLLE

MOBILE SENSOR STAGE FOR QUALITY MANAGEMENT

Aufgaben der industriellen Qualitätssicherung werden immer häufiger durch hochgenaue 3D-Messungen des zu prüfenden Bauteils realisiert. Eine komplette dreidimensionale Erfassung komplexer Objekte mit höchster Genauigkeit und der anschließende automatische Vergleich mit dem CAD-Modell erfordert jedoch sehr hohen Zeitaufwand und ist nicht in den Produktionsprozess ohne Verringerung der Taktrate integrierbar. Aus diesem Grund kommt der visuellen Sichtprüfung durch den Menschen immer noch große Bedeutung zu. Eine Kombination der komplexen kognitiven Fähigkeiten des Menschen mit der Präzision und Ausdauer einer 3D-Messmaschine kann bestimmte Prüfprozesse signifikant effektiver machen. Im 3Dsensation-Projekt »3D-KOSYMA« wurde in Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung ein Demonstrator entwickelt, der 3D-Prüfaufgaben mit interaktiver Unterstützung durch den Menschen gezielt an den notwendigen Positionen am Objekt realisiert. Der Demonstrator besteht aus einer mobilen Plattform, einem 3D-Interaktionssensor zur Beobachtung des Arbeitsraumes, einem 3D-Prüfsensor und einem 6-Achs-Roboter zur Positionierung des Prüfsensors. Der 3D-Prüfsensor ist austauschbar, um für jeden Anwendungsfall den optimalen Sensor einsetzen zu können.

Der Prüfprozess wird aktiviert, wenn der Mensch visuell eine Stelle auf dem Werkstück wahrnimmt und einen

Tasks of industrial quality management are performed increasingly by high-precision 3D measurements of the component to be checked. A complete high-precision three-dimensional acquisition of complex objects with subsequent automatic comparison with the CAD model, however, requires considerable effort in terms of time. Additionally, such measurements cannot be inserted into the production process without a reduction in velocity. Hence, visual check by a human is still an important task in the quality management process. However, a combination of the complex cognitive skills of the human with the precision and endurance of the 3D measurement device may improve the checking process significantly and make it more effective.

The collaboration between partners from industry and research in the 3Dsensation project "3D-KOSYMA" led to the development of a demonstrator system which realizes 3D-checking tasks through the interaction of human and machine. These checking tasks can be performed at certain positions on the target after finger-pointing by the human which were unknown before. This possibility makes the demonstrator system effective and flexible. The demonstrator consists of mobile platform, an irritation-free 3D interaction sensor for observation of the working space, a 3D checking sensor (CS), and

1 Demonstrator-System auf mobiler Plattform und Prüfobjekt mit Prüfbereich. |

Demonstrator system on mobile stage and checking object with inspection region.

Fertigungsfehler vermutet. In diesem Fall zeigt er auf die zu prüfende Stelle des Werkstücks. Das Demonstrator-System erkennt die Zeigegeste und bestimmt den Schnittpunkt der Zeigerichtung mit der Oberfläche des Werkstücks. An diese Stelle bewegt der Roboter den Prüfsensor, indem zuvor die optimale Bahn des Roboters zum Anfahren der Prüfstelle berechnet wurde. Nach Ausführung der Prüfmessung können die 3D-Messpunkte an das CAD-Modell angepasst und ein Soll-Ist-Vergleich vorgenommen werden. Das Ergebnis der Prüfung wird auf einem Monitor dargestellt.

Die mobile Plattform dient zur Positionierung des Demonstrators und kann zusätzlich auch zum Anfahren der Prüfposition eingesetzt werden, z. B. bei Bauteilen, die größer als der Bewegungsbereich des Roboters sind.

Mit dem Demonstrator hat der Anwender die Möglichkeit zur schnellen, individuellen und interaktiven Markierung, z. B. von Prüfpositionen, ohne die Notwendigkeit einer aufwendigen a-priori Roboter-Programmierung. Damit ergibt sich als zukünftiges Anwendungsfeld die Prüfung entlang der Prozesskette.

a six-axis robot for positioning of the CS. The CS is exchangeable to use the optimal measurement device for each application case.

The checking process is initialized by a pointing gesture from the human in the case of receiving visual awareness of a manufacturing defect. In this case, the human indicates the corresponding area to be checked on the target. The demonstrator system detects the pointing gesture and determines the intersection point of the pointing direction with the target surface. Consecutively, the robot moves the CS to the checking area after calculation of the optimal robot path. After performing the checking measurement, the 3D points obtained can be compared to the CAD model. The result will be displayed on a screen.

The mobile platform serves for the placement of the demonstrator system. It can be used additionally for CS movement to the checking position, e.g., if the workpiece is larger than the range of motion of the robot. The demonstrator provides the possibility of a fast, flexible, individual, and interactive marking, e.g., of checking positions without the necessity of arduous a priori robot programming. Future applications can use this technology for checking along the process chain.

AUTHORS

Christian Bräuer-Burchardt

Florian Siegmund

Peter Kühmstedt

CONTACT

Dr. Peter Kühmstedt

Phone +49 3641 807-230

peter.kuehmstedt@iof.fraunhofer.de



MULTIMODALER 5D-SENSOR ZUR VITALPARAMETER-BESTIMMUNG

MULTIMODAL 5D SENSOR FOR MEASURING VITAL PARAMETERS

Ob Passagiere bei der Einreise am Flughafen, Personal im Eingangsbereich systemrelevanter Einrichtungen oder Frühgeborene im Inkubator – die regelmäßige Erfassung oder kontinuierliche Überwachung des Gesundheitszustands von Personen jeglichen Alters gewinnt zunehmend an Bedeutung. Wichtige Indikatoren für den Zustand eines Menschen sind beispielsweise seine Körpertemperatur, sein Puls oder seine Atmung. Die Bestimmung dieser Vitalparameter sollte sowohl aus hygienischen als auch praktischen Gründen und, besonders bei Frühgeborenen, zur Steigerung der Zuverlässigkeit berührungslos erfolgen.

Ein neu entwickelter bildgebender, multimodaler 5D-Sensor (Abb. 2), welcher einen hochauflösenden, irritationsfreien, echtzeitfähigen 3D-Sensor mit einer RGB-Kamera sowie mit in verschiedenen Spektralbereichen sensitiven Kamerasystemen kombiniert, erlaubt die kontaktlose Messung essenzieller Vitalparameter (Abb. 3). Mittels Thermografiekamera wird sowohl die Körpertemperatur im Bereich der Augeninnenwinkel gemessen als auch die Atemfrequenz anhand der Temperaturvariation im Nasenbereich bestimmt. Eine bei einer Wellenlänge von 950 nm empfindliche Kamera dient der Ermittlung der Herzfrequenz. In Kombination mit einer bei 750 nm sensitiven Kamera kann sie zudem zur Bestimmung der Sauerstoffsättigung des Bluts verwendet werden /1/.

Whether it is passengers arriving at an airport, personnel in the entrance area of system-relevant facilities, or premature babies in an incubator: It is becoming increasingly important to periodically acquire or continuously monitor the state of health across all age groups. Key indicators of a person's condition include body temperature, pulse, and respiration. For hygienic as well as practical reasons and, particularly when monitoring premature babies, to increase reliability, these vital parameters should be collected contactlessly.

A newly developed multimodal 5D imaging sensor (Fig. 2), which combines a high-resolution, irritation-free, real-time 3D sensor with an RGB camera and camera systems sensitive to different spectral ranges, allows contactless measurement of essential vital parameters (Fig. 3). Using a thermal camera, the body temperature is measured in the region of the inner corners of the eyes and the respiratory rate is determined based on the temperature variation in the nose area. A camera sensitive at a wavelength of 950 nm is used to measure the heart rate. In combination with a camera sensitive at 750 nm, it can also be used to determine the oxygen saturation of the blood /1/.

Simultaneous 3D measurement of the head ensures that all these parameters can be recorded reliably regardless of the

1 Vitalparameter-Bestimmung mit 5D-Sensor. | Measuring vital parameters with 5D sensor.

2 Multimodaler 5D-Sensor. | Multimodal 5D sensor.



2

Die zuverlässige Erfassung all dieser Parameter unabhängig von der exakten Position oder Haltung der untersuchten Person und auch außerhalb von Laborbedingungen wird durch die gleichzeitige 3D-Vermessung des Kopfs sichergestellt. Diese erfolgt mittels GOBO-Projektion aperiodischer Sinus-Muster /2/ im für das menschliche Auge nicht sichtbaren Nahinfrarotbereich und daher irritationsfrei. Der generierte 3D-Datenstrom wird anschließend unter Nutzung von Algorithmen zur Echtzeitverarbeitung, Merkmalsextraktion und Shading-Korrektur weiterverarbeitet.

Im gemeinsam mit der Technischen Universität Ilmenau durchgeführten Projekt »CoVital« der Innovationsallianz 3Dsensation wurde der multimodale 5D-Sensor am Universitätsklinikum Jena evaluiert. Dazu wurden bei jedem Schichtwechsel die Vitalparameter des Personals der Sektion Neonatologie aufgenommen. In nachfolgenden Studien sollen mit dem System erstmals die Körperfunktionen Neugeborener innerhalb der ersten Tage nach der Geburt überwacht werden.

exact position or posture of the person being examined and even outside laboratory conditions. This is done through GOBO projection of aperiodic sinusoidal patterns /2/ in the near-infrared range, which is not visible to the human eye and therefore irritation-free. The generated 3D data stream is evaluated utilizing algorithms for real-time processing, feature extraction, and shading correction.

Within the project "CoVital", performed in cooperation with the Ilmenau University of Technology, the multimodal 5D sensor has been tested at the University Hospital Jena. For this purpose, the staff of the division of neonatology recorded their vital parameters at each shift change. In future studies, the system will be used for the first time to monitor the bodily functions of newborns within the first days after birth.

References / Literatur

- /1/ M. Rosenberger et al.: 3D high-resolution multimodal imaging system for real-time applications, Proc. SPIE 11397, 1139704 (2020).
- /2/ S. Heist et al.: GOBO projection for 3D measurements at highest frame rates: a performance analysis, Light: Science & Applications 7, 71 (2018).



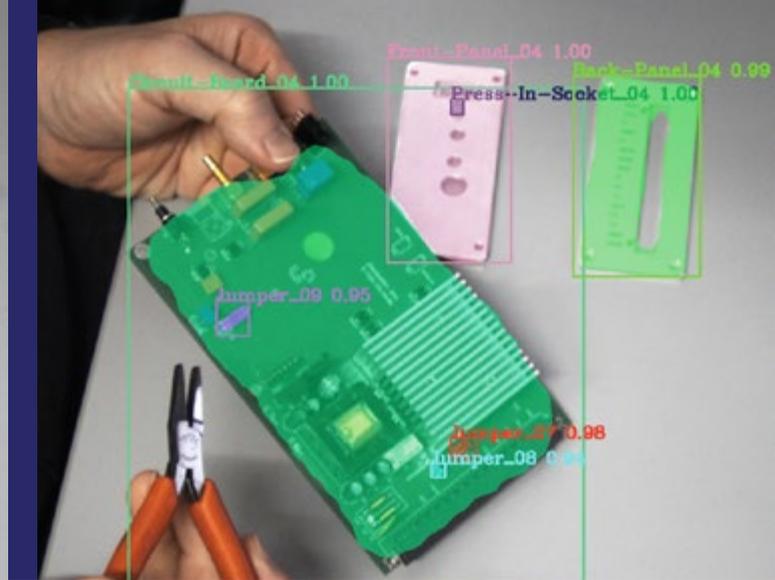
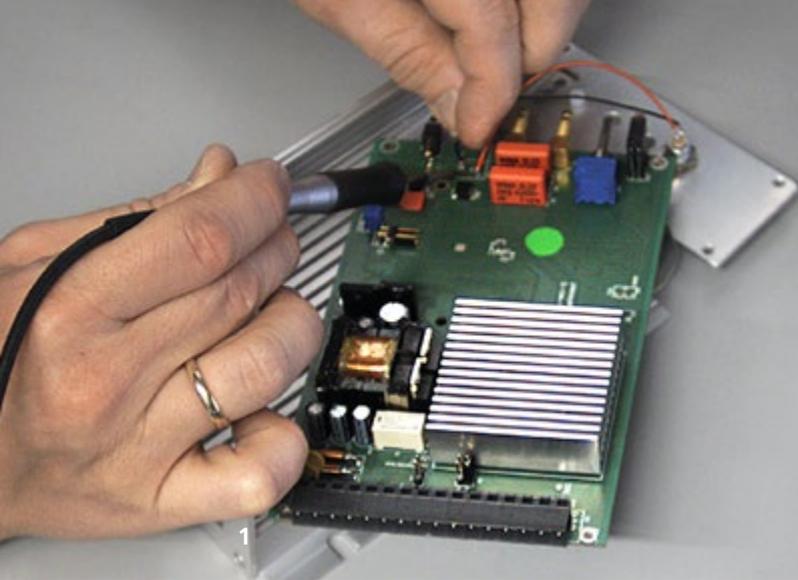
3 *Beispielhafte 3D-Punktwolke mit überlagelter Temperaturtextur. | Exemplary 3D point cloud with superimposed temperature texture.*

AUTHORS

Stefan Heist
Chen Zhang
Ingo Gebhart
Kevin Srokos
Peter Kühmstedt
Gunther Notni

CONTACT

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



KI-BASIERTE QUALITÄTSSICHERUNG BEI MANUELLEN MONTAGEPROZESSEN

AI-BASED QUALITY ASSURANCE FOR MANUAL ASSEMBLY PROCESSES

Industrielle Montageprozesse in der Massenfertigung sind oft durch einen hohen Automatisierungsgrad geprägt. Jedoch kann es wirtschaftlich sinnvoller sein, bei der Fertigung einer geringeren Stückzahl oder in Fällen, bei denen Flexibilität in der Montage möglich ist, den manuellen Arbeitsanteil zu erhöhen. Hierbei steigen jedoch die Anforderungen an die kognitive Leistungsfähigkeit und die Belastung der Mitarbeitenden nimmt deutlich zu. Aufgrund der oft geforderten Nullfehlertoleranz zur Erhaltung der Kundenzufriedenheit kann dies nur mit einem hohen Maß an Konzentration und Verantwortung der Mitarbeitenden erreicht werden. Die Arbeitsbelastung ist somit auf einem konstant hohen Niveau und die zu erreichende Montagequalität ist zusätzlich von dem physischen bzw. psychischen Zustand des Mitarbeitenden abhängig.

Das Projekt 3D-Montageassistent hatte das Ziel, in Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung einen modernen Montagearbeitsplatz für manuelle Fertigungsprozesse zu entwerfen. Die Qualität der Erzeugnisse sollte steigen und gleichzeitig die Belastung der Mitarbeitenden sinken. Ein wichtiger Aspekt dabei ist es, der Arbeitsperson nicht vorzuschreiben, welche der möglichen Montagevarianten gewählt werden muss. D. h. die selbstgewählte Arbeitsweise soll erhalten bleiben und unterstützt werden.

Industrial assembly processes in mass production are characterized often by a high level of automation. However, it may be more economical to increase the manual assembly process when producing a lower volume or in cases where flexibility in assembly is possible. At the same time, the requirements on cognitive performance increase and stress on employees grow significantly. The zero failure tolerance often demanded to maintain customer satisfaction can only be achieved with a high level of concentration and responsibility of the employees. The workload is thus consistently high and the assembly quality is additionally dependent on the physical or mental condition of the worker.

In cooperation with partners from industry and research, the project 3D-Montageassistent had the goal of developing a modern assembly workstation for manual assembly processes. The quality of the products should increase and at the same time, the stress of the worker should decrease. An important aspect here is not to prescribe to the worker which of the possible assembly variants must be selected. Furthermore, the self-chosen way of working should be maintained and supported. This is made possible through continuous monitoring of the assembly process and real-time evaluation of the multimodal sensor data captured. The existing process or model knowledge in

1 *Manueller Montageprozess (links) und dafür notwendige KI-segmentierte Bauteile (rechts) . |*

Manual assembly process (left) and necessary AI-segmented components (right)

Möglich wird dies durch eine kontinuierliche Begleitung des Montageprozesses und die echtzeitfähige Auswertung der aufgenommenen multimodalen Sensordaten. Vorhandenes Prozess- bzw. Modellwissen erlaubt im Zusammenspiel mit den ausgewerteten Sensordaten und dem Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) eine kontinuierliche und automatisierte Kontrolle der Montage. Fehlende bzw. fehlerhafte Bauteile und falsch durchgeführte Prozessabläufe werden automatisch erkannt. Der Mitarbeitende wird entscheidend entlastet, da er ein direktes Feedback über seine Arbeit bekommt und ihm notwendige Korrekturen mitgeteilt werden. Diese Eigenschaften ermöglichen es zudem, interaktiv durch den Montageprozess zu führen, um Anlernprozesse zu fördern. Durch vorhandenes Prozesswissen können die notwendigen Bauteile in korrekter Reihenfolge am Arbeitsplatz gezeigt werden. Gleichzeitig stellt die KI-gesteuerte Überprüfung sicher, dass das entnommene Bauteil zum aktuellen Montagezustand passt.

Die Montagequalität kann dadurch entscheidend gesteigert werden und gleichzeitig wird auch ein wesentlicher Beitrag zur Nachverfolgbarkeit geleistet. Das KI-gelenkte System kann durch den modularen Aufbau in verschiedensten Montageaufgaben situations- und bedarfsorientiert eingesetzt werden.

combination with the evaluated sensor data and the use of artificial intelligence (AI) enables continuous and automated control of the assembly. Missing or defective components and incorrectly executed process sequences are detected automatically. The worker is relieved as he receives direct feedback on his work and necessary corrections are notified to him. These features also make it possible to guide interactively through the assembly process to support learning processes. The necessary components can be shown at the workplace in the correct order using existing process knowledge. At the same time, the AI-controlled inspection ensures that the component in question matches the current assembly status.

The assembly quality can be increased decisively and also a substantial contribution to traceability is made. Due to the modular design, the AI-guided system can be used in most situations for diverse assembly tasks depending on the requirements.

AUTHORS

Marc Preißler
Daniel Höhne
Peter Kühmstedt

CONTACT

Daniel Höhne
Phone +49 3641 807-218
daniel.hoehne@iof.fraunhofer.de



OPTO-MECHATRONISCHE KOMPONENTEN UND SYSTEME OPTO-MECHATRONICAL COMPONENTS AND SYSTEMS

Das Fraunhofer IOF besitzt umfangreiches Know-how in der Entwicklung von Technologien zur hybriden Integration unterschiedlicher Komponenten mit höchster Präzision für den Aufbau komplexer opto-mechanischer und opto-elektronischer Mikro- und Makrosysteme. Dieses umfasst Montagetechnologien (Positionieren, Justieren), Fügetechnologien (Kleben, Laserlöten, Laserspleißen), das Drucken funktionaler Materialien und Strukturen, und vieles mehr. Es erfolgt zudem die Integration komplexer optischer Systeme, auch für extreme Einsatzbedingungen, wie zum Beispiel Einsatz unter Vakuum oder Weltraumanwendungen. Hierbei zeichnen sich optische Systeme zunehmend durch eine hohe Komplexität aus, da die optischen Bauelemente mit Elektronikkomponenten und mechanischen Aktoren zu Systemen mit hoher Integrationsdichte verknüpft werden müssen.

Die Kompetenzen sind hier breit gefächert, um unseren Kunden ein vollständiges Portfolio anbieten zu können. Exemplarisch seien auf den nachfolgenden Seiten abgeschlossene Projekte aus dem Jahr 2020 aufgeführt, die dieses Kompetenzbreite wiedergeben: CO₂-Laser-basiertes Entschichten und Cleaven optischer Glasfasern, und 3D-Polymerdruck von Brillengläsern.

Fraunhofer IOF has extensive know-how in the development of technologies for hybrid integration of different components with the highest precision for the construction of complex opto-mechanical and opto-electronic micro and macro systems. This includes assembly technologies (positioning, adjustment), joining technologies (gluing, laser soldering, laser splicing), the printing of functional materials and structures, and much more. In addition, complex optical systems are integrated, even for extreme operating conditions, such as use under vacuum or space applications. Optical systems are featured increasingly by a high degree of complexity because the optical components have to be linked with electronic components and mechanical actuators to form systems with a high integration density.

Our expertise in this area is broadly diversified to offer our customers a complete portfolio. The following pages show examples of completed projects in the year 2020 that reflect this breadth of competence: CO₂ laser-based decoating and clearing of optical fibers, and 3D polymer printing of ophthalmic lenses.

LEFT *Mit 3D-Polymerdruck hergestelltes Brillenglas. |
Eyeglass lens produced with 3D polymer printing.*



INKEYE – 3D-POLYMERDRUCK VON BRILLENGLÄSERN

INKEYE - 3D POLYMER PRINTING OF EYEGASSES

Die industrielle Herstellung optischer Komponenten erfolgt heutzutage durch klassische Schleif-, Polier- und Freiformbearbeitung von gegossenen oder replizierten Glas- und Polymerpreformen. Wirtschaftlich sind diese Prozesse nur, wenn die Optiken in sehr hohen Stückzahlen und einfachen Geometrien hergestellt werden. Der Trend entwickelt sich jedoch zu individualisierten Optikkomponenten für verschiedenste Anwendungen. Dieser Trend hat sich bereits in der Herstellung von Brillengläsern etabliert, bei denen kleinste Stückzahlen bis hin zu einzeln und individuell angefertigten Gläsern hergestellt werden müssen. Im Projekt »InkEye« wird am Fraunhofer IOF mit dem Tintenstrahl Druck von Brillengläsern nun ein additives Herstellungsverfahren entwickelt, das dank seines digitalen Charakters eine kostengünstige Individualisierung von Freiformoptiken sowie das Aufbringen weiterer Funktionsschichten ermöglicht. Dies wird am Beispiel von vollständig gedruckten Brillengläsern mit einer Kratzfestbeschichtung demonstriert.

Zur Herstellung der Brillengläser werden niedrigviskose Tinten in einem Mehrschichtverfahren verdruckt und durch UV-Vernetzung zu individuellen Volumenkörpern aufgebaut. Je nach gewählter Auflösung beträgt die Dicke einer einzelnen Drucklage zwischen 3 µm und 15 µm. Die Gläser werden daher aus mehreren hundert Einzelschichten aufgebaut. Durch die Anpassung der Prozessführung sowie die exakte Kontrolle der Vernetzungsreaktion können

Optical components are manufactured conventionally by milling, grinding, and polishing molded or replicated polymer- and glass preforms. For cost-effective production, such optics need to be fabricated with simple geometries in large lot sizes. However, in modern optics production, small lot sizes and even individual optics have become more and more important. This trend is established already in eyeglass manufacturing, where every glass is individualized to the person wearing it. With the inkjet printing of eyeglasses, an additive manufacturing strategy was developed at Fraunhofer IOF. Because of its digital character, this technique enables the cost-effective manufacturing of individualized freeform optics and even the deposition of further functional coatings. Within the "InkEye" project, the capabilities are demonstrated by fully inkjet printing eyeglasses with a scratch-resistant coating.

To manufacture the eyeglasses, a mixture of cross-linkable acrylates with low viscosity is deposited in a multilayer inkjet process. Each printed layer has to be UV-cured to crosslink the polymer ink and to guarantee the mechanical stability of the single layers. With each printing run, a 3 µm to 10 µm thick layer is applied. Thus, macroscopic optical components consist of many hundreds of layers. By tailoring the process management and the process parameters, the cross-linking reaction and thus the polymerization of the polymer can be controlled at the surface and interfaces. Therefore, highly

1 Am Fraunhofer IOF gedruckte Brillengläser. | Eyeglasses inkjet printed at Fraunhofer IOF.

das Polymerisationsverhalten an Grenz- und Oberflächen gesteuert und damit optisch homogene, formtreue Volumenkörper mit dem Tintenstrahldruck hergestellt werden. Abschließend werden die Brillengläser mit einer optisch an das Volumenmaterial angepassten Kratzfestbeschichtung bedruckt. Dies erhöht die Abriebfestigkeit und garantiert, dass die Brillengläser beim Reinigen nicht beschädigt werden.

Die erzielten Formgenauigkeiten der gedruckten Brillengläser liegen bei < 150 nm PV und die erzielten Oberflächenrauhigkeiten bei < 3 nm rms. Der Brechungsindex des verwendeten druckbaren Acrylatgemisches liegt bei über 1,54 mit einer Transmission von über 90 % im sichtbaren Bereich. Die Glasübergangstemperatur der UV-vernetzten Volumenkörper beträgt zudem mehr als 80 °C. Dies entspricht typischen Anforderungen für Brillengläser.

Mit dem entwickelten Prozess lassen sich qualitativ hochwertige Brillengläser herstellen, die in ihren Eigenschaften mit konventionell gefertigten Polymergläsern vergleichbar sind.

precise and very homogeneous optics can be manufactured with inkjet printing.

As a final step, the scratch-resistant coating is printed onto the eyeglass. This increases abrasion resistance, which guarantees durability during mechanical cleaning.

The dimensional accuracy of the surface achieved is in the range of PV < 150 nm with a surface roughness of < 3 nm RMS. The refractive index of the printed acrylate mixture was tailored to > 1.54 by achieving transmission of > 90 % of the resulting printed eyeglasses. In addition, the material has a glass transition temperature of > 80 °C. All these properties are essential requirements for the use of the material in eyeglass manufacturing.

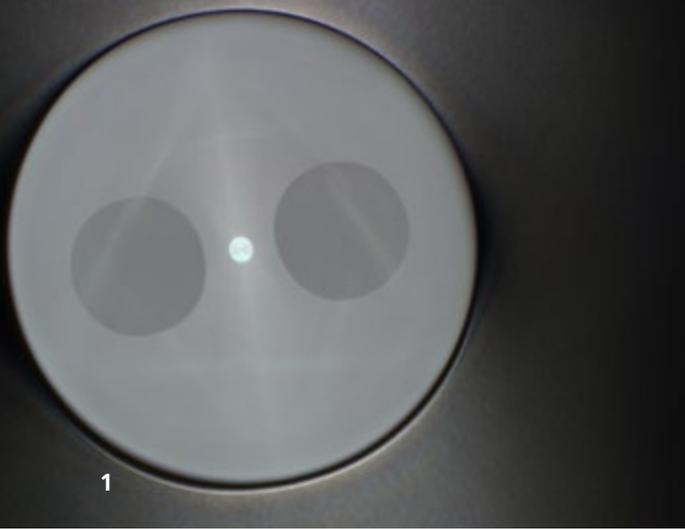
The inkjet printing process developed enables the manufacturing of eyeglasses with high quality and properties comparable to modern requirements.

AUTHORS

Falk Kemper
Erik Beckert
Maximilian Reif
Lisa Pohle
Thomas Schönfelder

CONTACT

Dr. Falk Kemper
Phone +49 3641 807-367
falk.kemper@iof.fraunhofer.de



CO₂-LASER-BASIERTES ENTSCHICHTEN UND TRENNEN OPTISCHER GLASFASERN

CO₂ LASER-BASED DECOATING AND CLEAVING TECHNOLOGY FOR OPTICAL GLASS FIBERS

Glasfasern sind der wesentliche Bestandteil unserer Kommunikationsnetze zur schnellen Übertragung von Informationen, werden aber auch zum Transport sehr hoher Laserleistungen zur Bearbeitung vieler Werkstoffe eingesetzt. Beide Anwendungsbereiche erfordern spezifische Präparationstechniken. Eine typische Präparation optischer Fasern umfasst das Entfernen des Faser-Coating-Materials und die Erzeugung einer möglichst definierten, zumeist planen, Austrittsfläche am Faserende. Durch die verschiedenen Coating-Materialien entwickelten sich auch verschiedene Technologien zu dessen Entfernung. Für Fasern mit Acrylat-Coating eignet sich auch ein CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 9 µm bis 11 µm. Bekannt ist der CO₂-Laser u. a. für das Schneiden von Acrylglas, aufgrund der relativ guten Absorption in diesem Wellenlängenbereich. Darüber hinaus kann der gleiche Lasertyp aber auch für das Aufschmelzen oder Trennen der Glasfaser selbst verwendet werden, unter Voraussetzung einer geeigneten Prozessführung und Parametrierung. Der entwickelte Experimentalaufbau zur Faserpräparation bietet die Möglichkeit zum beiderseitigen Entfernen von Acrylat-Faser-Coating und eines unmittelbar darauffolgenden, gezielten Trennprozesses für Einzelfasern und Faserbündchen mit gleichen äußeren Dimensionen. Der Glasmanteldurchmesser beträgt 125 µm und der Acrylat-Coating-Durchmesser 250 µm. Bis auf

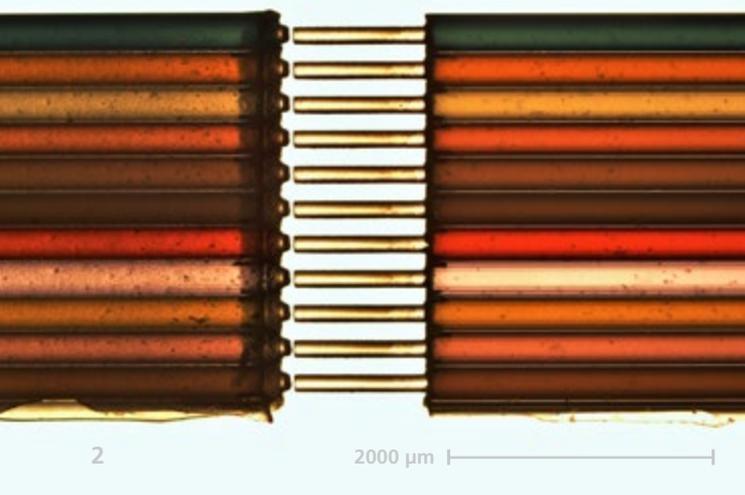
Optical glass fibers are the key medium for fast data transmission but also for guidance high laser power in many material processing. Both applications require specific preparation technologies. A representative optical fibers preparation includes a coating removal process and the generation of a mostly plane fiber tip termination. The development of different coating materials for varied applications led to a plurality of coating removal processes. A CO₂ laser with a wavelength from 9 µm to 11 µm is also suited to remove acrylate coating from optical glass fibers. CO₂ laser cutting processes are standard for cutting acrylic glass due to the relatively good absorption in this wavelength range. Furthermore, this kind of laser is used for fiber melting and cutting applications with suitable process control and parameterization. The setup developed for fiber preparation offers the possibility to remove the acrylate coating from both sides followed by a specific cut process for single and ribbon fibers with similar dimensions. The applicable cladding diameter is 125 µm and the acrylate coating diameter 250 µm. Except for the manual inserted and adjusted fiber, the processes are automated completely. The fiber is adjusted via camera view and the coating is removed from one side. The same applies to the other fiber side, removing the coating at the same length (Fig. 1). For ribbon fibers, the fibers are decoated successively.

1 *PM-Faserstirnfläche und Seitenansicht (ø 400 µm) nach einem CO₂-Laser-Cleave-Prozess. |*

PM-Fiber tip surface and side view (ø 400 µm) after a CO₂ laser cleave process.

2 *Faserbündchen (ø 125 µm) nach dem Entschichten und Trennen mit dem CO₂-Laser. |*

Ribbon fibers (ø 125 µm) after decoating and cleaving using a CO₂ laser.

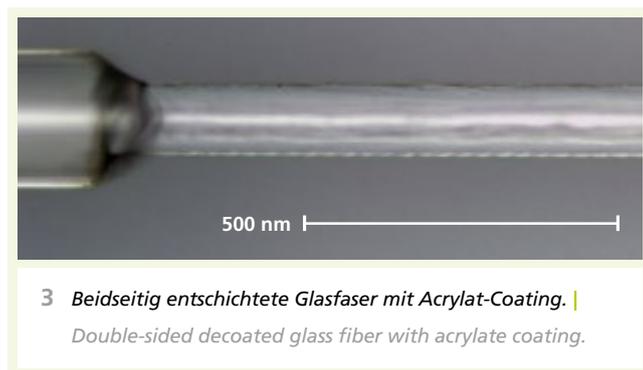


2

2000 μm

das zurzeit noch händische Einlegen der Faser oder des Faserbändchens und Ausrichten sind die Prozesse komplett automatisiert. Die Faser wird unter Kamerabeobachtung zum Laserstrahl positioniert und das Faser-Coating zunächst einseitig entfernt. Analog erfolgt dann durch ein Umschalten des Strahlpfades das Entschichten der gegenüberliegenden Faserseite auf gleicher Länge (Abb. 1). Bei Faserbändchen werden die Fasern nacheinander entschichtet. Anschließend erfolgt das sequenzielle Trennen bei einem Faserbändchen oder ein einzelner Trennvorgang für eine Einzelfaser. Dieser Trennprozess wird in Anlehnung an den mechanischen Cleave-Prozess mit einer Diamant- oder Hartmetallklinge auch als Laserleave-Prozess bezeichnet. Sowohl das Entschichten der Faser als auch dieser Laserleave-Prozess werden erst durch eine geeignete Laserstrahlformung möglich. Der realisierte Ansatz ist verschleiß- und wartungsarm, lässt sich sowohl als OEM-Modul zur Funktionserweiterung in ein bestehendes Gerät integrieren oder auch als Einzelgerät aufbauen. Zur Präparation von Faserbändchen beliebiger Faseranzahl ist der Aufbau frei skalierbar. Eine integrierte Gaszufuhr und Absaugung bieten die Möglichkeiten, mit verschiedenen Gasen zu arbeiten und das entfernte Material über eine geeignete Laserabsaugung zu entsorgen.

Förderkennzeichen: 01QE1745C, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (Eurostars)



3 *Beidseitig entschichtete Glasfaser mit Acrylat-Coating.* |
Double-sided decoated glass fiber with acrylate coating.

Afterward, a sequential laser cut process for a ribbon fiber or a single laser cutting for a single fiber occurs. The cutting process is called the laser cleaving process based on the mechanical cleaving process with a diamond or carbide metal blade. As well as the fiber decoating, the laser cleaving process is enabled by an appropriate laser beam shaping. The realized approach is nearly maintenance-free and qualified as a device extension for an OEM module or a single device. The setup is scalable for ribbon fibers with different fiber numbers. An integrated gas supply and suction channels are used to apply different process gases and to remove the material released via a dedicated suction system.

Funding sign

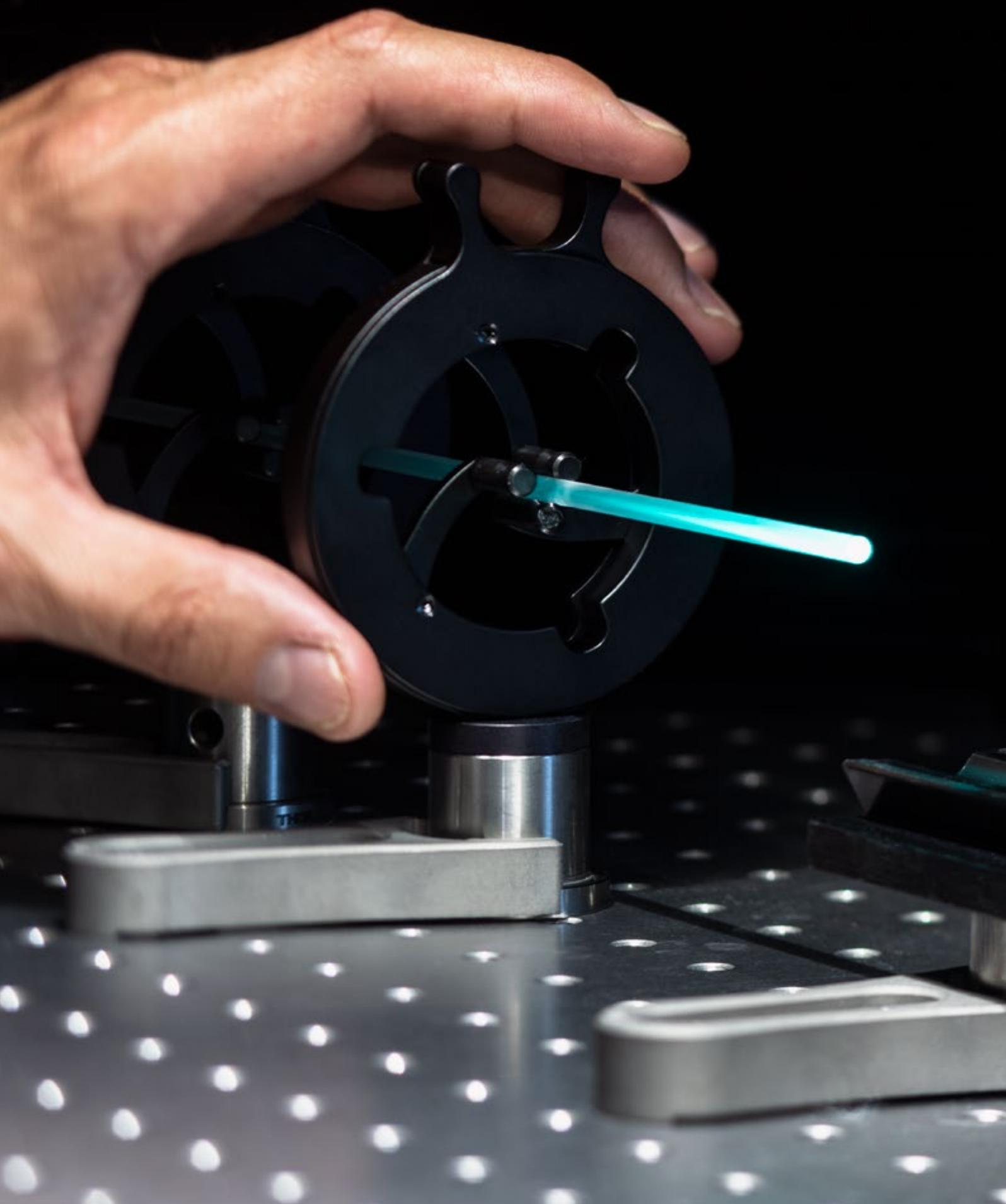
01QE1745C, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (Eurostars)

AUTHORS

Steffen Böhme
 Anja Grobecker
 Tobias Koch
 Gerd Harnisch
 Erik Beckert

CONTACT

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



LASER- UND FASERTECHNOLOGIE

LASER AND FIBER TECHNOLOGY

Für die Entwicklung von Hochleistungsfaserlasern mit beugungsbegrenzter Strahlqualität bestehen am Fraunhofer IOF Kompetenzen in Laserphysik, Faser- und Optikdesign, Glaschemie, Thermooptik, in der Aufbau- und Verbindungstechnik für Faserlaser und in der Entwicklung effizienter Faserkoppler und Strahlführungssysteme.

Das Fraunhofer IOF deckt hier die gesamte Technologieketten im eigenen Fasertechnologiezentrum vom Design über Herstellung laseraktiver Preformen und Fasern, Präparation und Charakterisierung, bis zur Systemintegration der laseraktiven Spezialfasern und faseroptischen Komponenten ab. Dies ist für den Aufbau und den Einsatz von cw- und gepulsten Faserlasersystemen höchster Strahlqualität ($M^2 < 1,2$) mit Ausgangsleistungen bis in den Multi-Kilowattbereich essenziell. Durch den Betrieb von Technologien im industrietauglichen Maßstab bietet sich die Möglichkeit, neue Lösungen schnell in die Anwendung zu überführen.

Das Fraunhofer IOF gehört hier zu den forschungstärksten Instituten mit globaler Sichtbarkeit und zahlreichen technologischen Alleinstellungsmerkmalen. In dem Kompetenzfeld Laser- und Fasertechnologie konnten in 2020 unter anderem die auf den nachfolgenden Seiten dargestellten Themen erfolgreich bearbeitet werden: Modeninstabilitäten in passiven Fasern, Faserbasierte weiche Röntgenquelle, Anti-Stokes Laserkühlung und Spektrale Strahlkombination bis zu 20 kW beugungsbegrenzter Ausgangsleistung.

For the development of high-power fiber lasers with diffraction-limited beam quality, Fraunhofer IOF has expertise in laser physics, fiber and optical design, glass chemistry, thermooptics, packaging and interconnection technology for fiber lasers, and the development of efficient fiber couplers and beam delivery systems.

Here, Fraunhofer IOF covers the entire technology chain in its fiber technology center, from the design and manufacture of laser-active preforms and fibers, preparation and characterization, to system integration of the laser-active special fibers and fiber-optic components. This is essential for the design and application of cw and pulsed fiber laser systems of the highest beam quality ($M^2 < 1.2$) with output powers up to the multi-kilowatt range. By operating technologies on an industrial scale, it is possible to quickly transfer new solutions into applications.

Fraunhofer IOF is one of the strongest research institutes with global visibility and numerous unique technological features. In the competence field of laser and fiber technology in 2020, the topics presented on the following pages, among others, were addressed successfully: mode instabilities in passive fibers, fiber-based soft X-ray source, anti-stokes laser cooling, and spectral beam combination up to 20 kW with diffraction-limited output power.

LEFT *Demonstration von Anti-Stokes Laserkühlung in Yb-dotiertem Quarzglas. | Demonstration of anti-stokes laser cooling in Yb-doped fused silica.*



ERSTE DEMONSTRATION VON ANTI-STOKES LASERKÜHLUNG IN YB-DOTIERTEM QUARZGLAS

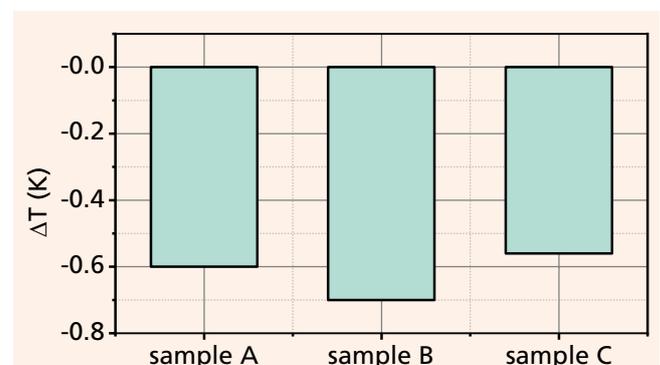
FIRST DEMONSTRATION OF ANTI-STOKES LASER COOLING IN YB-DOPED FUSED SILICA

Wird ein seltenerd-dotiertes Material (z. B. Yb^{3+}) mit Hilfe eines Pumpasers angeregt, so sendet es in der Regel Fluoreszenzlicht (spontane Emission) aus (Abb. 1). Diese Fluoreszenz besitzt ein charakteristisches Spektrum (Abb. 3). Der Schwerpunkt des Spektrums ist die mittlere Wellenlänge der Emission ($\lambda_{\text{mean}}^{\text{em}}$) und somit die abgestrahlte mittlere Energie. Wird die Probe bei höheren Wellenlängen (geringeren Energien) mit einem Laser angeregt, so wird dem System Wärme entzogen und ein Kühleffekt setzt ein. Der Effekt wird als Anti-Stokes Fluoreszenzkühlung bezeichnet. Damit dieser Effekt beobachtet werden kann, müssen parasitäre Energieverlustmechanismen (sogenannte Quencheffekte) vermieden werden und das Material eine außergewöhnlich hohe Reinheit aufweisen.

Verschiedene Materialien wurden für die Untersuchung der Anti-Stokes Fluoreszenzkühlung verwendet, womit der weltweit erste experimentelle Nachweis der Laserkühlung von SiO_2 -Glas gelang ^{1/}. Die am Fraunhofer IOF entwickelten Materialien zeichnen sich durch sehr geringe Hintergrundverluste sowie ein sehr geringes Photodarkening aus. Beide Mechanismen können zu Quencheffekten und damit zur Erwärmung des Materials führen. Zudem zeichnen sich die Materialien durch speziell angepasste Dotierungskonzentrationen aus, wodurch sie für den Einsatz als Kühlmaterial prädestiniert sind. Die Messung der Anti-Stokes Fluoreszenzkühlung wurde an der University of New Mexico in einem eigens entwickelten

The excitation of a rare earth doped material (e.g., Yb^{3+}) with a pump laser leads to the emission of fluorescence light (spontaneous emission) (Fig. 1). This fluorescence exhibits a characteristic spectrum (Fig. 3). The mean emission wavelength ($\lambda_{\text{mean}}^{\text{em}}$) and, hence, the mean emission energy, is the spectral center of mass. If a sample is excited with a higher wavelength (lower energy), heat is extracted from the sample and the cooling effect sets in. This is referred to as anti-stokes fluorescence cooling. For this effect to be observable, it is imperative to rule out parasitic loss mechanisms (known as quenching effects) and to have a material of extraordinary chemical purity.

Various materials were used to investigate anti-stokes fluorescence cooling, resulting in the worldwide first experimental



2 Erzielte Temperaturänderung in drei verschiedenen Proben (A, B und C). | Achieved temperature changes in three different samples (A, B, and C).

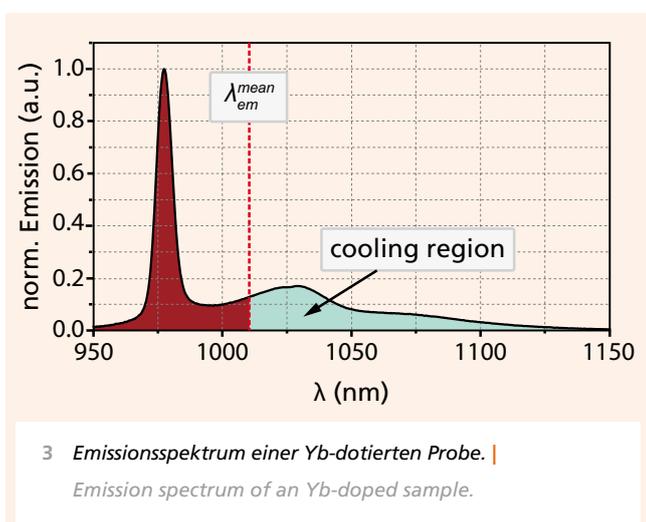
1 **Fluoreszierender Yb-dotierter Glasstab.** |
Fluorescing Yb-doped glass rod.

Messaufbau zur Anti-Stokes Fluoreszenzkühlung durchgeführt. Die dotierten Materialien wurden in einer Vakuumkammer mit einem Pumplaser bei 1053 nm gepumpt und die spontane Emission, bei im Mittel 1010 nm, führte zur Kühlung der Proben /2/. Temperaturänderungen von bis zu -0.7 K konnten mit Hilfe dieser optimierten Proben erreicht werden (Abb. 2). Der geglückte experimentelle Nachweis der Laserkühlung in einem Yb-dotierten SiO₂-Material eröffnet neue Möglichkeiten für den Einsatz zur vibrationsfreien Kühlung von (Faser-)Lasern sowie für sogenannte Strahlungs-balancierte Faserlaser.

Neben der Laserkühlung konnte zudem die absolute Quanteneffizienz der Yb-dotierten Gläser bestimmt werden. Diese liegt bei bis zu 99.3 % – also sehr nahe an der theoretisch möglichen Quanteneffizienz von 100 %. In zukünftigen Untersuchungen soll die Geometrie der Proben weiter optimiert werden, um deutlich höhere Abkühlungseffekte zu erzielen.

Literatur / References

- /1/E. Mobini et al.: Laser Cooling of Silica Glass, arXiv:1910.10609 (2019).
/2/E. Mobini et al.: Laser cooling of ytterbium-doped silica glass, Communications Physics 3, 134 (2020).



proof of laser cooling in SiO₂ glass /1/. The samples, developed at Fraunhofer IOF, exhibit very low background losses as well as low photodarkening. Both mechanisms would contribute to heat generation in the material. Additionally, the tailored doping concentrations render the materials predestined for laser cooling purposes.

The anti-stokes fluorescence cooling experiments have been conducted at the University of New Mexico using a specialized experimental setup. The doped samples were placed in a vacuum chamber and excited with a pump laser at 1053 nm; the resulting spontaneous emission at a mean wavelength of 1010 nm led to the cooling of the samples. Temperature changes of up to -0.7 K have been measured (Fig. 2). The successful experimental proof of laser cooling in a Yb-doped SiO₂ material opens new possibilities for instance for the application in vibration-free cooling of (fiber) lasers and the realization of radiation balanced fiber lasers.

In addition to laser cooling, it was possible to extract the quantum efficiency of the Yb-doped materials from these measurements, which are up to 99.3 % - thus, near the theoretically possible quantum efficiency of 100 %. In future investigations, the geometry of the samples will be adapted to achieve even larger cooling effects.

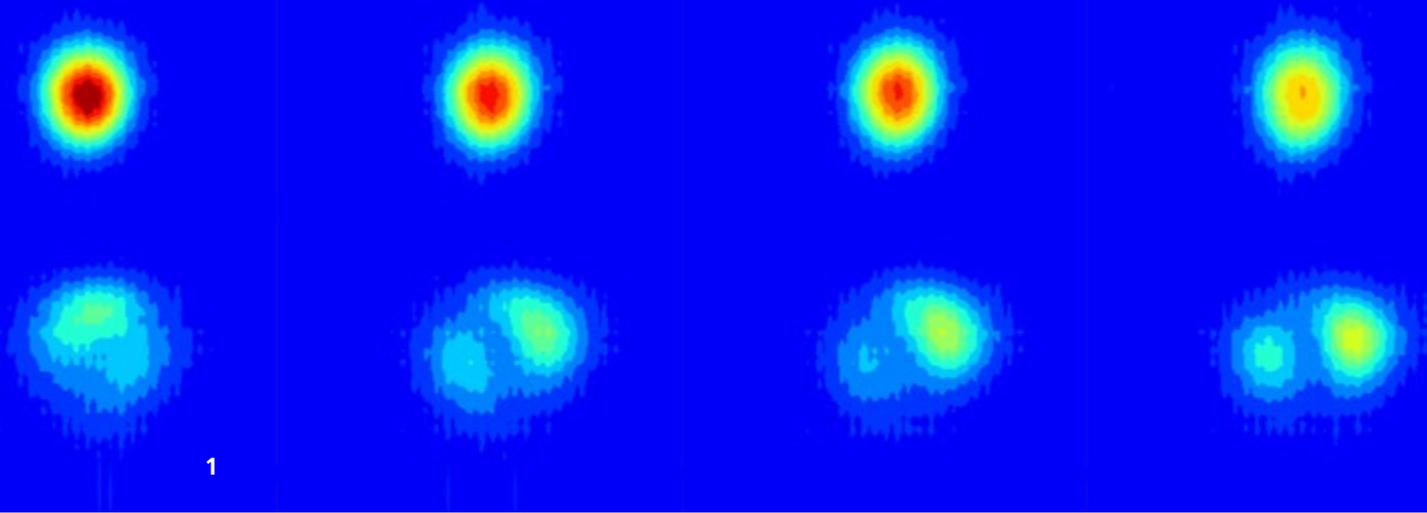
AUTHORS

Stefan Kuhn
Nicoletta Haarlammert
Thomas Schreiber
Esmail Mobini¹
Arash Mafi¹

¹University of New Mexico, USA

CONTACT

Dr. Stefan Kuhn
Phone: +49 3641 807 723
stefan.kuhn@iof.fraunhofer.de



MODENINSTABILITÄTEN IN PASSIVEN FASERN – EINBLICKE IN DEN HOCHLEISTUNGSFASERLASER MODE INSTABILITIES IN PASSIVE FIBERS - A LOOK INSIDE HIGH POWER FIBER LASERS

Hochleistungsfaserlaser haben sich in den letzten Jahren als effiziente und verlässliche Werkzeuge im Bereich der Materialbearbeitung etabliert. Diese Systeme sind in ihrer Brillanz durch thermisch ausgelöste Modeninstabilitäten limitiert, welche ab einer bestimmten Leistung Strahlprofilchwankungen durch dynamischen Energieaustausch zwischen transversalen Fasermode verursachen. Allerdings war bislang ungeklärt, ob auch nichtlineare Verstärkung durch Ramanstreuung durch ihre Quantendefektwärme solche Modeninstabilitäten erzeugen können. Im Gegensatz zu normalen laseraktiven Medien werden hierbei keine realen Energieniveaus mit signifikanter Lebensdauer, sondern virtuelle Niveaus mit fs-Lebensdauern genutzt. Energie kann also nicht wesentlich in Form von angeregten Molekülen gespeichert werden. Durch angeregte optische Phononen verbleibt allerdings Energie im Material, welche sich final durch thermische Dissipation in Wärme umwandelt. Eine solcher Verstärkung benötigt keine aktiv dotierte Faser – sie findet tatsächlich in jeder Faser bei ausreichend hoher Leistung automatisch statt. Dabei ist sie nicht auf exakte Pump- und Signalwellenlängen festgelegt und wird lediglich durch deren spektralen Abstand voneinander bestimmt.

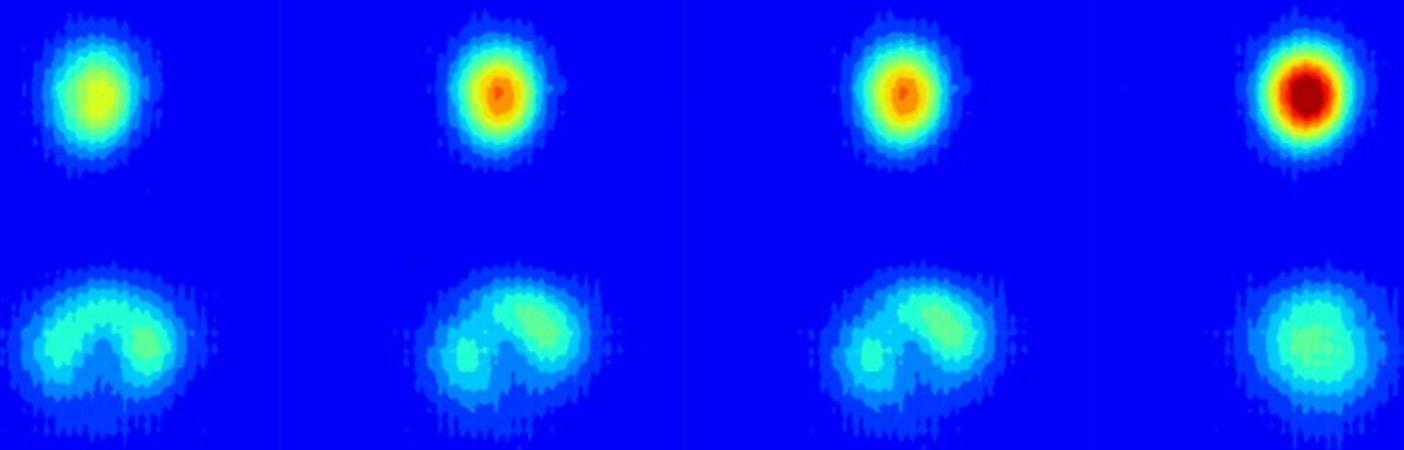
Zur Untersuchung der Auswirkungen von dieser sogenannten Ramanverstärkung auf die Modeninstabilität ist es notwendig,

Over the last years, high power fiber lasers have been established as efficient and reliable tools for material processing. In terms of brightness, however, these systems are limited by thermally induced mode instabilities, which cause fluctuations in the beam profile due to dynamic energy exchange between transverse fiber modes once a certain threshold power is exceeded.

However, until recently, it was unknown whether such mode instabilities could also be caused by nonlinear amplification through stimulated Raman scattering. While this process also includes a quantum defect and thus causes heat, there are, in contrast to active laser material, non-real energy levels with significant lifetime involved. Rather, the effect features virtual energy levels with femtosecond lifetimes and thus can not store energy in excited molecules. However, energy in the form of excited phonons remains in the material, which eventually converts to heat via thermal dissipation. Raman amplification does not require active ion doping in fibers but automatically occurs in fibers at sufficiently high power. It is not limited to certain pump or signal wavelengths but rather only defined by their respective spectral distance.

To investigate the impact of Raman amplification on mode instabilities, it is necessary to take a look into the high power

¹ *Strahlprofile des ramanverschobenen (Stokes) Strahls (oben) und des Pumpstrahls (aus dem Yb-Faserlaser, unten) zu verschiedenen Zeitpunkten. | Beam profiles of raman-shifted (Stokes) and pump beam (from Yb-fiber laser, bottom line) at different points in time.*

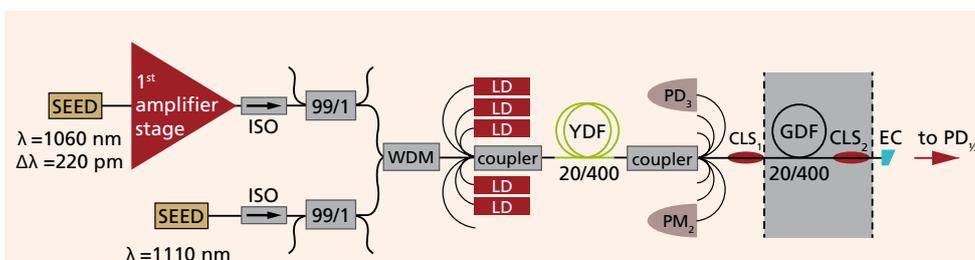


an unterschiedlichen Stellen in ein Hochleistungsfasersystem Einblick zu nehmen – während des Laserbetriebs. Dazu nutzte das Fraunhofer IOF Pumplichtkoppler, die in den Faserlaser eingebracht werden konnten. Die Koppler haben eine Filterwirkung für die höheren Moden und machen deren Licht an den Kopplerausgängen messbar. Treten Modeninstabilitäten vor dem Koppler auf, erhöht sich die hier gemessene Leistung und fluktuiert mit charakteristischer Frequenz.

Mit dieser Technik konnte nachgewiesen werden, dass Modeninstabilitäten auch in passiven Fasern auftreten können. Dann sind sie nicht ausgelöst durch die Wärme des Laserprozesses im aktiven Material, sondern durch stimulierte Ramanstreuung. Dies konnte durch Untersuchung an beiden Seiten der aktiven und der passiven Faser verifiziert werden. Dichroitische Spiegel und eine Hochgeschwindigkeitskamera zusammen mit einem Algorithmus zur Modenzerlegung ermöglichten eine genaue Untersuchung der Dynamik am Faserausgang im Vergleich zum Verhalten am Faserkoppler. Der Nachweis von Modeninstabilitäten in einer passiven Faser ist von großer Bedeutung für Lasersysteme mit langen Transportfasern, z. B. für Anwendungen wie laserbasierte Tieflochbohrungen.

fiber system at different positions - during high power operation. To this end, fiber pump couplers were used at Fraunhofer IOF, which could be incorporated into the fiber laser. These couplers have a filtering effect on the higher-order modes, making their light measurable at the coupler's output ports. In the case of mode instabilities, the power at these coupler ports increases and fluctuates with a characteristic frequency.

Using this technique, it could be demonstrated that mode instabilities can also occur in passive fibers. In this case, they are not caused by the quantum defect heat from the laser process in the active material, but by stimulated Raman scattering. This could be verified by investigating the light at both sides of the active and the passive fiber in a specifically designed high power fiber system. Dichroic mirrors and a high-speed camera along with an algorithm for modal decomposition enabled a detailed study of the dynamic at the fiber output in comparison to the behavior at the coupler ports. The verification of mode instabilities in a passive fiber is of high importance for laser systems with long transport fibers, for example for applications such as laser-based deep hole drilling.



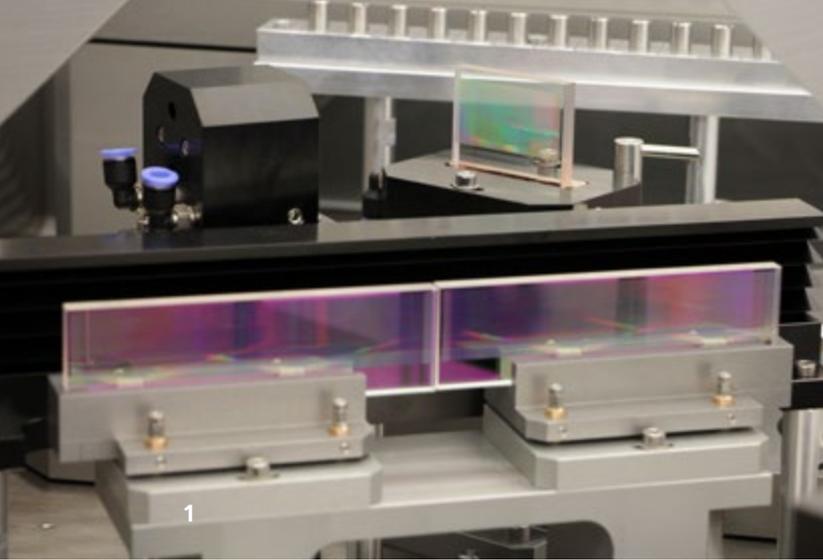
2 Aufbau des Messsystems. Die ramaninduzierten Modeninstabilitäten entstehen in der grau unterlegten passiven Faser. | Measurement setup. Raman-induced modal instabilities originate in the passive fiber in the gray region.

AUTHORS

Victor Distler
Friedrich Möller
Till Walbaum
Thomas Schreiber

CONTACT

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



SPEKTRALE STRAHLKOMBINATION BIS ZU 20 KW BEUGUNGSBEGRENZTER AUSGANGSLEISTUNG SPECTRAL BEAM COMBINING UP TO 20 KW OUTPUT POWER & DIFFRACTION-LIMITED BEAM QUALITY

Hochleistungsfaserlaser kombinieren in herausragender Weise eine exzellente Strahlqualität mit Ausgangsleistungen bis in den Multi-kW-Bereich, die sie durch die große Oberfläche ihres Verstärkungsmediums thermisch stabil erreichen können. Sie sind daher besonders von Interesse, wenn hohe Leistung zum Überwinden großer Entfernung oder Erzeugen hoher Intensitäten auf kleiner Fläche benötigt wird. Der Leistungsskalierung einzelner Faserlasersysteme sind jedoch durch nichtlineare Effekte, verfügbare Pumpbrillanz und thermische Effekte Grenzen gesetzt. Auch die Strahlqualität kann durch sogenannte thermisch induzierte transversale Modeninstabilitäten im Bereich höchster Leistungen leiden.

Jenseits der Skalierungslimits einzelner Faserlaser können daher Strahlkombinationsverfahren eine Möglichkeit bieten, die Ausgangsleistung beugungsbegrenzter Lasersysteme weit in den zweistelligen Kilowattbereich und darüber hinaus zu erhöhen. Am Fraunhofer IOF wurde daher ein System zur spektralen Strahlkombination auf Basis reflektiver Beugungsgitter entwickelt. Hierbei wird das Funktionsprinzip eines Gitterspektrometers umgedreht: mehrere Strahlen unterschiedlicher Wellenlängen fallen unter individuell angepassten Winkeln auf ein Gitter.

High power fiber lasers provide a unique combination of excellent beam quality and output power levels in the multi-kW range. These are enabled by their advantageous heat dissipation properties, which allow for thermally stable operation at the highest power. They are therefore particularly interesting wherever there is a need for laser light to reach long distances or to provide high intensity by tight focusing. However, the power scaling of individual fiber lasers is limited by nonlinear effects, as well as by available pump brightness and thermally component damage or previously occurring fluctuations. The latter can manifest in modal instabilities that deteriorate beam quality through dynamic exchange of power between transverse fiber modes at high output power.

Beyond the scaling limits of individual fiber lasers, beam-combining schemes can be applied to increase further the output power while still maintaining diffraction-limited beam quality. These can allow for dual-digit kilowatt power levels. Fraunhofer IOF has thus developed a system to combine multiple fiber lasers spectrally by using reflective diffraction gratings. The working principle rotates a grating spectrometer: multiple beams with different wavelengths incidence onto a grating at individually adjusted incident

1 Hochleistungsgitter zur spektralen Kombination im Multi-kW-Bereich. |

Diffraction gratings for high power spectral beam combining.

2 Spektrales Kombinationssystem mitsamt zugehöriger Lasersysteme. |

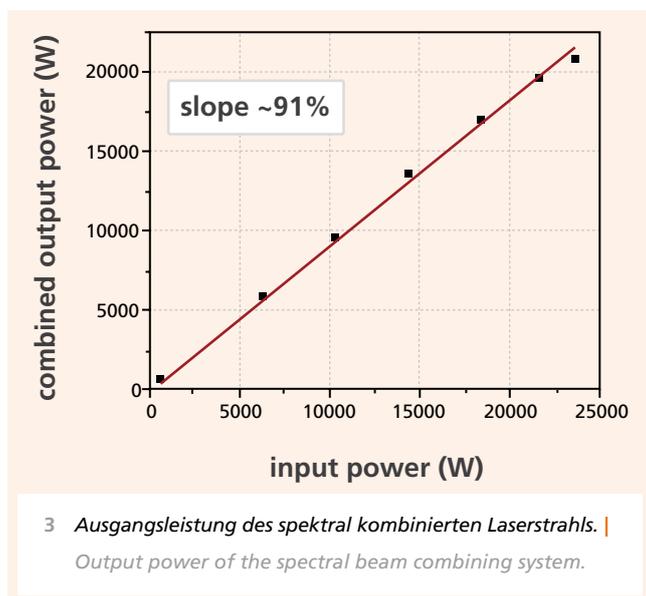
Spectral beam combining laser system, including input lasers.

Durch die Beugung werden alle Strahlen unterschiedlich aus ihrer Einfallsrichtung abgelenkt und damit unter identischem Winkel reflektiert. Es entsteht ein kombinierter Strahl mit der Summe der Leistungen der Einzelstrahlen. Für schmalbandige Einzelstrahlen bleibt dabei die Strahlqualität nahezu unverändert.

Das spektral kombinierte Hochleistungssystem am Fraunhofer IOF basiert auf hausintern hergestellten Beugungsgittern mit Effizienzen $> 96,5\%$ für alle Polarisationen. Zwei dieser Gitter werden verwendet, um zwölf ytterbiumbasierte Hochleistungsfaserlaser zu überlagern und die jeweilige bandbreitenbedingte Winkeldispersion der Einzelstrahlen auszugleichen. Auf diesem Weg kann eine Ausgangsleistung von 20 kW bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität erreicht werden. Das Kombinationssystem ist dabei vollständig eingehaust.

angles. Due to their different diffraction angles, all beams are diffracted under the same output angle, effectively forming a single multi-color laser beam. For narrow-line-width lasers, this results in an output beam with the sum of the input powers and nearly unchanged beam quality.

The spectrally combined high power system at Fraunhofer IOF is based on in-house diffraction gratings with efficiency $> 96.5\%$ for all polarizations. These are employed in a dual-grating configuration to combine twelve high-power ytterbium fiber lasers and compensate simultaneously for the angular dispersion caused by the individual lasers' linewidths. This way, the output power could be scaled to 20 kW at nearly diffraction-limited beam quality from a fully housed system.

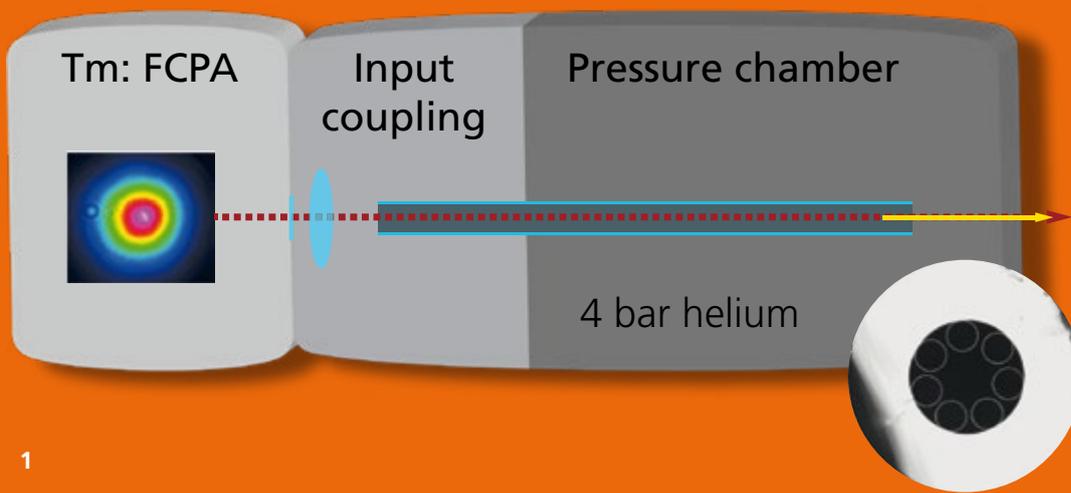


AUTHORS

Till Walbaum
Marco Plötner
Maximilian Strecker
Sascha Ehrhardt
Thomas Schreiber

CONTACT

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



1

FASERBASIERTE WEICHE RÖNTGENQUELLE FIBER-BASED SOFT X-RAY SOURCE

Kohärente Quellen, welche einen hohen Photonenfluss im weichen Röntgenbereich liefern, sind von großem Interesse für Applikationen in der Grundlagenforschung und den Biowissenschaften. Allerdings sind derartige Quellen derzeit nur an Großforschungseinrichtungen (Synchrotrone und Freie-Elektronen-Laser) oder durch aufwendige Lasertechnologie (Erzeugung hoher Harmonischer mit Laserpulsen von sehr hoher Spitzenleistung) zugänglich. /1/

Als eine nutzerfreundliche Alternative stellen wir eine kohärente weiche Röntgenquelle vor, welche sich durch die Kombination von zeitlicher Selbstkompression der Laserpulse und Erzeugung hoher Harmonischer in ein und derselben Hohlkernfaser auszeichnet. Dadurch werden ein kompakter, faserintegrierter Aufbau (Abb. 1) und annehmbare Anforderungen an die treibende Lasertechnologie ermöglicht. Zunächst werden 250 μJ -, 100 fs-Pulse eines Thulium-dotierten Faser-CPA (Tm:FCPA) /2/ in eine antiresonante Hohlkernfaser eingekoppelt, welche mit Helium gefüllt ist. Durch das Zusammenwirken von Selbstphasenmodulation und anomaler Wellenleiterdispersion können Pulse mit einer Dauer von wenigen optischen Zyklen am Ende der Faser erzeugt werden. Diese Pulse sind intensiv genug, um das Gas zu ionisieren /3/. Die so erreichte Tunnelionisation ist der notwendige, initiale Schritt zur Erzeugung hoher Harmonischer. Wird der Gasdruck so gewählt, dass am Faserende die Phasengeschwindigkeiten von treibendem Laser und der harmonischen Strahlung gleich sind (Phasenan-

Coherent sources, providing high photon flux in the soft X-ray region, are interesting for applications in fundamental research and life science. However, such sources are currently only available at large-scale research facilities (synchrotrons and free-electron lasers) or are based on complex laser technology (generation of high harmonics with very high peak power laser pulses). /1/

Herein, we describe a user-friendly, alternative soft X-ray source, which is based on the combination of temporal laser pulse self-compression and high harmonic generation in the same hollow-core fiber. This enables a compact, fiber-integrated setup (Fig. 1) and reasonable requirements for the driving laser technology. First, 250 μJ -, 100 fs-pulses from a thulium-doped fiber CPA (Tm:FCPA) /2/ are coupled to an antiresonant hollow-core fiber, which is filled with helium gas. The interplay of self-phase modulation and anomalous waveguide dispersion leads to the formation of few-cycle pulses at the fiber end. These pulses are intense enough to ionize the gas /3/. The ionization is the initial step for the generation of high harmonics. If the gas pressure is chosen such that the phase velocities of the driving laser and the harmonics are equal, it is possible to generate a macroscopic photon flux.

Fig. 2 presents a generated soft X-ray spectrum, which extends into the "Water Window". Due to the progressively increasing laser intensity within the hollow-core fiber, the concept described herein is especially interesting for scaling the repetition rate

1 *Prinzipieller Aufbau der faserbasierten weichen Röntgenquelle. Die Erzeugung hoher Harmonischer erfolgt direkt am Ende der Faser (gelber Pfeil). Unten rechts: Mikroskopaufnahme der Faserendfläche. | Setup of the fiber-based soft X-ray source. High harmonics are generated directly at the fiber end (yellow arrow). Bottom right inset: Microscope image of the fiber end facet.*

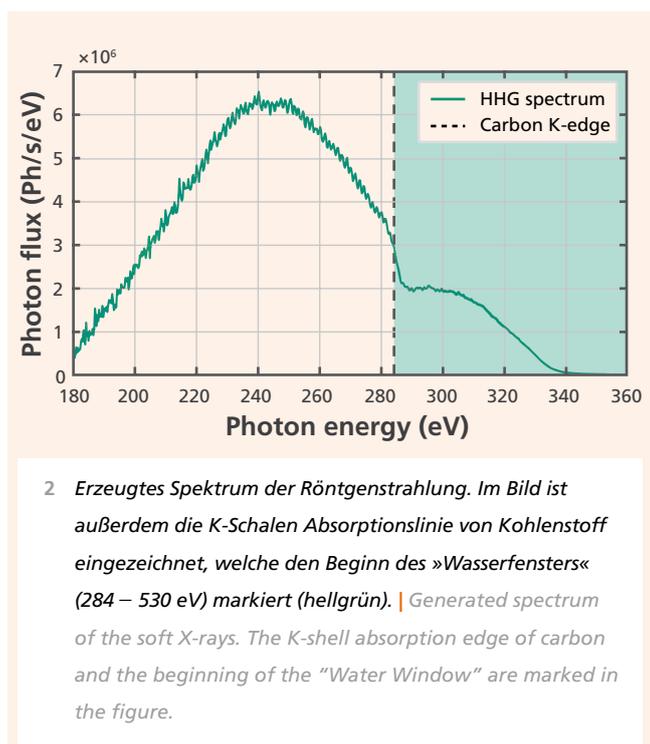
passung), kann ein makroskopischer Photonenfluss erzeugt werden.

Abbildung 2 zeigt ein Spektrum der erzeugten Röntgenstrahlung, welches bis in das applikationsrelevante »Wasserfenster« reicht. Aufgrund der Erhöhung der Laserintensität innerhalb der Hohlkernfaser ist das hier vorgestellte Konzept besonders interessant für die Skalierung der Repetitionsraten von kompakten, kohärenten Röntgenquellen (hier 100 kHz). Die Ergebnisse repräsentieren den höchsten Photonenfluss im »Wasserfenster« mit > 1 kHz Repetitionsrate.

(herein: 100 kHz) of table-top coherent X-ray sources. The results presented herein represent the highest demonstrated photon flux in the water window at a repetition rate > 1 kHz.

References / Literatur

- /1/ L. Young et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 51(3), 032003 (2018).
- /2/ J. Limpert et al.: in 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, paper cj_10_1.
- /3/ M. Gebhardt et al., Opt. Lett. 42(20), 4179 (2017).



AUTHORS

Martin Gebhardt
Tobias Heuermann
Robert Klas
Jan Rothhardt
Jens Limpert

CONTACT

Prof. Dr. Jens Limpert
Phone +49 3641 9-47811
jens.limpert@iof.fraunhofer.de



FRAUNHOFER IOF – PHOTONIK WEITERDENKEN FRAUNHOFER IOF - BOOSTING PHOTONICS

Die Forschung und Anwendung von Licht – die Photonik – ist eine der Schlüsseltechnologien für die nächsten Jahrzehnte. Mit ihr wird man die Suche nach Lösungen für viele Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft entscheidend voranbringen können. Die Photonik wird der Medizin neue Einblicke und Therapiemöglichkeiten eröffnen, die Interaktion von Menschen und Maschinen intuitiv und sicher gestalten und die Entwicklung von Systemen ermöglichen, die es uns erlauben, mehr über die Umwelt und das Universum zu erfahren.

Um die Forschung auf diesem Weg zu unterstützen, engagiert sich das Fraunhofer IOF mit einer Reihe von strategischen Projekten, Zentren, Initiativen und Graduiertenschulen. Sie alle verfolgen das Ziel, Rahmenbedingungen zu schaffen, die es der grundlegenden und anwendungsorientierten Forschung ermöglichen, gemeinsame Vorhaben und Ideen schneller und effizienter in Anwendungen zu überführen. Auch die Förderung und Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses zu herausragenden Persönlichkeiten ihres

The research and application of light - the photonics - is one of the key technologies for the next decades. Photonics will decisively advance the search for solutions to many current and future challenges. By providing new technical opportunities, photonics will provide medicine with new insights and therapies, make human and machine interaction intuitive and secure, and enable the development of systems that allow us to learn more about the environment and the universe.

In order to support and develop research along this path, the Fraunhofer IOF is involved in a series of strategic projects, graduate schools, research centers, and initiatives. They all create new conditions that allow fundamental and application-oriented research to work more closely together and transfer joint projects and ideas into applications faster and more efficiently. The promotion and training of young scientists is another very important focus of these projects. On the following pages, the projects and their development status are presented in detail.



Arbeitsgebiets ist ein weiterer, ganz wesentlicher Schwerpunkt der Projektarbeit des Fraunhofer IOF. Die Projekte und ihr Entwicklungsstand werden auf den folgenden Seiten im Einzelnen präsentiert.

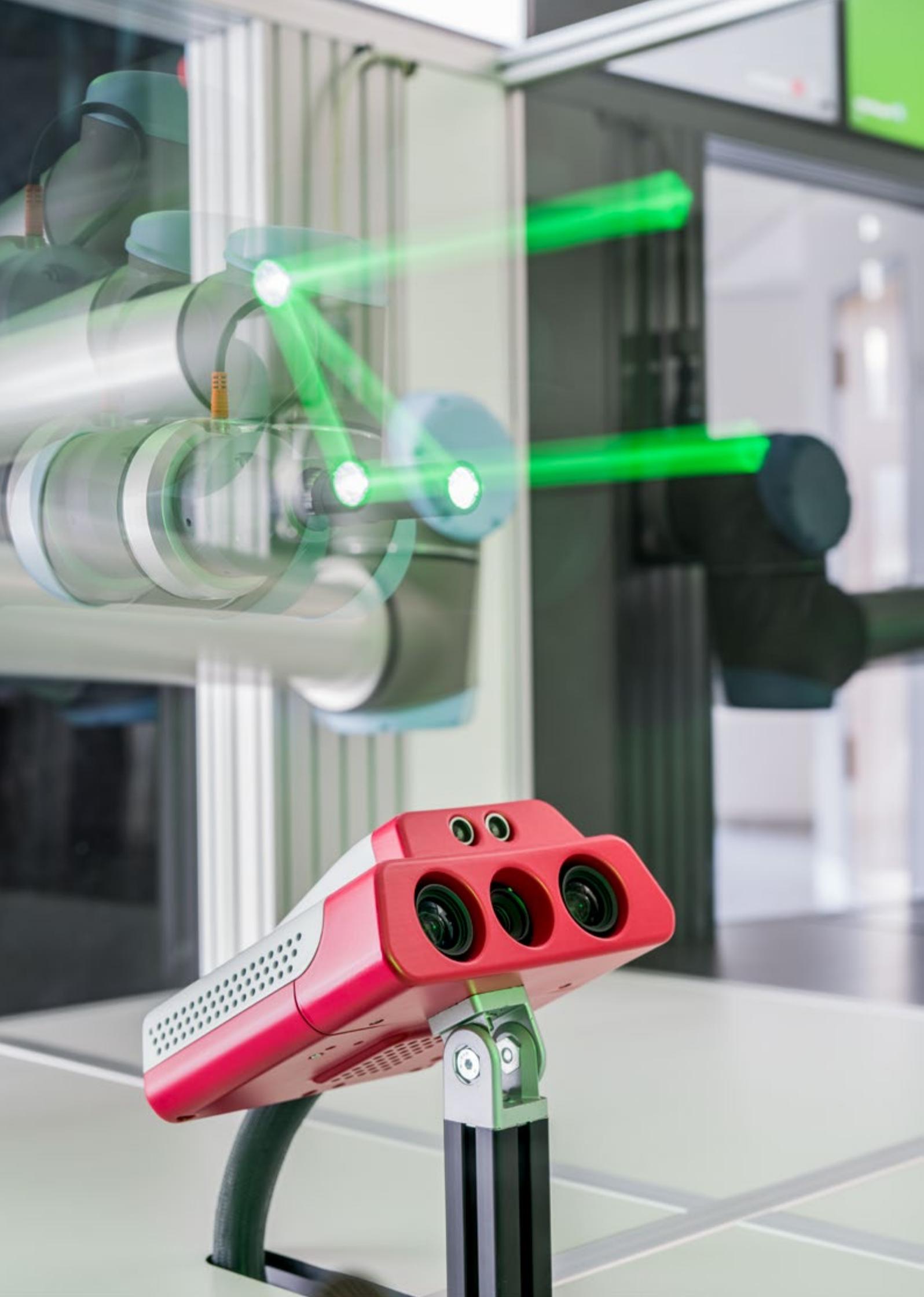
INHALT

Seite 100:	Die Allianz 3Dsensation
Seite 102:	Leistungszentrum Photonik
Seite 104:	Digital Innovation Hub Photonics (DIHP)
Seite 106:	Fraunhofer Projektzentrum MEOS
Seite 108:	Max Planck School of Photonics
Seite 110:	Organisationsentwicklung
Seite 112:	Photonics Manager Compact
Seite 114:	TOF – Maßgeschneiderte optische Fasern
Seite 116:	fo⁺ – Freeform Optics Plus
Seite 118:	Das Institut in Zahlen
Seite 120:	Fraunhofer-Verbund Light & Surface
Seite 122:	Fraunhofer-Gesellschaft
Seite 124:	Namen, Daten und Ereignisse

CONTENT

Page 100:	The alliance 3Dsensation
Page 102:	Center of Excellence in Photonics
Page 104:	Digital Innovation Hub Photonics (DIHP)
Page 106:	Fraunhofer Project Hub MEOS
Page 108:	Max Planck School of Photonics
Page 110:	Organisational development
Page 112:	Photonics Manager Compact
Page 114:	TOF – tailored optical fibers
Page 116:	fo⁺ – Freeform Optics Plus
Page 118:	The institute in figures
Page 120:	Fraunhofer Group Light & Surfaces
Page 122:	The Fraunhofer-Gesellschaft
Page 124:	Names, data, activities

TOP *Fraunhofer IOF bei Nacht. | Fraunhofer IOF at night.*





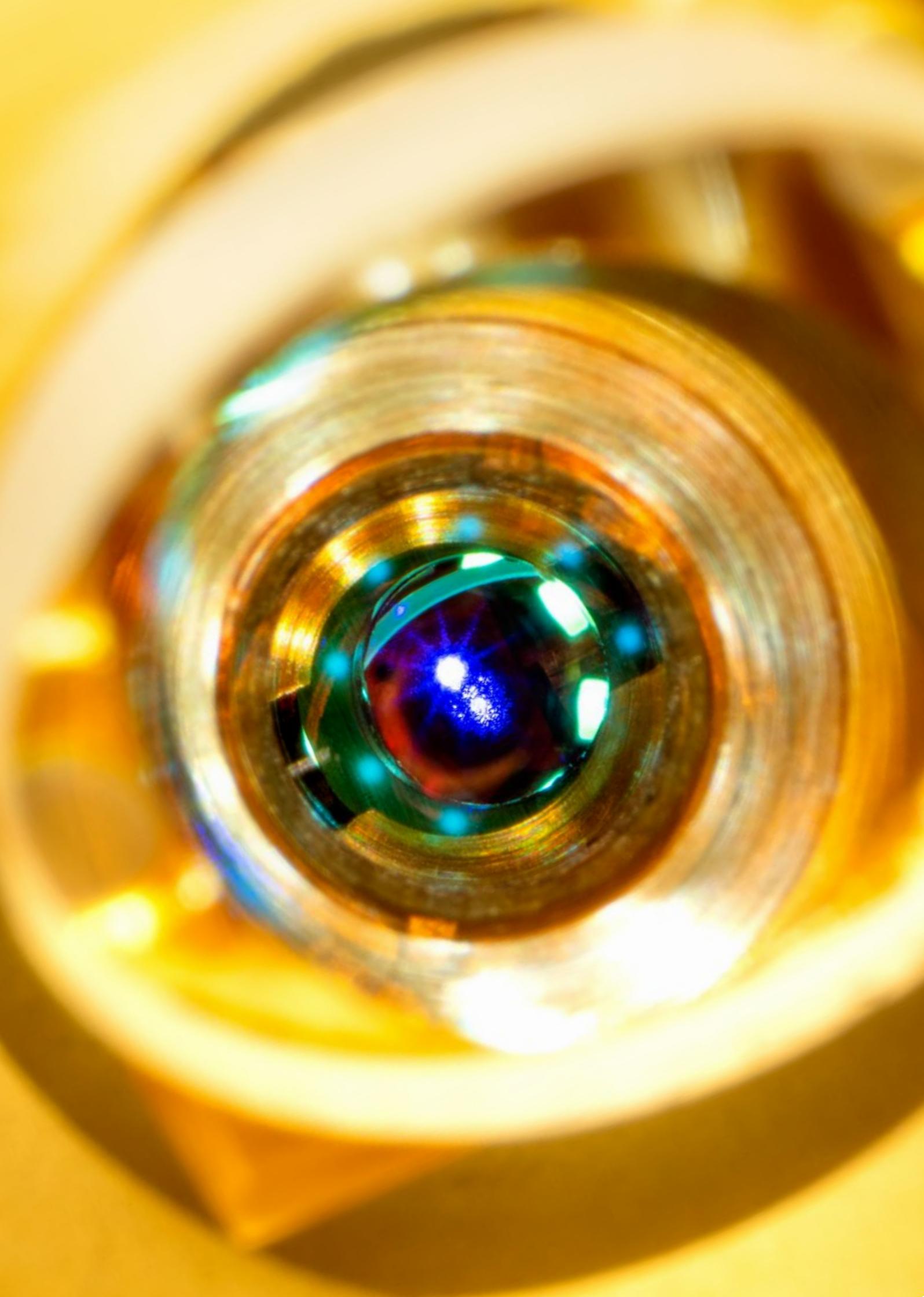
Seit 2013 arbeitet die Forschungsallianz 3Dsensation an der Herausforderung, Durchbruchinnovationen für eine sichere und effiziente Interaktion zwischen Mensch, Maschine und Umwelt zu entwickeln. Für das Gelingen des Vorhabens wurde ein starkes interdisziplinäres Netzwerk von Partnern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft aufgebaut. 3Dsensation wird mit insgesamt 45 Millionen Euro aus dem Förderprogramm »Zwanzig20« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Koordinierungsstelle (mit Sitz am Fraunhofer IOF) begleitet noch bis zum Projektende am 31.12.2021 alle Vorhaben der Allianz. Dass die Arbeit des Konsortiums wichtige Bedarfsfelder adressiert, zeigte sich am hohen Medieninteresse sowie der positiven Resonanz zum Messeauftritt im Rahmen der weltweit größten Fachmesse für Consumer Electronic »CES« in Las Vegas. Exponate aus Nachwuchsforschungsvorhaben konnten viele Gäste und Kooperationspartner begeistern. Auch für die aktuelle COVID-19-Pandemie konnte das bisher erarbeitete Wissen genutzt werden, um zur Bewältigung der Krise beizutragen. Ein Projekt, das sich mit der Entwicklung eines Demonstrators zur Desinfektion von Oberflächen mittels UV-Beleuchtung beschäftigt, fand Anklang beim BMBF und wird mit zusätzlichen Mitteln unterstützt. Die 82 Konsortialpartner arbeiten nicht nur an anwendungsorientierten Lösungen für die Bereiche Gesundheit, Produktion, Mobilität und Sicherheit, sondern widmen sich auch der Erarbeitung einer strategischen Roadmap für die Jahre 2021 – 2025 mit möglichen Verwertungsansätzen für das Konsortium. Die Verwertung der Forschungsarbeit zur Entwicklung kognitiver Systeme, die den Menschen in seinen Lebens- und Arbeitswelten als echte Assistenten und Partner unterstützen, ist einer der nächsten Schritte. Zur Umsetzung dieses Ziels wird eine Kooperation mit der Forschungsvereinigung Feinmechanik, Optik und Medizintechnik e.V. angestrebt. Sie eignet sich als Plattform zur Weiterführung eines 3Dsensation Arbeitskreises aufgrund der gemeinsamen Forschungsthemen sowie der Nähe zum BMWi. Neben der Verstärkung der Marke 3Dsensation ergeben sich für die Konsortialpartner Möglichkeiten, weiterhin Projektideen zu entwickeln und IGF- oder ZIM-Fördermittel zur Umsetzung zu beantragen.

www.3d-sensation.de

Since 2013, the 3Dsensation alliance has been working on the challenge of developing innovations for safe and efficient interaction between humans, machines, and the environment. To ensure the success of the project, a strong interdisciplinary network of partners from business, science, and society has been established. 3Dsensation is funded with a total of 45 million euros from the "Zwanzig20" funding program of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The coordination office will continue to accompany all projects of the alliance until the end of the project on December 31, 2021. The fact that the work of 3Dsensation addresses important areas of demand was demonstrated by the high level of media interest and the positive response to the trade fair appearance at the world's largest trade fair for consumer electronics "CES" in Las Vegas. Exhibits from junior research projects were able to inspire many visitors and cooperation partners. Also for the current Covid-19 pandemic, the knowledge gained so far could be used to contribute to the management of the crisis. A project dealing with the development of a demonstrator for the disinfection of surfaces by means of UV illumination met with the approval of the BMBF and will be supported with additional funds. The 82 consortium partners are not only working on application-oriented solutions for the areas of health, production, mobility, and security but are also dedicated to developing a strategic roadmap for the years 2021 - 2025 with possible exploitation approaches for the consortium. The exploitation of the research work on the development of cognitive systems that support people in their living and working environments as real assistants and partners is one of the next steps. To realize this goal, a cooperation with the Research Association for Precision Mechanics, Optics and Medical Technology is being sought. It is suitable as a platform for the continuation of a 3Dsensation working group due to the common research topics as well as the proximity to the BMWi. In addition to the continuation of the 3Dsensation brand, there are opportunities for the consortium partners to continue to develop project ideas and to apply for IGF or ZIM funding for implementation.

LEFT *Echtzeit-3D-Erfassung bei der Mensch-Maschine-Interaktion.* |

Real-time 3D tracking for human machine interaction.



Als einrichtungsübergreifende Forschungs- und Transferplattform des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, des Instituts für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena, der Leibniz-Institute IPHT und HKI sowie des Helmholtz-Instituts Jena HIJ verbindet das Leistungszentrum Photonik die Kompetenzen seiner Partner zu einem einzigartigen Innovationsökosystem. Der gemeinsamen Mission der 16 Leistungszentren der Fraunhofer-Gesellschaft folgend, entwickelt es innovative Lösungen mit Licht und fördert deren Umsetzung in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Neben den etablierten Kooperationsformaten der Auftragsforschung und Lizenzierung adressiert es insbesondere die Transferpfade Ausgründungen, interne und externe Weiterbildung sowie die gesellschaftliche Teilhabe.

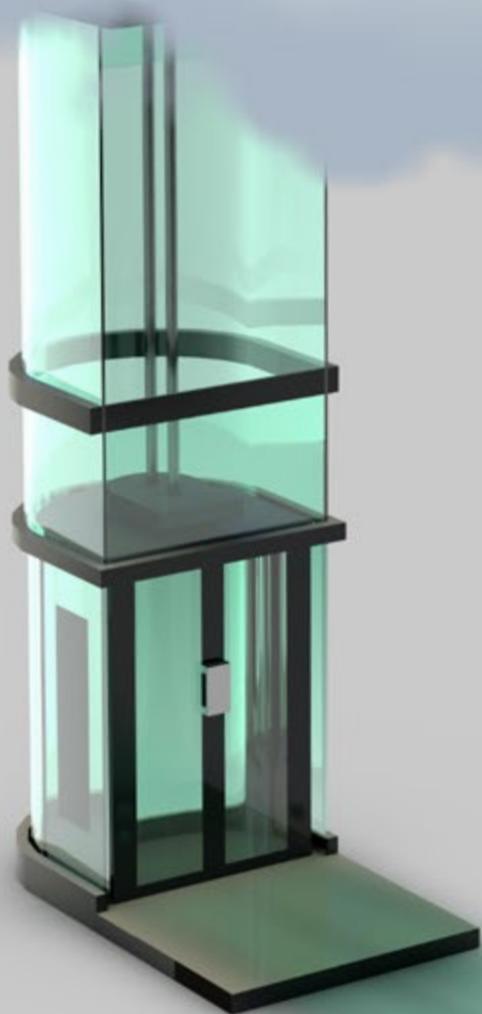
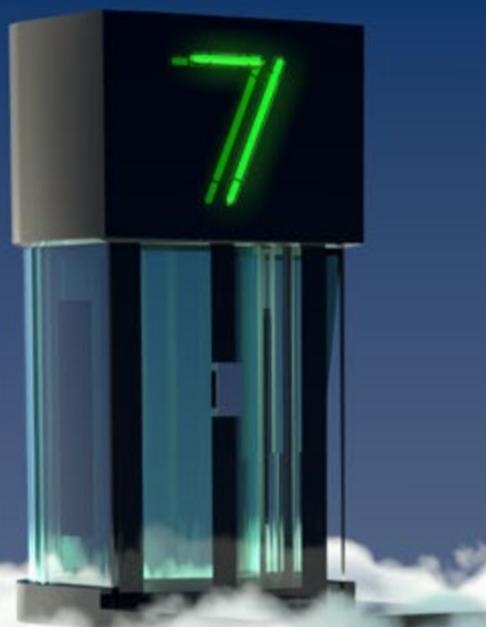
Das vergangene Jahr stellte auch für die Kooperationsplattform besondere Herausforderungen bereit. Durch die Entwicklung neuer Formate und Wege der Zusammenarbeit, wie digitale Elevator Pitches zu den Photonics Days 2020, wurden diese Herausforderungen erfolgreich adressiert und die Fortführung des Leistungszentrums in die dritte Förderphase vorbereitet. In dieser wird das Leistungszentrum Photonik die Entwicklung und den Transfer innovativer Lösungen mit Licht noch stärker in den Fokus setzen, insbesondere durch den Aufbau gemeinsamer »Joint Photonics Labs« mit den Partnerinstituten, die Stärkung des »Digital Innovation Hub Photonics« zur Unterstützung von Start-ups und die Etablierung des Weiterbildungsprogramms »Photonics Manager« für Fach- und Führungskräfte der Optik- und Photonik-Branche.

www.leistungszentrum-photonik.de

As a cross-institutional research and transfer platform of the Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF, the Institute for Applied Physics of the Friedrich Schiller University Jena, the Leibniz Institutes IPHT and HKI, as well as the Helmholtz Institute Jena HIJ, the Center of Excellence in Photonics combines the competencies of its partners to form a unique innovation ecosystem. Following the common mission of the 16 Centers of Excellence of the Fraunhofer Society, it develops innovative solutions with light and promotes their implementation in science, industry, and society. In addition to the established cooperation formats of contract research and licensing, it addresses, in particular, the transfer paths of spin-offs, internal and external training, and social participation.

The past year also presented special challenges for the cooperation platform. By developing new formats and ways of collaboration, such as digital elevator pitches at the Photonics Days 2020, these challenges were addressed successfully and the continuation of the Center of Excellence in Photonics into the third funding phase was prepared. In this phase, the Center of Excellence in Photonics will focus even more on the development and transfer of innovative solutions with light, in particular by establishing "Joint Photonics Labs" with its partner institutes, strengthening the "Digital Innovation Hub Photonics" to support start-ups, and establishing the "Photonics Manager" education program for specialists and managers in the optics and photonics industry.

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



2020 war ein sehr ereignisreiches Jahr in Bezug auf die Gründungsaktivitäten in Optik und Photonik am Beutenberg. So gab es allein am Fraunhofer IOF zwei GmbH-Gründungen: die SPACEOPTIX GmbH im März und die Robust AO GmbH im September. Ein Projekt, das in Kooperation mit dem K1-Gründerservice der Friedrich-Schiller-Universität Jena betreut wird, gewann das EXIST-Gründerstipendium, welches im April begann (Robust AO GmbH). Zusammen mit der Gründung der modern camera design (mcd) GmbH im Jahr 2019, deren Gründer zuvor am Fraunhofer IOF ein EXIST-Forschungstransferprojekt gewonnen hatten, gibt es damit schon vier Ausgründungen während der Laufzeit des Digital Innovation Hub Photonics (DIHP) – einem vom Land Thüringen geförderten Pilotprojekt zur Förderung und Beförderung von Gründungen und Ausgründungen in Optik und Photonik.

Diese rege Gründungsaktivität fand auch in der Presse Beachtung, wie mehrere Online-, Print- und Fernsehberichte zeigen. Die besondere Qualität der Ausgründungen zeigt sich an der Vielzahl an Preisen, die die Teams im Jahr 2020 gewannen, wie z. B. den Thüringer Innovationspreis 2020 an die SPACEOPTIX GmbH. Dies war auch eine große Auszeichnung für die Vorarbeiten der letzten 20 Jahre am Fraunhofer IOF, ohne die diese gar nicht möglich gewesen wäre.

Auch der eigene DIHP »Elevator Pitch«, der im Januar 2020 noch ausgerichtet werden konnte, war sehr erfolgreich. Drei der vier Sieger-Teams gründeten GmbHs (zwei vom Fraunhofer IOF). Ein weiteres Team gewann in diesem Jahr weitere Forschungsförderungen. Für den Pitch wurde eine deutschlandweite Jury am Beutenberg versammelt. Sie umfasste Expertinnen und Experten aus dem Jenaer, Thüringer und Fraunhofer Start-up-Ökosystem sowie hochkarätige Mitglieder aus Industrie und Wissenschaft der Optik und Photonik. Parallel zum Coaching und der Begleitung der Gründungen wurden gemeinsam mit der Rechtsabteilung am Fraunhofer IOF und den entsprechenden Abteilungen der Fraunhofer-Gesellschaft in München mehrere Lizenz- und Kooperationsverträge verhandelt.

2020 was a very eventful year in terms of start-up activities in optics and photonics on the Jena Beutenberg campus. At Fraunhofer IOF alone, two companies were founded in 2020: SPACEOPTIX GmbH (March) and Robust AO GmbH (September). The Robust AO team, co-supervised and co-coached in cooperation with the K1-Gründerservice at Friedrich Schiller University Jena, won the “EXIST-Gründerstipendium”, which began in April. Together with the foundation of modern camera design (mcd) GmbH in 2019, whose founders had won previously an EXIST research transfer project at Fraunhofer IOF, thus far four spin-offs have been generated since the inception of the Digital Innovation Hub Photonics (DIHP) in early 2019 - which is a pilot project funded by the state of Thuringia to promote and foster start-ups and spin-offs in optics and photonics.

This lively start-up activity also attracted press attention, as evidenced by several online, print, and TV reports. The special quality of the spin-offs is reflected in the large number of prizes won by the teams in 2020, exemplified by the Thuringia Innovation Prize 2020 to SPACEOPTIX. This was also a great honor for the preliminary work of the last 20 years at the Fraunhofer IOF, without which this success would not have been possible at all.

The DIHP’s own “Elevator Pitch”, which was able to still take place in January 2020, was also very successful. Three of the four winning teams founded GmbH companies (two from Fraunhofer IOF, see above, and one from Fraunhofer EMI/DLR – ConstellIR, now ConstellIR GmbH). Another team won further research grants. For the pitch, a Germany-wide jury was gathered on the Beutenberg campus, including investors, industry partners, scientists, and other experts. In parallel to the coaching and support of the start-ups, several license and cooperation agreements were negotiated along with the legal department at Fraunhofer IOF and the corresponding departments of the Fraunhofer-Gesellschaft in Munich.



FRAUNHOFER PROJEKTZENTRUM MEOS FRAUNHOFER PROJECT HUB MEOS

Das Fraunhofer Projektzentrum MEOS – »Mikroelektronische und Optische Systeme für die Biomedizin« am Standort Erfurt ist eine Kooperation von drei Fraunhofer-Forschungsinstituten (Photonische Mikrosysteme – IPMS, Zelltherapie und Immunologie – IZI, Angewandte Optik und Feinmechanik – IOF). Gegründet im Oktober 2018 befindet sich das Projektzentrum bis 2023 in der Aufbauphase, die durch die paritätische Anschubfinanzierung aus Mitteln des Freistaates Thüringen und der Fraunhofer-Gesellschaft sichergestellt ist. Ziel der Arbeiten am Projektzentrum sind die gemeinsame Weiterentwicklung von Schlüsseltechnologien im Bereich der Optik und Photonik, Mikroelektronik, Biowissenschaften und künstlicher Intelligenz für die Überführung in biomedizinische Anwendungen. Im Jahr 2020 konnte der zweite Bauabschnitt zum Ausbau der interdisziplinären Labor-Infrastruktur abgeschlossen werden. Mit dem 3D Tech-Lab, dem Quantenapplikationslabor sowie dem Bio-Optischen Labor wurden drei neue Optiklabore eingeweiht und eröffnet. Weiterhin wurden der Reinraum und das Chemielabor in Betrieb genommen. Dadurch konnten bereits erste technologische Entwicklungen in der biologischen Anwendung vor Ort getestet werden.

At the Fraunhofer Project Hub MEOS – “Microelectronic and Optical Systems for Biomedicine” in Erfurt three Fraunhofer research institutes cooperate, namely the Photonic Microsystems (IPMS), Cell Therapy and Immunology (IZI) and Applied Optics and Precision Engineering (IOF). The Project Hub was founded in October 2018 and is in the start-up phase until 2023. The funding is secured by equal initial financing from the Free State of Thuringia and the Fraunhofer-Gesellschaft.

The goal of the research activities at the Project Hub is the common further development of key technologies in the areas of optics and photonics, microelectronics, life sciences, and artificial intelligence to biomedical applications.

In 2020, the second construction phase for expanding the interdisciplinary lab infrastructure was completed. Three new optical labs, the 3D Tech-Lab, the quantum application lab, as well as the bio-optical lab, were inaugurated. In addition, the cleanroom and the chemical lab were put into operation. Thus, the first technological developments for biological applications could be tested on-site.



Die aktuellen Ergebnisse und erste Prototypen der drei Technologieplattformen »Strukturierte Beleuchtung«, »Advanced Imaging«, »Biofunktionale Oberflächen und Biosensorik« konnten 2020 auf verschiedenen Messen wie den Fraunhofer Solution Days und Konferenzen wie der SPIE Photonics West präsentiert werden.

Zusammen mit Partnern innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft ist es in diesem Jahr gelungen erste weitere Projekte einzuwerben. Ein Beispiel ist das Projekt »Snifits4Health« zur Entwicklung eines Point-of-Care Diagnostik-Testsystems zusammen mit dem Fraunhofer IZI und der Max-Planck-Gesellschaft. Weiterhin sollen im »CoV-2-KomET« Projekt, einem Allianzprojekt im Rahmen der Anti-Covid19-Fördermaßnahme der Fraunhofer-Gesellschaft, alternative Strategien für eine effizientere Sars-CoV2 Diagnose zusammen mit dem Fraunhofer IZI und IWS evaluiert werden.

www.meos.fraunhofer.de

TOP *Fraunhofer Projektzentrum MEOS am Standort Erfurt. |
Fraunhofer Projekt Hub MEOS at the site in Erfurt.*

The current results and prototypes of the three technology platforms "Structured Lighting", "Advanced Imaging", and "Biofunctional Surfaces and Biosensors" were presented at different exhibitions such as the Fraunhofer Solution Days and conferences such as the SPIE Photonics West.

During the last year, additional third-party project funds were procured together with partners within the Fraunhofer-Gesellschaft as well as external partners. One such project is "Snifits4Health", which aims at developing a point-of-care diagnostic testing system together with Fraunhofer IZI and the Max-Planck-Gesellschaft. Furthermore, in the "CoV-2-KomET" project, a large-scale alliance project that is part of the Anti-Covid19 support measure of the Fraunhofer-Gesellschaft, will address alternative for a more efficient Sars-CoV2 diagnosis together with the Fraunhofer IZI and IWS.

 **Fraunhofer**
MEOS



MAX PLANCK SCHOOL OF PHOTONICS

Die Max Planck School of Photonics (MPSP) nahm in 2020 Fahrt auf. Die Promovierenden der ersten Kohorte haben ihr Studium oder ihre Forschungsarbeiten gerade aufgenommen. Erste große persönliche Treffen waren zum Kennenlernen, Netzwerken und Wissensaustausch geplant. Die COVID-19-Pandemie stellte auch die MPSP vor neue Herausforderungen. Die tragenden Universitäten stellten ihr Studienprogramm innerhalb kürzester Zeit auf digitale Lehrveranstaltungen um, um den Studierenden die Fortführung des Studiums zu ermöglichen. Statt persönlicher Treffen wurden Videokonferenzformate entwickelt und erprobt, um den Austausch zwischen den einzelnen Standorten der MPSP zu ermöglichen. Als Highlights gab es die digitale Spring School und die digitale Autumn School. Es gab ein breites Angebot an Formaten zur wissenschaftlichen Vernetzung wie digitale Postersessions oder Pitchvorträge und Angebote zur persönlichen Weiterbildung mit digitalen Trainings. Einzig für die Arbeit im Labor war es schwierig pandemiegerechte Lösungen zu finden. Mit Hilfe von gezielter Planung von Laborzeiten und Schichtbetrieb konnte aber auch die Forschung aufrecht erhalten werden. Die Notwendigkeit des Umstiegs auf digitale For-

The Max Planck School of Photonics (MPSP) took off in 2020. The Ph.D. students of the first cohort have just started their studies or research work. The first large face-to-face meetings were planned for getting to know each other, networking, and knowledge exchange. The Covid-19 pandemic also presented new challenges for the MPSP. Universities converted their curriculum to digital courses rapidly to enable students to continue their studies. Instead of face-to-face meetings, video conferencing formats were developed and tested to enable exchanges between MPSP locations. Highlights included the virtual Spring School and the virtual Autumn School. There was a wide range of formats for scientific networking, such as digital poster sessions or pitch talks, and offers for personal development with digital training. Only for lab work was it difficult to find pandemic solutions. With the help of targeted scheduling of lab hours and shift work, the research could be maintained. However, the need to move to digital formats due to the pandemic created tremendous momentum in the development of digital teaching, digital exchange meetings, and digital marketing efforts. The MPSP developed competencies in a very short period that



mate durch die Pandemie brachte jedoch einen enormen Schwung in die Entwicklung digitaler Lehre, digitaler Austauschtreffen und digitaler Marketing-Maßnahmen. Die MPSP entwickelte Kompetenzen innerhalb kürzester Zeit, die auch nachhaltig genutzt werden können – in einer Zeit nach der Pandemie. Die Vernetzung der verschiedenen Standorte wird langfristig profitieren, wenn es zusätzlich zu persönlichen Treffen auch mehr und bessere digitale Angebote gibt. Auch die Bestrebung, eine MPSP Community mit Sichtbarkeit in der ganzen Welt aufzubauen, wird durch die Möglichkeit, eine großen Zielgruppe weltweit durch Onlineformate zu erreichen, profitieren.

www.photonics.school

can also be used sustainably in a post-pandemic time. The networking of the different sites will be of benefit in the long run if there are more and better digital offerings in addition to face-to-face meetings. Also, the effort to build an MPSP community with visibility all over the world will benefit from the possibility to reach a large target group worldwide through online formats.



ORGANISATIONSENTWICKLUNG ORGANIZATIONAL DEVELOPMENT

Die Herausforderung

Die COVID-19-Pandemie wurde zum Treiber der Digitalisierung von Arbeitsprozessen am Fraunhofer IOF. Unter der Maßgabe Kontakte zu reduzieren, lernten wir mobiles Arbeiten in unserem Organisationsalltag kennen. Die Anwendung digitaler Werkzeuge wurde zur Notwendigkeit für eine gelingende Zusammenarbeit. Gleichzeitig führte diese neue Arbeitsweise auch zu mehr Flexibilität und Selbstbestimmung in der Arbeitserbringung. Die Möglichkeiten des mobilen Arbeitens sollen daher auch nach der Pandemie gefestigt werden.

Zukunftsbild (Vision)

Zur Förderung der hohen Leistungsfähigkeit des Fraunhofer IOF gilt es, aus einer erfolgreich improvisierten Gegenwart neue Wege für eine solide Zukunft zu eröffnen. Ziel ist es, eine Arbeitsumgebung zu schaffen, in der Menschen gerne arbeiten und das Beste aus sich herausholen. Dazu sind Mut zur Veränderung, Innovation und Weiterentwicklung gefragt.

Lösung

Seit September macht es sich der Arbeitskreis »New Work« zur Aufgabe, Konzepte und Maßnahmen für das Fraunhofer IOF zu

The challenge

The Covid-19 pandemic became the driving force for the digitization of work processes at Fraunhofer IOF. Under the guideline to reduce contact, we learned about mobile working in our daily organizational life. The use of digital tools became a necessity for successful collaboration. At the same time, this new way of working also led to more flexibility and self-determination in work delivery. The possibilities of working remotely should therefore be consolidated even after the pandemic.

Vision

To promote the high performance of the Fraunhofer IOF, it is necessary to open new paths for a solid future from a successfully improvised present. The goal is to create a working environment in which people enjoy working and get the best out of themselves. This requires courage for change, innovation, and further development.

Solution

Since September, the "New Work" working group has made it its task to design concepts and measures for the Fraunhofer IOF that take the institute a step further towards a desirable



gestalten, die das Institut im Sinne neuer Arbeitswelten ein Stück weiter in Richtung einer wünschenswerten Zukunft bringen. Ein Team aus 15 Personen, das den Querschnitt des Instituts repräsentiert, bringt sich mit unterschiedlichen Problemlösungsstilen und einer Vielfalt an Perspektiven aktiv ein. Ziel ist es, Lösungen für die Herausforderungen der neuen Arbeitswelt zu finden, flexible Ansätze der Arbeitsgestaltung zu entwickeln und Formen der Zusammenarbeit zu optimieren. Im Fokus stand 2020 die Entwicklung neuer Rahmenbedingungen für das orts- und zeitflexible Arbeiten am Fraunhofer IOF. Startpunkt hierfür bildete im September eine institutsweite Umfrage zum mobilen Arbeiten, die dabei half, diesbezügliche Erfahrungen und Bedarfe einzufangen. Um die Kommunikation des Arbeitskreises zu den Mitarbeitenden des Instituts und untereinander aufrecht zu erhalten sowie zusätzlich das interne Weiterbildungsprogramm auszubauen, wurde ein informatives Mittagsformat „Lunch & Learn“ aufgebaut. Mitarbeitende teilen hier abwechselnd zu verschiedenen Themen ihr Wissen zu einer möglichen Weiterentwicklung der Zusammenarbeit am Fraunhofer IOF. Für das neue Jahr sind ein Pilotprojekt zur gesunden Wissensarbeit sowie eine Neuausrichtung des Onboarding-Programms geplant. Der Arbeitskreis wird verstärkt die Themen Führung und Agilität bearbeiten.

future in terms of new working environments. A team of 15 people representing the cross-section of the institute actively contributes with different problem-solving styles and a variety of perspectives. The goal is to find solutions to the challenges of the new world of work, develop flexible approaches to work design, and optimize forms of collaboration. In 2020, the focus was on developing new framework conditions for location- and time-flexible working at Fraunhofer IOF. The starting point was an institute-wide survey on mobile working in September, which helped to capture experiences and needs in this regard. To maintain the communication of the working group to the institute and additionally expand the internal training program, an informative lunch format "Lunch & Learn" was established. Here, employees take turns and share their knowledge on a wide variety of topics for possible further development of the cooperation at Fraunhofer IOF. A pilot project on healthy knowledge work and a reorientation of the onboarding program is planned for the new year. The working group will increasingly work on the topics of leadership and agility.

TOP *Arbeitskreis New Work.* | *New Work working group.*



PHOTONICS MANAGER COMPACT

PROGRAMM ZUR BERUFLICHEN WEITERBILDUNG

PROFESSIONAL DEVELOPMENT PROGRAM

Mit dem »Photonics Manager Compact« bietet das Fraunhofer IOF erstmals eine zertifikatsbasierte Weiterbildung an, welche Führungskräfte aus der Industrie mit aktuellen Themen der Forschung auf dem Gebiet der Photonik versorgt.

Die Entwicklung und Ausgestaltung der Weiterbildung wird durch ein 2-jähriges Projekt über das Leistungszentrum Photonik gefördert. Das Projekt ist dabei zu 50 Prozent durch die Fraunhofer Academy finanziert (Laufzeit 10/2019 – 9/2021).

Maßgebliche Ziele des Programms sind, einen Wissenstransfer zu leisten und die Vernetzung der Forschung mit der Industrie zu fördern. Das Fraunhofer IOF, welches weltweit zu den Spitzeneinrichtungen im Bereich der Photonik zählt, nimmt damit eine zentrale Stellung in der Ausfüllung dieser Aufgabe ein.

Gegenstand der Weiterbildung ist ein abgestimmtes Angebot aus verschiedenen Lehreinheiten aus den Bereichen Lasertechnologie, optisches Design, integrierte Photonik und fortgeschrittene optische Systeme, die mit Themen aus dem Leadership ergänzt werden. Die Lehrenden sind Expertinnen und Experten des Fraunhofer IOF und des Instituts für Angewandte Physik (IAP) der Friedrich-Schiller-Universität Jena. COVID-19-bedingt wurde die erste Durchführung der Weiterbildung auf den Juni 2021 verschoben.

Weitere Informationen und Anmeldung:
www.iof.fraunhofer.de/photonics-manager

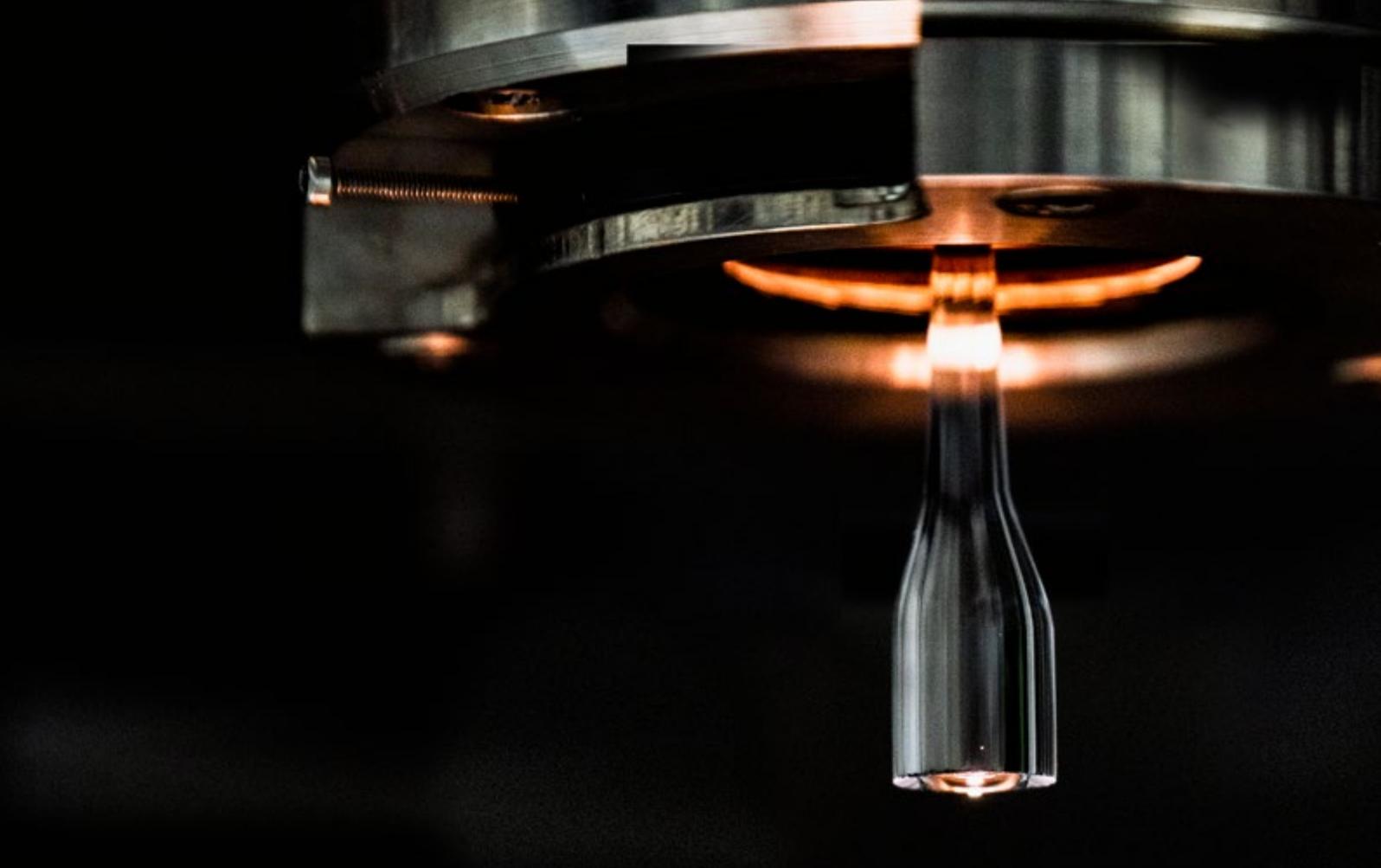
With the "Photonics Manager Compact", Fraunhofer IOF offers for the first time a certificate-based advanced training course, which provides managers from industry with the latest research topics in the field of photonics.

The development and design of the continuing education are sponsored by a 2-year project through the "Leistungszentrum Photonik" (Center of Excellence in Photonics). The project is thereby 50 percent financed by the Fraunhofer Academy (term 10/2019 - 9/2021).

The key objectives of the course are to provide knowledge transfer and to promote networking between research and industry. Fraunhofer IOF, which is one of the world's top institutions in the field of photonics, thus occupies a central position in fulfilling this task.

The subject of the advanced training is a well-rounded range of different teaching units from the fields of laser technology, optical design, integrated photonics, and advanced optical systems, which are complemented by topics from leadership. The lecturers are experts from Fraunhofer IOF and the Institute of Applied Physics (IAP) at the Friedrich Schiller University of Jena.

Due to Covid-19, the first advanced training course has been postponed to June 2021.



MASSGESCHNEIDERTE OPTISCHE FASERN TAILORED OPTICAL FIBERS

Der regionale Wachstumskerns TOF [tailored optical fibers] wurde von Januar 2017 bis Dezember 2019 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Das Bündnis aus 18 Unternehmen und 3 Forschungseinrichtungen des Thüringer Photonik-Sektors entwickelte die Basis zur Nutzung maßgeschneiderter optischer Fasern und Fasersysteme entlang einer gemeinsamen innovativen Technologieplattform. Die Prozesskette wurde erfolgreich an Demonstratoren auf Komponenten- und Systemebene mit dem Schwerpunkt auf Anwendungen in den Bereichen Beleuchtung, Lasermaterialbearbeitung, Textilherstellung, Medizintechnik und Sensorik validiert.

Die Industriepartner sind zukünftig in der Lage, ihren Kunden neuartige Produkte auf fasertechnologischer Basis anzubieten. So zum Beispiel neue Faserschaltmodule mit verringerter Dämpfung, schnelleren Schaltzeiten und stark verkleinerten Baugrößen, für welche speziell im Bündnis entwickelte optische Fasern mit verbesserten mechanischen Eigenschaften wie z. B. einem geringen Biegeradius eingesetzt werden.

The regional growth core TOF [tailored optical fibers] was funded from January 2017 to December 2019 by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The alliance of 18 companies and 3 research facilities of the Thuringian photonic sector developed the basis for the use of tailored optical fibers and fiber systems along with an innovative technology platform. The process chain has been validated successfully by demonstrators at the component and system levels, focusing on applications in the fields of lighting, laser materials processing, textile manufacturing, as well as medical and sensor technologies.

In the current phase, the alliance is exploiting the research and development results obtained. The industrial partners will be able to offer their customers innovative products based on fiber technology: for example, new fiber switching modules with reduced attenuation, faster switching times, and greatly reduced sizes. For this, the optical fibers with improved mechanical properties, such as a small bending radius are used, which are developed by the alliance.

Das Spektrum der Bündnispartner reichte vom kleinen »Hidden Champion« heracle GmbH über die KMUs Active Fiber Systems, LASOS Lasertechnik, GRINTECH GmbH etc. bis hin zum Großunternehmen LEONI Fiber Optics und dem Fraunhofer IOF.

Die Basis für darauf aufbauende fasersensorische Entwicklungen weit größeren Potenzials ist damit geschaffen. Die Partner arbeiten zusammen an weiteren Lösungen, insbesondere auch im Rahmen gemeinsamer Forschungsvorhaben.

Wir danken dem BMBF für die Finanzierung (FKZ 03WKC-V01B, 03WKC-V02D, 03WKC-V03B und 03WKC-V04C) im Rahmen der Initiative »Unternehmen Region – Innovative Regionale Wachstumskerne«.

www.tailored-optical-fibers.net

TOP *Anlage zum Ziehen von optische Fasern. |
Plant for optical fiber drawing.*

The spectrum of the partners of the alliance ranged from the small "hidden champion" heracle GmbH through the SMEs Active Fiber Systems, LASOS Lasertechnik, and GRINTECH GmbH etc. to the large company LEONI Fiber Optics and the Fraunhofer IOF.

The basis for progressive developments in fiber sensor technology with far greater potential is thus created. The partners work together on further solutions, especially in the context of joint research projects.

Funding (grant no. 03WKC-V01B, 03WKC-V02D, 03WKC-V03B, and 03WKC-V04C) within the framework "Unternehmen Region – Innovative Regional Growth Core" of the BMBF is gratefully acknowledged.





FREEFORM OPTICS PLUS FREE YOUR MIND – FORM YOUR OPTICS

Der regionale Wachstumskern *fo+* [freeform optics plus] wird von August 2018 bis Juli 2021 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in einer zweiten Forschungsphase gefördert. Der Verbund bestehend aus neun führenden Photonik-Unternehmen und zwei renommierten Forschungsinstituten entwickelt die Basis für den Einsatz von Freiformoptiken in einen breiteren Anwendungsbereich, einschließlich Lasermaterialbearbeitung, Machine Vision und Automotive Sensing.

Im Rahmen des Projekts wird die in der Region etablierte Technologieplattform »Freiformoptik« im Hinblick auf Replikations-, Segmentierungs-, Referenzierungs- und Messtechnikmethoden erweitert und anhand von Demonstratoren auf Komponenten- und Systemebene validiert.

Im zweiten Projektjahr lud das Bündnis im Rahmen eines öffentlichen Workshops auf der SPIE Photonics West in San Francisco / USA zu einer Reise durch die Welt der Freiformoptik: Vom anspruchsvollen Design über die Materialentwicklung bis hin zur smarten Fertigung, Messtechnik und der Systemintegration. An verschiedenen Stationen wurden von

The regional growth core *fo+* [freeform optics plus] is funded from August 2018 to July 2021 by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in a second research period. The alliance consisting of nine leading photonics companies and two renowned research institutes develops the basis for the use of freeform optics in a broader range of applications including laser materials processing, machine vision, automotive sensing.

As part of the project, the technology platform 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 second year of the project, the alliance invited on a journey through the world of freeform optics at SPIE Photonics West in San Francisco / USA: from the demanding land of design, to the environment of materials, the area of manufacturing and metrology as well as the summit of system integration. At different stages, impulses for new applications in various areas such as imaging or laser



Expertinnen und Experten Impulse für neue Anwendungen in verschiedenen Bereichen wie Bildgebung oder Lasermaterialbearbeitung gesetzt, um u. a. darzustellen, dass Freiformoptiken die Leistung von Lasern, Displays oder Sensoren eines Autos verbessern, ganze Produktionslinien beeinflussen als auch die Bildverarbeitung intelligenter und die Lasermaterialbearbeitung einfacher und kostengünstiger gestalten können.

Das Fraunhofer IOF ist der Koordinator der Forschungs- und Entwicklungsbereiche des Verbundes und präsentierte unter anderem Ergebnisse zu Design und additiver Fertigung eines Topologie-optimierten 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«.

www.fo-plus.de

TOP *Freiformbasierten Tracker für 3D-Scanner.* |
Freeform based tracker for 3D scanners.

materials processing were set by experts to show, among other things, that freeform optics improve the performance of lasers, displays or sensors in a car, influence entire production lines, make image processing more intelligent and laser material processing simpler and more cost-effective.

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



DAS INSTITUT IN ZAHLEN

THE INSTITUTE IN FIGURES

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2020 ist gegenüber dem Vorjahr um 10 % gestiegen, wobei die Aufwendungen für Personal um 19 % stiegen, die Sachausgaben um 1 %. Basis ist der weiterhin hohe Ertragsanteil aus der Auftragsforschung. Der Industrieertrag erreichte über 17,1 Millionen Euro. Die eingeworbenen öffentlichen Mittel erreichten ebenfalls 15,0 Millionen Euro.

Investitionen

Die kontinuierliche Investition in Infrastruktur ist notwendige Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung innovativer Lösungen für unsere Auftraggeber. 2020 wurden insgesamt 11,7 Millionen Euro in die Erweiterung der technologischen Infrastruktur des Instituts investiert.

Personal

Die Zahl der Mitarbeitenden des Fraunhofer IOF ist im Jahr 2020 um 13 % gestiegen. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgt in enger Zusammenarbeit mit

Operating budget

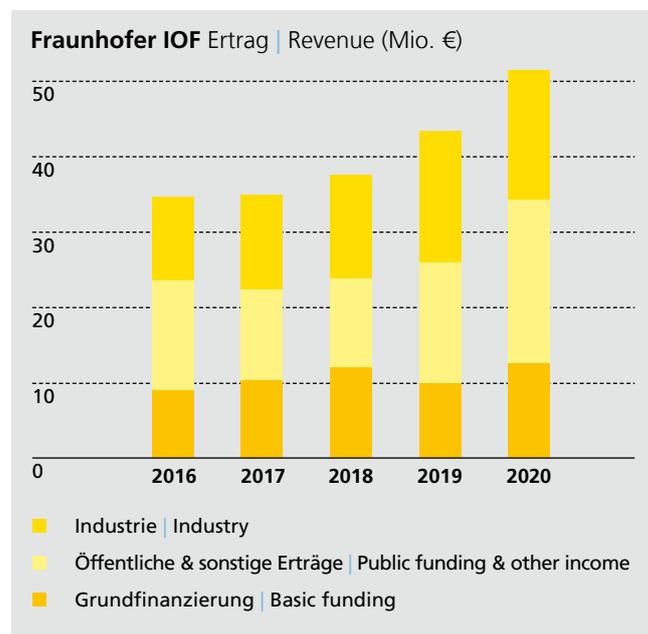
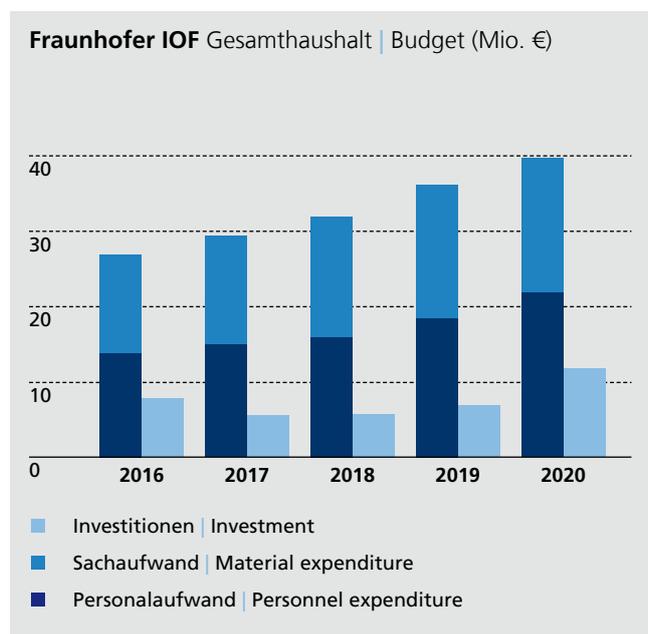
Compared with the previous year the operating budget increased in 2020 by 10 %, with expenditures for staff grow by 19 % and material costs grow by 1 %. The basis is still the high share of revenue from contract research. The industry revenue reached more than 17.1 million euros. The received public funding also reached 15.0 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 11.7 million euros was invested in expanding the technological infrastructure of the institute in 2020.

Staff

The number of employees of the Fraunhofer IOF increased by 13 % in 2020. The training of young researchers is coordinated closely with institutions of higher education,



Hochschuleinrichtungen, insbesondere der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der Ernst-Abbe Hochschule Jena.

Das IAP 2020 in Zahlen

Die Mitarbeitenden des IAP konnten für 2020 Drittmittel in Höhe von 10,2 Millionen Euro einwerben (siehe Tabelle). Zum IAP gehörten 2020 8 Professoren, 44 wissenschaftliche und 17 technische Mitarbeitende sowie 96 Doktoranden und 82 Studierende.

Die große Zahl der abgeschlossenen Qualifizierungsarbeiten ist im Anhang aufgelistet.

in particular the Friedrich Schiller University Jena and the Ernst-Abbe University Jena.

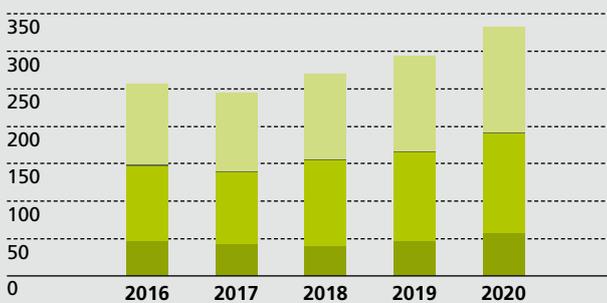
The IAP in figures 2020

Employees at IAP acquired external funds worth 10.2 million euros in 2020 (see table). A total staff of 8 professors, 44 research assistants, 17 technical assistants, 96 doctoral candidates, and 82 students were working at IAP in 2020.

The majority of completed theses are listed in the attachment.

Fraunhofer IOF

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



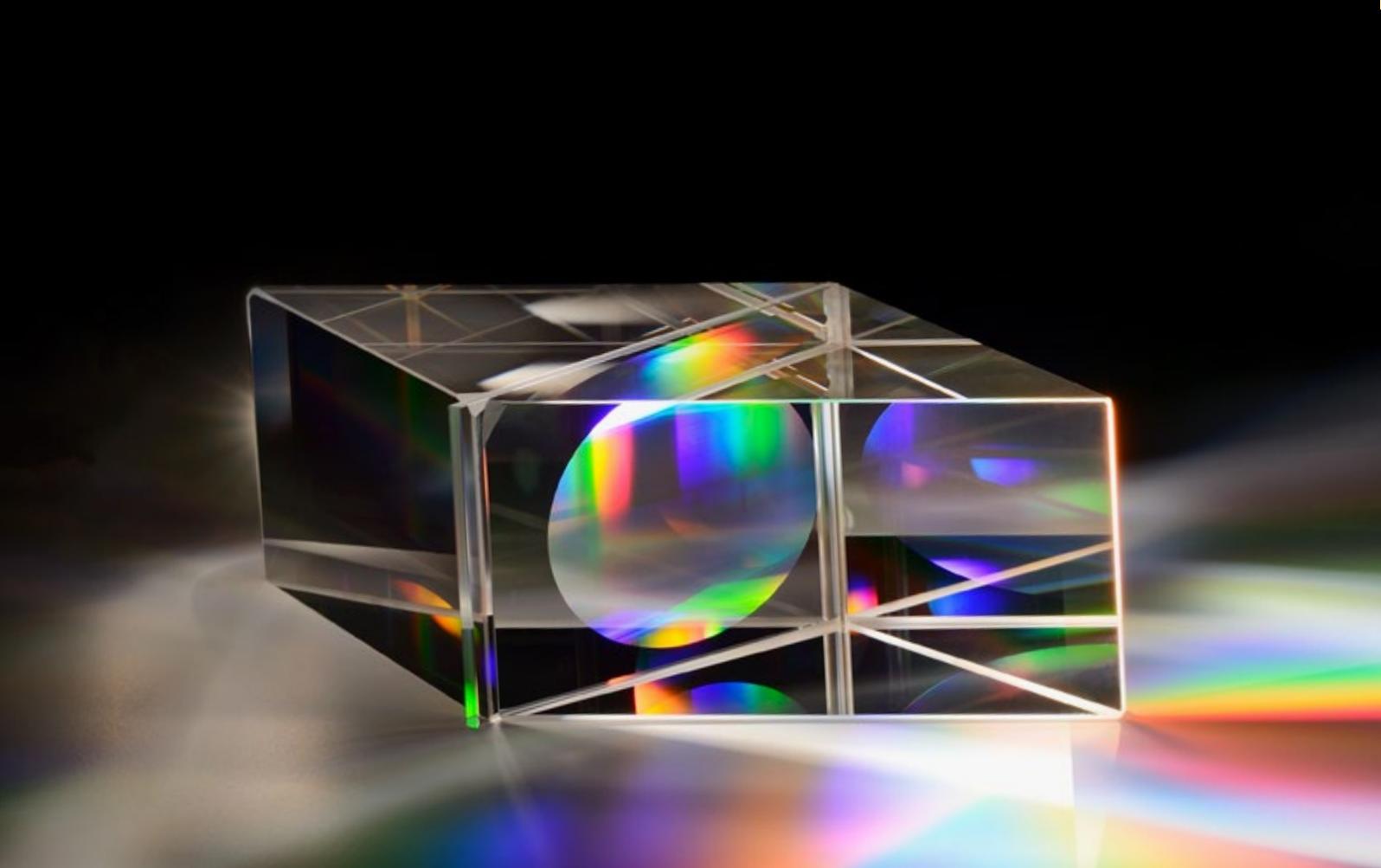
- Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler | Scientists
- Techniker | Technicians
- Auszubildende und Studierende | Students
- Sonstige | Temporary Contracts

IAP

Drittmittleinnahmen IAP 2020 |

Contract research revenue IAP 2020

Fördergeber Contracts with	Zuwendung Funds T€
BMBF	4.177
DFG	1.106
EU	1.421
Thüringen Thuringia	1.386
Stiftungen Foundations	427
Industrie Industry	1.922



FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES FRAUNHOFER GROUP LIGHT & SURFACES

Der Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces bündelt die wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen der Fraunhofer-Gesellschaft in den Themenfeldern Optik, Photonik, Laser- und Oberflächentechnik. Mitglieder sind die Fraunhofer-Institute für:

- Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP
www.fep.fraunhofer.de
- Lasertechnik ILT
www.ilt.fraunhofer.de
- Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
www.iof.fraunhofer.de
- Physikalische Messtechnik IPM
www.ipm.fraunhofer.de
- Schicht- und Oberflächentechnik IST
www.ist.fraunhofer.de

The Fraunhofer Group for Light & Surfaces combines the scientific and technical expertise of the Fraunhofer-Gesellschaft in the fields of optics, photonics, laser and surface technology. Members are the Fraunhofer Institutes for:

- Organic Electronics, Electron Beam and Plasma Technology FEP
- Laser Technology ILT
- Applied Optics and Precision Engineering IOF
- Physical Measurement Techniques IPM
- Surface Engineering and Thin Films IST
- Material and Beam Technology IWS
- Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, HHI (guest institute)

▪ **Werkstoff- und Strahltechnik IWS**

www.iws.fraunhofer.de

▪ **Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut HHI**

www.hhi.fraunhofer.de (Gast-Institut)

▪ **Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB**

www.iosb.fraunhofer.de (Gast-Institut)

In den Instituten des Verbunds forschen über 1900 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf exzellentem wissenschaftlichen Niveau, um komplexe technologische Fragen aus Industrie und Wirtschaft mit Blick auf die konkrete Anwendung zu lösen.

Für die Industrie sind die Institute nicht nur Innovationspartner, sondern in Kooperation mit Universitäten auch eine Quelle für den wissenschaftlich-technischen Nachwuchs und damit eine Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft.

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

▪ **Optronics, System Technologies and Image**

Exploitation IOSB

(guest institute)

In the institutes of the group, more than 1900 scientists conduct research at an excellent scientific level in order to solve complex technological questions from industry and economy with a focus on concrete applications.

For industry, the institutes are not only innovation partners, but also a source of young scientific and technical talent in cooperation with universities and thus provide a bridge between science and industry.

TOP *Prisma-Gitter-Prisma (PGP)-System für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, Präzisionsoptik oder hoch-sensible Interferometer. | Prism-grating-prism (PGP) system for applications in aerospace, precision optics, or highly sensitive interferometers.*

FRAUNHOFER-GESellschaft

RESEARCH OF PRACTICAL UTILITY

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

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

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 75 Institute und Forschungseinrichtungen. Rund 29 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieur-wissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,8 Milliarden Euro. Davon fallen 2,4 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel davon erwirtschaftet Fraunhofer mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund ein Drittel steuern Bund und Länder als Grundfinanzierung bei, damit die Institute schon heute Problemlösungen entwickeln können, die in einigen Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft entscheidend wichtig werden.

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

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

Founded in 1949, the Fraunhofer-Gesellschaft currently operates 75 institutes and research institutions. The majority of our 29,000 staff are qualified scientists and engineers who work with an annual research budget of 2.8 billion euros. Of this sum, 2.4 billion euros are generated through contract research. Around two thirds of Fraunhofer's contract research revenue is derived from contracts with industry and publicly funded research projects. The remaining third comes from the German federal and state governments in the form of base funding. This enables the institutes to work on solutions to problems that are likely to become crucial for industry and society within the not-too-distant future.

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

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

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787 – 1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.

www.fraunhofer.de

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

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

The Fraunhofer-Gesellschaft is a recognized non-profit organization that takes its name from Joseph von Fraunhofer (1787 - 1826), the illustrious Munich researcher, inventor and entrepreneur.

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE NAMES, DATA, ACTIVITIES



Messebeteiligungen | Fairs Participations

Consumer Electronics Show CES

7.-10.1.2020, Las Vegas, USA

DVN-Automotive lighting

28.-29.1.2020, München

SPIE.Photonics West

4.-6.2.2020, San Francisco, USA

GPEC

18.-20.2.2020, Frankfurt

Fraunhofer Solution Days,

26.-29.10.2020, online

Patente | Aus- und Weiterbildung | Education and further training

Die umfangreichen Aktivitäten des Fraunhofer IOF auf dem Gebiet der Aus- und Weiterbildung erstrecken sich von der Ausbildung im Bereich Physiklabortechnik, Industriemechanik und Feinoptik über die Betreuung von Auszubildende im Praktikum, von Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten sowie von Doktoranden, das Halten von Vorlesungen, die Durchführung von Seminaren und Praktika an den Jenaer Hochschulen bis zur Organisation von Workshops und internationalen Konferenzen.

LEFT *Bundeskanzlerin Angela Merkel informiert sich auf dem virtuellen Digital-Gipfel über BMBF-Initiative »QuNET«.* | *Chancellor Angela Merkel learns about BMBF's "QuNET" initiative at the virtual Digital Summit 2020.*

Comprehensive activities of Fraunhofer IOF in the field of education and further training range from professional training of laboratory technicians, industrial mechanics, and optics technicians over the supervision of interns, graduates and postgraduates, giving lectures and seminars at the Jena universities up to the organization of workshops and international scientific conferences.

Vorlesungen | Lectures

Dr. Erik Beckert

Optikmontage

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Dr. Robert Brüning

Geometrische Optik

Optik Grundlagen und Anwendung

Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena

Prof. Dr. Robert Brunner

Digitale Projektion

Mikrooptik

Mikroskopie

Optische Geräte

Spektrale Sensorik

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Dr. Falk Eilenberger

Introduction to nanooptics

Quantum Communication

Friedrich-Schiller-Universität Jena

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Dr. Markus Gräfe
Integrated Quantum Photonics
Quantum Imaging and Sensing
Quantum Optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Herbert Gross
Design and Correction of Optical Systems
Imaging and aberration theory
Lens design I & II
Mathematical Methods in Physics
Optical Metrology and Sensing
Physical Optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Sebastian Händschke
Eine gründungsorientierte Einführung in die BWL
Einführung in die BWL
Bauhaus-Universität Weimar

Kolloquium "Organisationsstrukturen"
Kolloquium "Wissenschaftliches Arbeiten in Management, Marketing und Organisation"
Friedrich-Schiller-Universität Jena

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

Uwe Lippmann
Optical Design with Zemax for PhD
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Stefan Nolte
Atome und Moleküle I
Atome und Moleküle II
Ultrafast optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr. Gunther Notni
Aufnahme und Verarbeitung von 3D Daten
Bildverarbeitung für die Qualitätssicherung
Koordinatenmesstechnik
Systemtechnik und Systemtheorie der Bildverarbeitung
TU Ilmenau

Dr. Reinhold Pabst
BWL für Naturwissenschaftler
Design Thinking
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Thomas Pertsch
Computational Photonics
Computational Physics I
Fundamentals of modern optics
Integrated Quantum Photonics
Introduction to nanooptics
Quantum Optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Fabian Steinlechner
Quantum Communication
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Olaf Stenzel
Structure of Matter
Thin Film Optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Adriana Szeghalmi
Analytical Instrumentation
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Andreas Tünnermann
Analytical Instrumentation
Quantum Communication
Structure of Matter
Thin Film Optics
Friedrich-Schiller-Universität Jena

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

Conferences – Workshops – Events

SPIE.Photonics West
4.-6.2.2020, San Francisco, USA

Photonics Days am Fraunhofer IOF,
21.-22.9.2020, Jena, online

Digital Gipfel,
26.11.-1.12.2020, online

Preise I Prizes

Deutscher Zukunftspreis 2020

Sergiy Yulin

SPIE Felllow

Stefan Nolte

APPLIED PHOTONICS AWARD

Nadja Felde

Innovationspreis Thüringen

Mattias Beier, Marcel Hornaff, André Urbich, Mathias Schulz

Sieger Innovation Camp Sprungkraft

Reinold Pabst

Finalist "Science breakthrough of the Year",

Bereich Engineering and Technology

Andreas Tünnermann

Bachelorarbeiten I Bachelor Theses

Shadi Alsnih

The influence of PVD deposition parameters on the properties of oxide layers deposited on non-flat surface

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Julia Brinkmann

Methoden zur Geschwindigkeitssteigerung bei der messtechnischen Bestimmung von Sticking Image

TU Ilmenau

Jennifer Buchheim

Untersuchungen von Partikelkontamination und ihren Streulichteigenschaften auf Siliziumwafern

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Malte Dubrall

Optimierung der Mustergenerierung eines GOBO-Projektors für die 3D-Messtechnik

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Matthias Gilg

Entwicklung von Methoden zur Defektklassifizierung aus Streulichtdaten

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Theo Habenicht

Topologie-Optimierung, Fertigung und Test eines opto-mechanischen Bauteils für die Anwendung in der Raumfahrt

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Caroline Hahmann

Einfluss beschichtungsrelevanter Vorbehandlungen auf die Oberflächeneigenschaften neuartiger

Polymere für die Optik

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Lukas Koblenz

Bestimmung von Prozessparametern zur Herstellung von sphärischen Mikrolinsen-Arrays mit Hilfe des chemischen Reflow Verfahrens

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Aleana Kraft

Gewerbeimmobilien: Ein Vergleich von Stadt und Land.

Bauhaus-Universität Weimar

Franziska Metz

Geschäftsmodellentwicklung in der Hightechbranche - Erarbeitung von Alleinstellungsmerkmalen und Vermarktungsempfehlungen in der Quantentechnologie

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Darya Piatrova

Beugungseffizienzuntersuchungen an kombinierten Blaze-Gittern

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Hannes Richter

Charakterisierung von ultrakurzgepulsten Lasern

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Sören Rüngeling

Aufbau und Evaluierung einer Messanordnung zur Bestimmung der Winkelabhängigkeit von multispektral auflösenden Filter-On-Chip Snapshot CMOS-Sensoren

TU Ilmenau

Paul-Adam Schmidt

Optimierung eines Messplatzes für die bildgebende Spektroskopie

TU Ilmenau

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Max Schneider

Optische Wirkungsweise verschiedener Mikrostrukturgeometrien auf Oberflächen von Lichtleitern in Display-Hintergrundbeleuchtungen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Georg Schwartz

Tailored side emission profile of femtosecond laser induced scattering centres in optical fibers

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Belkiz Sevic

Vergleichende Untersuchung von herkömmlichen Schneid-/Trennverfahren zu Lasertrennverfahren der Verbindungsstege umspritzter Stanzgitter

TU Ilmenau

Dennis Thelemann

Herstellung und Charakterisierung von Xanthin-Nanostrukturen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Sven Christian Thomsen

Untersuchung der Qualität von veralteten Bohrhakensystemen in deutschen Sportklettergebieten

TU Ilmenau

Tim Turan

Inverse design of metasurface stacks using convolutional neural networks

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Anika Waitz

Veränderung der Substratoberfläche von BK7 in Folge der Ultraschallreinigung mit alkalischen Lösungen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Masterarbeiten | Master Theses

Mohammadreza Absalan

Target imperfection on overlay

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prudhvi Anumula

3D Design, simulation and assembly of optomechanical components in vacuum used for space applications

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Marcus Bambin

Entwicklung, Konstruktion und strukturmechanische Analyse von druckaufnehmenden isolierend beschichteten Elektroden für die piezoresistive Druckmessung

Universität Kassel

Alexander Bergner

Fluoreszenz- und Streulichtmessungen von Zellanhaftungen auf Oberflächen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Adrian Bezler

Immobilienbasen - ein historischer Vergleich

Bauhaus-Universität Weimar

Marie Braasch

Image Reconstruction Algorithms for Ghost Imaging

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Emma Celina Brambila Tamayo

Sagnac-based polarization-entangled photon pair sources for field-deployable quantum applications

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Cibuk Burak

Evaluation of process and surface characteristics during conventional grinding of glassy ceramics

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Emre Cardak

Untersuchung und Verbesserung eines optischen Inline-Prüfsystems mit Hilfe der Messsystemanalyse

TU Ilmenau

Prerana Chakrabarti

Designing an X-ray Pinhole Detector System for Electron Beam Emittance Diagnostics at the 3rd Generation Light Source PETRA III M

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Purujit Singh Chauhan

Design and performance comparison of bulk and waveguide based compact photon pair sources

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Mingdu Chen

Entwurf und Umsetzung eines Verfahrens zur Erstellung einer digitalen Übersichtskarte in der industriellen Bildverarbeitung

TU Ilmenau

Christian Diegel
Qualitätsorientierte Layoutneuplanung einer agilen Fertigung anhand der MetraLabs GmbH in Ilmenau
TU Ilmenau

Luke Ender
SiPM time-of-flight measurement performance in LiDAR systems
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Ali Faysal
Einsatz von GAN-Netzwerken in Machine-Vision-Anwendungen für die industrielle Qualitätssicherung
TU Ilmenau

Riza Fazili
Linear Mach-Zehnder interferometric polarization-entangled photon source
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Samuel Gmünder
Aufbau und Charakterisierung eines Streifenprojektions-systems für die 3D-Formvermessung im UV-Bereich
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Golam Hafiz
Optical Bandgap of TiO₂ PEALD Coatings and Quantizing Structures
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Piet Hessenius
Modellierung der Funktion nanooptischer Strukturen mit Methoden des maschinellen Lernens
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Luise Hötzel
Optimierung der Gesamteffizienz von SMD-Linien
TU Ilmenau

Varun Raj Kaipalath
Spatial decomposition of biphoton states generated in spontaneous parametric down conversion
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Maximilian Karst
Parallelized linear and nonlinear compression in ultrafast multicore fiber laser systems
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Georg Klemm
Testmethodik zur Evaluierung von Antireflexbeschichtungen für starre Endoskope
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Shatnanu Kodgirwar
Evaluation and comparison of 3D measurement for single-shot and multi-shot pattern projection technique
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Margarita Lapteva
Dielectric Interference Coatings on Highly Curved Substrates for Laser Optics at 355 nm Wavelength
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Rongukan Leng
Light scattering from transparent substrates
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Josué Ricardo Leon Torres
Ultra-bright photon pair source via spatial multiplexing for quantum fluorescence microscopy
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Zhouping Lyu
Factorizable photon-pair generation in microstructured liquid-core fibers
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Shan Mustafaw
Cell classification using deep neural network for autofocusing application
TU Ilmenau

Ersin Özkarabacak
Abstimmung und Entwicklung von Schadteil- und Befundungsprozessen
TU Ilmenau

Laura María Palacios Narváez
Development of an autofocusing approach for a robust laser material processing
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Luis Paniagua Rodriguez
Measurement uncertainty and alignment sensitivity during freeform mirror metrology with high performance computer generated holograms
Friedrich-Schiller-Universität Jena

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Dennis Peters

Investigation of HiLo microscopy with step index multimode fibers

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Armin Pickel

Umsetzung einer rein-bildbasierten Verortung einer mobilen Plattform in einer Manhattan-Welt

TU Ilmenau

Susanna Plascencia Orozco

Spatially Encoded Quantum State for application in Quantum Information

Centro de Investigaciones en Óptica, Leon, Mexico

Tatjana Porwol

Mechanische und chemische Beiträge bei der Erzeugung haftfester Nickel-Phosphor-Schichten auf Siliziumcarbid

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Markus Rothe

Dehnungsmessstreifen-basierte Regelung deformierbarer Spiegel für die Lasermaterialbearbeitung

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Michaela Ruhnau

Qualitätsplanung in Kooperation mit Lieferanten zur Reduzierung der Fehlerkosten am Beispiel der B. Braun Avitum Ag

TU Ilmenau

Adrià Sansa Perna

Development of Short-Wavelength Photon Pair Source for Quantum Imaging and Communication

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Daniel Scheufler

Aufbau und Charakterisierung eines 3D-Triangulationsensors mit miniaturisierter GOBO-Projektion bei verschiedenen Wellenlängen

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Mareike Schütt

Krise als Chance für Innovation

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Rana Sebak

Engineering the Spatial Properties of Entangled Photon for Space-readiness

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Alexej Sergienkoj

Untersuchungen zur den erweiterten Anforderungen der IATF 16949:2016 zur DIN EN ISO 9001:2015 und die Implementierung bei der EPSa-Elektronik- und Präzisionsbau Saalfeld GmbH

TU Ilmenau

Kiran Shivaprakash

Comparison between two different interferometric methods to observe and measure the radius and quality of optical surfaces

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Christoph Stolze

Oberflächenprüfung mit KEYENCE-Bildverarbeitungs-komponenten am Beispiel von Mehrschichtverbundrohren mit Aluminiumeinlage

TU Ilmenau

Stella Strotkötter

Praktische Anwendung industrieller Bildverarbeitung zur Qualitätssicherung im Umfeld der Instandhaltung von Flugzeugtriebwerken bei der N3 Engine Overhaul Services GmbH & Co. KG (N3)

TU Ilmenau

Yiming Tu

Mode decomposition algorithms for the analysis of transverse mode instability

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Roman Tuchner

Untersuchungen zum konstruktiven Entwurf eines modularen Sichtprüfgerätes für die Qualitätssicherung von Leiterplatten

TU Ilmenau

Safi Ullah

Spectral resolved Transmittance, Reflectance, and Scattering Analysis using CMOS Detector matrix-based Scatterometer

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Paul Voigt

Untersuchung von Medusa82-Elektronenstrahlresist für Grautonlithografie

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Michael Völz
Chemisch-mechanisches Polieren von außenstromlos
abgeschiedenen Nickel-Phosphor-Schichten mittels
Subaperturwerkzeugen
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Qichao Wang
Simulation und Erprobung von Methoden und Algo-
rithmen zur orts aufgelösten Spektralwert-rekonstruktion
mit multispektralen Filter-On-Chip CMOS-Sensoren
TU Ilmenau

Sici Wang
Broadband Fourier transform holography in the visible
and the extreme ultraviolet
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Su Weifeng
Untersuchung zur kontaktfreien Vitalparameterschät-
zung auf Basis von multispektralen Videodaten
TU Ilmenau

Jan Willemsen
Messtechnische Charakterisierung, Auswertung und
Gegenüberstellung von CMOS-Sensoren des selben Typs
ohne und mit unterschiedlichen Konfigurationen von
Spezialfiltermatrizen
TU Ilmenau

Henriette Wittig
Erstellung eines Qualitäts- und Workflow-Managements
für ein Beispielunternehmen / Musterunternehmen mit
Hilfe der CAQ-Software CWA SmartProcess
TU Ilmenau

Lucas Zettlitzer
Konstruktive Umsetzung einer Metalloptik für Miniatur-
satelliten
TU Ilmenau

Dissertationen | Dissertations

Dr.-Ing. Andrea Berner
Theory and Application of Induced Higher Order
Color Aberrations
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Christoph Dixon, PhD
Printed Digital Microfluidics for Diagnosis of Disease
University of Toronto, Canada

Dr.-Ing. Lilli Haar
Möglichkeiten des unterstützenden Einsatzes unüber-
wachter maschineller Lernverfahren entlang
der Bildverarbeitungskette
TU Ilmenau

Dr.-Ing. Maximilian Heck
Tailored light propagation by femtosecond pulse written
long period fiber gratings
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Enrico Hilpert
Additive Fertigung einer hypereutektischen Aluminium-
Silizium Legierung zur Herstellung von Spiegelsubstraten
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Philipp Holz
Quantitative bildgebende Oberflächenanalyse mittels
Multiparameter-Fluorometrie
TU Ilmenau

Dr.-Ing. Petr Kuritcyn
Automatisierte Analyse von Bauschuttzyklen auf der
Basis von Bild- und Spektralinformation
TU Ilmenau

Dr.-Ing. Kristin Pfeiffer
Entspiegelung stark gekrümmter Optiken mittels
Atomlagenabscheidung
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Thomas Siefke
Entwicklung von Drahtgitterpolarisatoren für
Anwendungen im ultravioletten bis in den
vakuumultravioletten Spektralbereich
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Christoph Stihler
Transverse mode instability – Insights into modal energy
transfer in high-power fiber lasers
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. rer. nat. Johannes Maximilian Stock
Holistic simulation of optical systems
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr.-Ing. Daniel Thomae
Talbot-Lithografie und deren Anwendung zur Realisie-
rung eines Kreuz-Echelle-Spektrometers
TU Ilmenau

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Dr.-Ing. Stefan Werrlich
Gestaltungskonzept für Augmented Reality unterstütztes
Training an manuellen Montagearbeitsplätzen
TU Ilmenau

Duparré, J.; Wippermann, F.
Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und
Verfahren zum Bereitstellen einer Multiapertur-
abbildungsvorrichtung
CN 110771135 A

Schutzrechte | Intellectual Property

Patentoffenlegungen | Patent First Publications

Wippermann, F.; Reimann, A.; Bräuer, A.
Optische Struktur mit daran angeordneten Stegen und
Verfahren zur Herstellung derselben
US 2020/0018920 A1

Wippermann, F.; Duparré, J.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit geringer
Falschlichtempfindlichkeit, Abbildungssystem und
Verfahren zu Bereitstellen einer Multiapertur-
abbildungsvorrichtung
CN 110892701 A

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, tragbare Vorrich-
tung und Verfahren zum Herstellen einer Multiaper-
turabbildungsvorrichtung
JP 2018-53214

Limpert, J.; Tünnermann, A.; Stihler, C. (FSU);
Jauregui Misas, C. (FSU)
Vermeidung von Modeninstabilität in einer optischen
Verstärkerfaser
EP 3656024 A1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit Optiksubstrat
US 2018/0176471 A1

Wippermann, F.; Duparré, J.; Brückner, A.; Oberdörster, A.
Erzeugung von Panoramabildern
EP 3756339 A2; CN 111903118 A; US 2020/0382702A1

Wippermann, F.; Lange, N.; Pabst, O.
Vorrichtung mit einer Multiaperturabbildungsvorrich-
tung, Verfahren zum Herstellen derselben und Verfahren
zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes
EP 2749711 T3

Pertsch, T.; Eilenberger, F.; Gräfe, M.; Setzpfand, F. (FSU)
Gerät und Verfahren zur Erzeugung hyperspektraler
Bilder eines Objekts
DE 102018210777 A1; WO 2020/002532 A1

Schreiber, T.; Haarlammert, N.
Rückreflexschutz
US 2020/0091674 A1

Risse, S.; Gebhardt, A.; Beier, M.
Optisches Bauteil aus sprödhartem Material mit ultraprä-
zisen Referenz- und Montagestrukturen, Verfahren zur
Herstellung sowie optisches System unter Verwendung
des Bauteils oder Verfahrens
DE 102018120568 A1

Duparré, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem
und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturab-
bildungsvorrichtung
EP 3 632 094 A; CN 110771132 A; JP 2020523625

Gräfe, M.; Gilaberte-Basset, M.; Eilenberger, F.;
Setzpfand, F. (FSU)
Optische Anordnung für fluoreszenzmikroskopische
Anwendungen
DE 102018215831 A1; WO 2020/058074 A1
DE 102018215833 A1; WO 2020/058076 A1

Duparré, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Oberdörster, A.
Vorrichtung zur Abbildung von Teilgesichtsfeldern,
Multiaperturvorrichtung und Verfahren zum Bereit-
stellen derselben
US 2020/0029023 A1; CN 110754081 A

Wippermann, F.; Duparré, J.; Brückner, A.
Vorrichtung mit einer Multiabbildungsvorrichtung zum
Akkumulieren von Bildinformationen
DE 102018222861 A1; WO 2020/127748 A1

Schreiber, P.; Li, C.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Fischer, S.
Segmentiertes Fernlicht mit Multiaperturoptik/
Fernlichtscheinwerfer
DE 102018217213 A1; WO 2020/074508 A1

Schreiber, P.; Li, C.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Fischer, S.
**Abblendlicht mit verringerter Baulänge/
Abblendlichtscheinwerfer**
DE 102018217215 A1; WO 2020/074523 A1

Duparré, J.; Wippermann, F.
**Vorrichtung mit einer Multiaperturvorrichtung zur
Erzeugung einer Tiefenkarte**
DE 102019204075 A1; TW I202043844

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
**Multi-aperture imaging device having a beam-deflecting
device comprising reflecting facets**
US10,873,688

Patenterteilungen | Patent Assignations

Zeitner, U.D.; Eckstein, H.-C.; Schmid, W. (Osram)
Kantenemittierender Halbleiterlaser mit Phasenstrukturen
DE 102008025922 B4

Wippermann, F.; Duparré, J.; Dannberg, P.; Bräuer, A.
**Verfahren zum Herstellen einer Struktur, optisches
Bauteil, optischer Schichtstapel**
EP 2516124 B1

Wippermann, F.; Lange, N.; Reimann, A.; Bräuer, A.
**Polymere optische Komponenten mit integrierten
mechanischen Strukturen mit thermisch induzierter,
axialer Positionsänderung**
US 10,571,646 B2

Sieler, M.; Schreiber, P.; Riedel, A.
**Multiapertur-Projektionsdisplay und Einzelbilderzeuger
für ein solches**
EP 3007439 B1

Oberdörster, A.
**Mehrkanaloptik- Bildaufnahmevorrichtung und
Mehrkanaloptik-Bildaufnahmeverfahren**
EP 3085070 B1

Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.
**Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung eines
Objektbereichs**
TW I322804

Brückner, A.; Wippermann, F.; Bräuer, A.
**Vorrichtung und Verfahren zur relativen Positionierung
einer Multiaperturoptik mit mehreren optischen Kanälen
relativ zu einem Bildsensor**
US 10,542,196 B2; JP 6701101 B2

Beier, M.; Stumpf, D.; Gebhardt, A.; Risse, S.; Zeitner, U.D.
**Verfahren und Anordnung zur
interferometrischen Prüfung**
EP 3224570 B1

Schürmann, M.; Müller, R.; Kaiser, N.; Schwinde, S. (IAP)
**Verfahren zur Herstellung eines Reflektorelements
und Reflektorelement**
US 10,618,840 B2

Nolte, S.; Richter, D. (IAP); Thomas, J. U. (IAP);
Voigtländer, C. (IAP)
Optisches Bragg-Gitter
DE 102015107013 B4

Heist, S.; Notni, G.; Srokos, K.; Lutzke, P.; Schmidt, I.;
Kühmstedt, P.
**Vorrichtung und Verfahren zum räumlichen Vermessen
von Oberflächen**
EP 3292371 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
**Vorrichtung mit einer Multikanalabbildungsvorrichtung
und Verfahren zum Herstellen derselben**
EP 3338133 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, tragbare Vorrichtung
und Verfahren zum Herstellen einer Multiaperturabbil-
dungsvorrichtung**
KR 102124776 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
**Multiaperturabbildungsvorrichtung, Verfahren zum
Herstellen derselben und Abbildungssystem**
KR 102137003 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
**Multiaperturabbildungsvorrichtung mit einer reflektie-
rende Facetten aufweisenden Strahlumlenkvorrichtung**
US 10,567,629 B2; TW I685676; KR 102069982 B; JP 6643460 B2

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE | NAMES, DATA, ACTIVITIES

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit kanalindividueller Einstellbarkeit
US 10,732,377 B2; KR 102124774 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung mit Optiksubstrat
KR 102124773 B1

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.; Oberdörster, A.
3D-Multiaperturabbildung
EP 3342148 B1; US 10,708,570 B2

Michaelis, D.; Schreiber, P.
Projektionsvorrichtung und Verfahren zur Projektion mit optischen Freiformflächen
US 10,764,545 B2

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Erfassen eines Objektbereichs
US 10,771,668 B2; CN 108463992 B; KR 102087055

Wippermann, F.; Brückner, A.; Reimann, A.; Bräuer, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtungen, Verfahren zum Herstellen derselben und Abbildungssystem
EP 3403393 B1; US 10,652,438 B2; JP 6761865; CN 108781249 B

Wippermann, F.; Brückner, A.; Bräuer, A.
3D-Multiaperturvorrichtung-Verfahren zum Bereitstellen eines Ausgangssignals eine 3D- Multiaperturvorrichtung und Verfahren zum Erfassen eines Gesamtgesichtsfeldes
EP 3456041 B1; US 10,708,570 B2

Schulz, U.; Munzert P.; Wolleb, S.; Rickelt, F.; Knopf, H.
Verfahren zur Herstellung eines reflexionsmindernden Schichtsystems
DE 102016125197 B4

Duparré, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Oberdörster, A.
Multiaperturabbildungsvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
TW I690734

Duparré, J.; Brückner, A.; Wippermann, F.; Oberdörster, A.
Vorrichtung zur Abbildung von Teilgesichtsfeldern, Multiaperturvorrichtung und Verfahren zum Bereitstellen derselben
TW I687099

Duparré, J.; Wippermann, F.
Multiaperturvorrichtung, Abbildungssystem und Verfahren zum Bereitstellen einer Multiaperturabbildungsvorrichtung
TW I686623

Schulz, U.; Munzert, P.; Rickelt, F.; Knopf, H.
Reflexmindernde Beschichtung und Verfahren zur Herstellung einer reflexionsmindernden Beschichtung
DE 102018104186 B4

Pertsch, T.; Eilenberger, F.; Gräfe, M.; Setzpfand, F. (FSU)
Gerät und Verfahren zur Erzeugung hyperspektraler Bilder eines Objekts
DE 102018210777 B4

Gräfe, M.; Gilaberte-Basset, M.; Eilenberger, F.; Setzpfand, F. (FSU)
Optische Anordnung für fluoreszenzmikroskopische Anwendungen
DE 102018215831 B4

Gräfe, M.; Gilaberte-Basset, M.; Eilenberger, F.; Setzpfand, F. (FSU)
Optische Anordnung für fluoreszenzmikroskopische Anwendungen
DE 102018215833 B4

Buchkapitel | Book chapters

Ghazaryan, L.; K. Pfeiffer, P. Schmitt, V. Beladiya, S. Kund, A. Szeghalmi
Atomic Layer Deposition
in Encyclopedia of Applied Physics, edited by P. Seidel (2020), ISBN 978-3-527-40478-0

Zeitschriften | Journals

Alberucci, A.; N. Alasgarzadex, M. Chambonneau, M. Blothe, H. Kämmer, G. Matthäus, C.P. Jisha, S. Nolte
In-Depth Optical Characterization of Femtosecond-Written Waveguides in Silicon

Physical Review Applied 14 (2) (2020) p. 024078, ISSN 2331-7019

Aleshire, C.; A. Steinkopff, C. Jauregui, A. Klenke, A. Tünnermann, J. Limpert

Simplified design of optical elements for filled-aperture coherent beam combination

Optics Express 28 (14) (2020) pp. 21035-21045, ISSN 1094-4087

Baghdasaryan, B.; F. Steinlechner, S. Fritzsche
Characterization of opening angle correlations of a biphoton state decomposed in Bessel modes

Physical Review A 101 (4) (2020) p. 043844, ISSN 1050-2947

Beladiya, V.; M. Becker, T. Faraz, W. M. M. Kessels, P. Schenk, F. Otto, T. Fritz, M. Grünewald, C. Helbing, K. D. Jandt, A. Tünnermann, M. Sierka, A. Szeghalmi

Effect of an electric field during the deposition of silicon dioxide thin films by plasma enhanced atomic layer deposition: an experimental and computational study

Nanoscale 12 (3) (2020) pp. 2089-2102, ISSN 2040-3364

Belsley, A.; T. Pertsch, F. Setzpfandt

Generating path entangled states in waveguide systems with second-order nonlinearity

Optics Express 28 (20) (2020) pp. 28792-28809, ISSN 1094-4087

Berzins, J.; S. Indriunas, K. van Erve, A. Nagarajan, S. Fasold, M. Steinert, G. Gerini, P. Gecys, T. Pertsch, S.M.B. Baumer, F. Setzpfandt

Direct and High-Throughput Fabrication of Mie-Resonant Metasurfaces via Single-Pulse Laser Interference

Acs Nano 14 (5) (2020) pp. 6138-6149, ISSN 1936-0851

Berzins, J.; S. Indriunas, S. Fasold, M. Steinert, O. Zukovskaja, D. Cialla-May, P. Gecys, S.M.B. Baumer, T. Pertsch, F. Setzpfandt

Laser-induced spatially-selective tailoring of high-index dielectric metasurfaces

Optics Express 28 (2) (2020) pp. 1539-1553, ISSN 1094-4087

Birckigt, P.; C. Rothhardt, K. Grabowski, K. Jorke, R. Schlegel, F. Dreisow, G. Kalkowski, S. Risse, R. Eberhardt

Plasma-activated direct bonding of coated optical glasses

Japanese Journal of Applied Physics (2020) p. 59 SBBD01, ISSN 0021-4922

Bräuer-Burchardt, C.; C. Munkelt, I. Gebhart, M. Heinze, S. Heist, P. Kühmstedt, G. Notni

A-Priori Calibration of a Structured Light Underwater 3D Sensor

Journal of Marine Science and Engineering 8 (9) (2020) p. 635, ISSN 2077-1312

Brunner, R., M. Kraus, J. Hirte, Z. Diao, K. Weishaupt, J.P. Spatz, T. Harzendorf, M. Trost, A.-S. Munser, S. Schröder, M. Baer

Black and white fused silica: Modified sol-gel process combined with moth-eye structuring for highly absorbing and diffuse reflecting SiO₂ glass

Optics Express, 28 (22), pp. 32499-32516, ISSN 10944087

Buldt, J.; M. Müller, H. Stark, C. Jauregui, J. Limpert

Fiber laser-driven gas plasma-based generation of THz radiation with 50-mW average power

Applied Physics B-Lasers and Optics 126 (1) (2020) p. 2, ISSN 0946-2171

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 (2020) p. 2000433, ISSN 1863-8880

Chen, Y.; S. Ecker, J. Bavaresco, T. Scheidl, L.X. Chen, F. Steinlechner, M. Huber, R. Ursin

Verification of high-dimensional entanglement generated in quantum interference

Physical Review A 101 (3) (2020) p. 032302, ISSN 1050-2947

de Vries, O.; M. Plotner, F. Christaller, H. Zhang, A. Belz, B. Heinrich, H. Kubler, R. Loew, T. Pfau, T. Walbaum, T. Schreiber, A. Tünnermann

Highly customized 1010 nm, ns-pulsed Yb-doped fiber amplifier as a key tool for on-demand single-photon generation

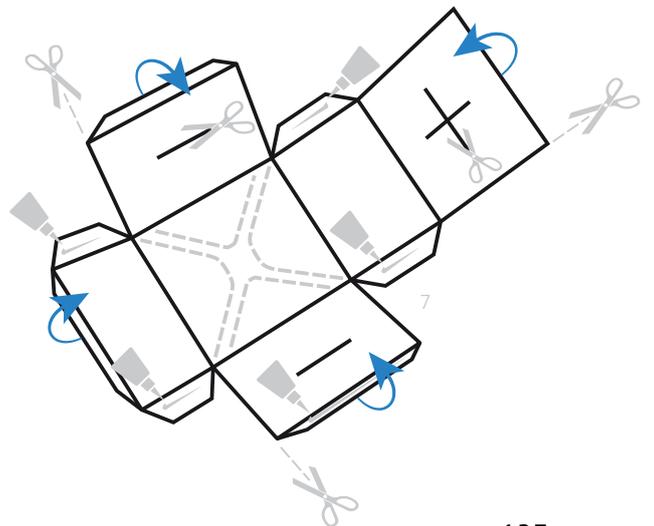
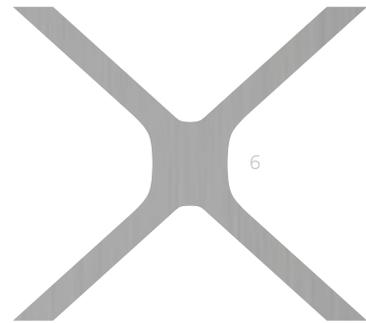
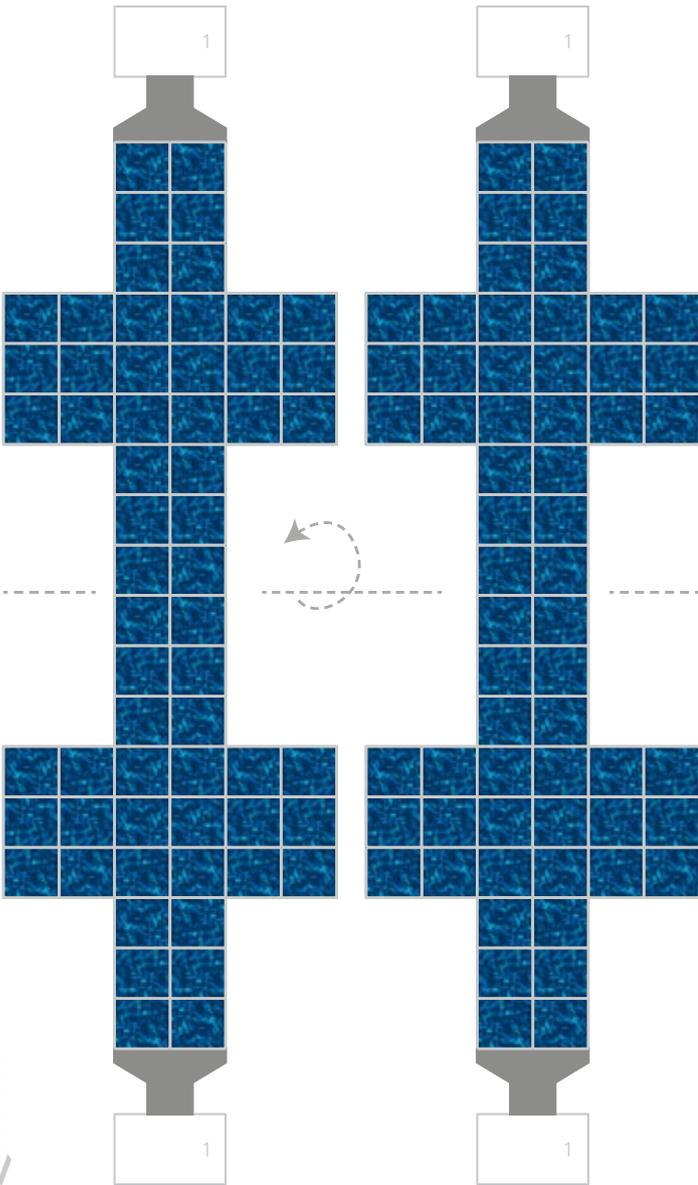
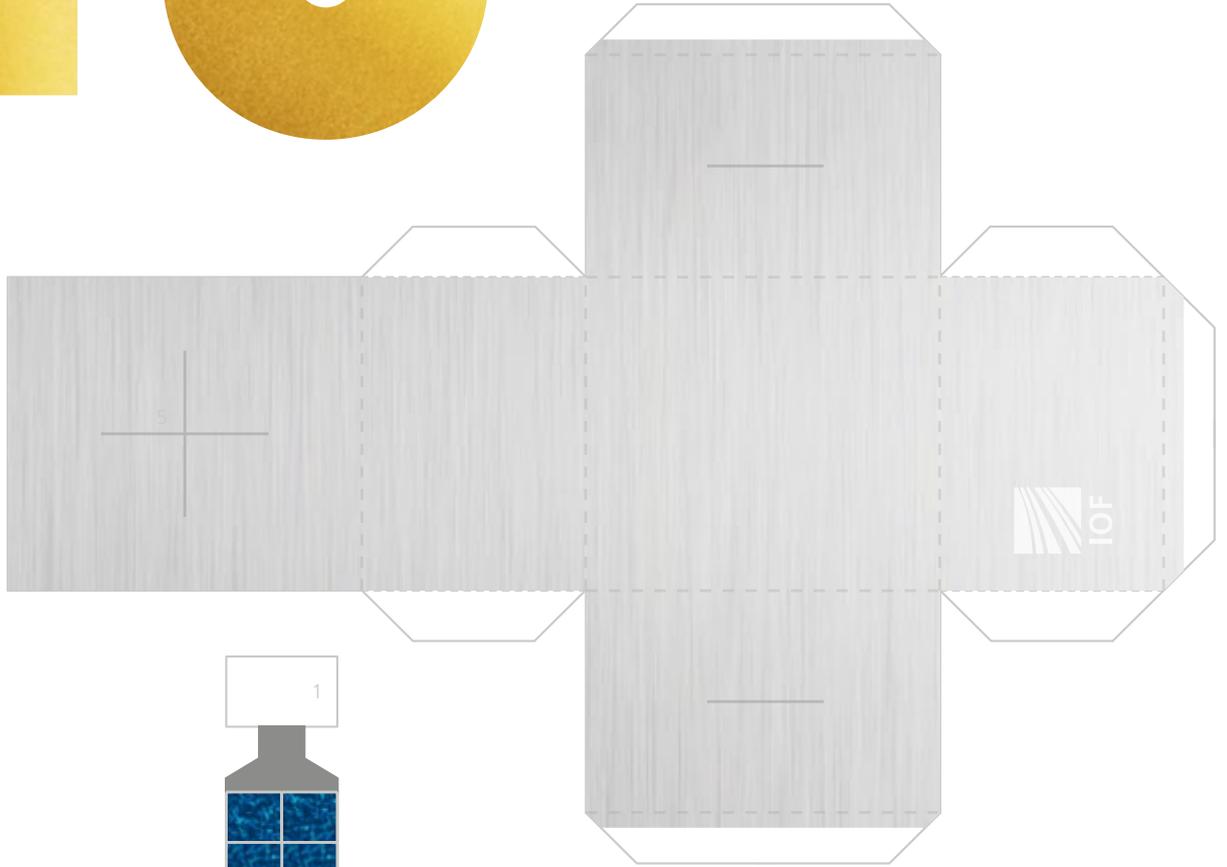
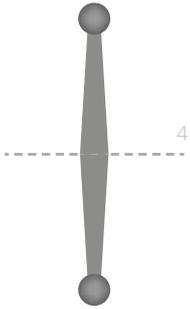
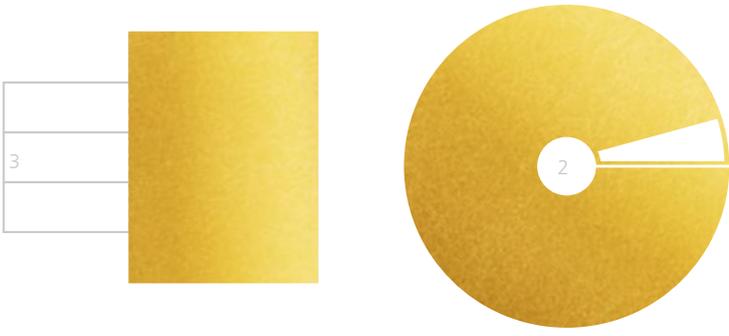
Optics Express 28 (12) (2020) pp. 17362-17373, ISSN 1094-4087

MAKE YOUR OWN LITTLE SATELLITE

- Cut out the body, the solar wings, the parts for the telescope and the antenna.
- Make slots in the satellite body for the wing assembly (grey lines) and the telescope (grey cross).
- Fold the wings (1) in half and glue the front and back together, avoiding glue on the white mounting areas.
- Push the wings through the slots and glue them to the inside of the satellite body.
- Put glue on the glue flaps of the satellite and form the body into a cuboid (7).
- Glue the primary mirror (2) together to form a truncated cone and roll the secondary mirror (3) into a cylinder and glue it together too. Make sure the cylinder fits through the hole in the primary mirror.
- Attach the glue flaps of the secondary mirror to the back of the primary mirror and press the whole telescope into the sliced cross (5) of the satellite with glue on the back.
- Glue the X (6) to the back of the satellite body for extra stability and attach the antenna so that your images from space can be received on Earth.

And now explore outer space!





Dietrich, K.; M. Zilk, M. Steglich, T. Siefke, U. Hübner, T. Pertsch, C. Rockstuhl, A. Tünnermann, E.B. Kley
Merging Top-Down and Bottom-Up Approaches to Fabricate Artificial Photonic Nanomaterials with a Deterministic Electric and Magnetic Response
 Advanced Functional Materials 30 (3) (2020) p. 1905722, ISSN 1616-301X

Eschen, W.; G. Tadesse, Y.F. Peng, M. Steinert, T. Pertsch, J. Limpert, J. Rothhardt
Single-shot characterization of strongly focused coherent XUV and soft X-ray beams
 Optics Letters 45 (17) (2020) pp. 4798-4801, ISSN 0146-9592

Fan, G.; R. Safaei, O. Kwon, V. Schuster, K. Legare, P. Lassonde, A. Ehteshami, L. Arias, A. Laramee, J. Beaudoin-Bertrand, J. Limpert, Z. Tao, M. Spanner, B.E. Schmidt, H. Ibrahim, A. Baltuska, F. Legare
High energy redshifted and enhanced spectra broadening by molecular alignment
 Optics Letters 45 (11) (2020) pp. 3013-3016, ISSN 0146-9592

Fedotova, A.; M. Younesi, J. Sautter, A. Vaskin, F. J. F. Lochner, M. Steinert, R. Geiss, T. Pertsch, I. Staude, F. Setzpfandt
Second-Harmonic Generation in Resonant Nonlinear Metasurfaces Based on Lithium Niobate
 Nano Letters 20 (12) (2020) pp. 8608-8614, ISSN 1530-6984

Fellinger, J., U. Lippmann, H. Greve, M. Alhashimi, M. Schülke, S. Äkaslompolo, P. Drewelow, M. Jakubowski, R. König, A. Lorenz
Design of endoscopes for monitoring water-cooled divertor in W7-X
 Fusion Engineering and Design, 158, art. no. 111841, ISSN 9203796

Franz, M.; R. Junghans, P. Schmitt, A. Szeghalmi, S. E. Schulz
Wafer-level integration of self-aligned high aspect ratio silicon 3D structures using the MACE method with Au, Pd, Pt, Cu, and Ir
 Beilstein Journal of Nanotechnology 11 (2020) pp. 1439-1449, ISSN 2190-4286

Gebhardt, A., M. Beier, E. Schmidt, T. Rendel, U. Gawronski, E. Gebhardt
Effective optical system assembly using ultra-precise manufactured references
 International Journal of Automation Technology 14 (4), pp. 644-653, ISSN 1881-7629

Geib, N.; R. Hollinger, E. Haddad, P. Herrmann, F. Legare, T. Pertsch, C. Spielmann, M. Zürch, F. Eilenberger
Discrete dispersion scan setup for measuring few-cycle laser pulses in the mid-infrared
 Optics Letters 45 (18) (2020) pp. 5295-5298, ISSN 0146-9592

Goebel, T.; M. Heusinger, R. G. Krämer, C. Matzdorf, T. O. Imogore, D. Richter, U. D. Zeitner, S. Nolte
Femtosecond inscription of semi-aperiodic multi-notch fiber Bragg gratings using a phase mask
 Optics Express 28 (24) (2020) pp. 35682-35694, ISSN 1094-4087

Gräfe, M., A. Szameit
Integrated photonic quantum walks
 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 53 (7), art. no. 073001, ISSN 9534075

Grebing, C.; M. Müller, J. Buldt, H. Stark, J. Limpert
Kilowatt-average-power compression of millijoule pulses in a gas-filled multi-pass cell
 Optics Letters 45 (22) (2020) pp. 6250-6253, ISSN 0146-9592

Gross, H.
Cascaded Diffraction in Optical Systems. Part I: Simulation Model
 Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 37 (2) (2020) pp. 240-249, ISSN 1084-7529

Gross, H.
Cascaded Diffraction in Optical Systems. Part II: Simulation Model
 Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 37 (2) (2020) p. 250-256, ISSN 1084-7529

Hartung, J.; S. Merx, H. von Lukowicz
Compensation of general asymmetric static loads for a complete optical system of freeform mirrors
 Applied Optics 59 (6) (2020) pp. 1507-1518, ISSN 1559-128X

Heinzig, M.; G. Palma-Vega, T. Walbaum, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann
Diamond Raman oscillator operating at 1178 nm
 Optics Letters 45 (10) (2020) pp. 2898-2901, ISSN 0146-9592

- Hengoju, S., S. Wohlfeil, A.S. Munser, S. Boehme, E. Beckert, O. Shvydkiv, M. Tovar, M. Roth, M.A. Rosenbaum
Optofluidic detection setup for multi-parametric analysis of microbiological samples in droplets
 Biomicrofluidics, 14 (2), art. no. 024109, ISSN 19321058
- Hilbert, V.; M. Tschernajew, R. Klas, J. Limpert, J. Rothhardt
A compact, turnkey, narrow-bandwidth, tunable, and high-photon-flux extreme ultraviolet source
 Aip Advances 10 (4) (2020) p. 045227, ISSN 2158-3226
- Imogore, T.; R. G. Krämer, T. A. Goebel, C. Matzdorf, D. Richter, S. Nolte
Dispersion tailoring of femtosecond laser written chirped fiber Bragg gratings by selective femtosecond laser post-processing
 Optics Letters 45 (23) (2020) pp. 6526-6529, ISSN 0146-9592
- Jauregui, C.; C. Stihler, J. Limpert
Transverse mode instability
 Advances in Optics and Photonics 12 (2) (2020) pp. 429-484, ISSN 1943-8206
- Jenne, M.; D. Flamm, K.Y. Chen, M. Schäfer, M. Kumkar, S. Nolte
Facilitated glass separation by asymmetric Bessel-like beams
 Optics Express 28 (5) (2020) pp. 6552-6564, ISSN 1094-4087
- Junaid, S.; K. Schaarschmidt, M. Chemnitz, M. Chambonneau, S. Nolte, M.A. Schmidt
Tailoring modulation instabilities and four-wave mixing in dispersion-managed composite liquid-core fibers
 Optics Express 28 (3) (2020) pp. 3097-3106, ISSN 1094-4087
- Klas, R.; W. Eschen, A. Kirsche, J. Rothhardt, J. Limpert
Generation of coherent broadband high photon flux continua in the XUV with a sub-two-cycle fiber laser
 Optics Express 28 (5) (2020) pp. 6188-6196, ISSN 1094-4087
- Kobylinskiy, A., B. Laue, E. Förster, B. Höfer, Y. Shen, H. Hillmer, R. Brunner
Substantial increase in detection efficiency for filter array-based spectral sensors
 Applied Optics, 59 (8), pp. 2443-2451, ISSN 1559128X
- Krämer, R.; F. Moller, C. Matzdorf, T.A. Goebel, M. Strecker, M. Heck, D. Richter, M. Plotner, T. Schreiber, A. Tünnermann, S. Nolte
Extremely robust femtosecond written fiber Bragg gratings for an ytterbium-doped fiber oscillator with 5 kW output power
 Optics Letters 45 (6) (2020) pp. 1447-1450, ISSN 0146-9592
- Kraus, M., E. Förster, V. Bagusat, T. Hönle, X. Uwurukundo, P. Bohnert, R. Brüning, H. Hillmer, R. Brunner
Realization of a compact cross-grating spectrometer and validating experimental tests
 Applied Optics 59 (5), pp. 1338-1346, ISSN 1559128X
- Kumar, P.; S. Saravi, T. Pertsch, F. Setzpfandt
Integrated induced-coherence spectroscopy in a single nonlinear waveguide
 Physical Review A 101 (2020) p. 053860, ISSN 1050-2947
- Landmann, M., H. Speck, S. Heist, A. Thoß
Thermische Streifen - 3D-Erfassung transparenter Oberflächen mit Wärmestrahlung
 inVISION 6 / November 2020, pp. 58 - 59, ISSN 09350187
- Landmann, M.; S. Heist, P. Dietrich, H. Speck, P. Kühmstedt, A. Tünnermann, G. Notni
3D shape measurement of objects with uncooperative surface by projection of aperiodic thermal patterns in simulation and experiment
 Optical Engineering 59 (9) (2020) p. 094107, ISSN 0091-3286
- 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 MoS₂ Monolayers
 ACS Photonics 8 (1) (2020) pp. 218-227, ISSN 2330-4022
- Lu, X.; H. Gross
Efficient simulation of surface scattering in symmetry-free optical systems
 Optics Express 28 (26) (2020) pp. 39368 - 39386, ISSN 1094-4087
- Merx, S.; J. Stock, F. Wideasari, H. Gross
Beam Characterization by phase retrieval solving the transport-of-intensity equation
 Optics Express 28 (14) (2020) pp. 20898-20907, ISSN 1094-4087

- Mobini, E.; S. Rostami, M. Peysokhan, A. Albrecht, S. Kuhn, S. Hein, C. Hupel, J. Nold, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann, M. Sheik-Bahae, A. Mafi
Laser cooling of ytterbium-doped silica glass
Communications Physics 3 (1) (2020) p. 134, ISSN 2339-3650
- Möller, F.; V. Distler, T. Walbaum, N. Haarlammert, J. Nold, T. Schreiber, S. Unger, V. Reichel, J. Kobelke, J. Bierlich, A. Schwuchow, T. Eschrich, M. Leich, K. Wondraczek, A. Tünnermann
Influence of pedestal diameter on mode instabilities in Yb/Ce/Al-doped fibers
Optics Express 28 (22) (2020) pp. 33456-33474, ISSN 1094-4087
- Müller, M.; C. Aleshire, A. Klenke, E. Haddad, F. Legare, A. Tünnermann, J. Limpert
10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser
Optics Letters 45 (11) (2020) pp. 3083-3086, ISSN 0146-9592
- Mupparapu, R.; M. Steinert, A. George, Z.A. Tang, A. Turchanin, T. Pertsch, I. Staude
Facile Resist-Free Nanopatterning of Monolayers of MoS₂ by Focused Ion-Beam Milling
Advanced Materials Interfaces (2020) p. 2000858, ISSN 2196-7350
- Ngo, G.N., A. George, R. T. K. Schock, A. Tuniz, E. Najafidehaghani, Z. Y. Gan, N. C. Geib, T. Bucher, H. Knopf, S. Saravi, C. Neumann, T. Luhder, E. P. Schartner, S. C. Warren-Smith, H. Ebendorff-Heidepriem, T. Pertsch, M. A. Schmidt, A. Turchanin, F. Eilenberger
Scalable Functionalization of Optical Fibers Using Atomically Thin Semiconductors
Advanced Materials 32 (47), p. 7, ISSN 09359648
- Pakhomov, A.; F.J.F. Löchner, L. Zschiedrich, S. Saravi, M. Hammerschmidt, S. Burger, T. Pertsch, F. Setzpfandt
Far-field polarization signatures of surface optical nonlinearity in noncentrosymmetric semiconductors
Scientific Reports 10 (1) (2020) p. 10545, ISSN 20145-2322
- Paul, P.; K. Pfeiffer, A. Szeghalmi
Antireflection Coating on PMMA Substrates by Atomic Layer Deposition
Coatings 10(1) (2020) p. 64, ISSN 2079-6412
- Pertsch, T.; Y. Kivshar
Nonlinear optics with resonant metasurfaces
Mrs Bulletin 45 (3) (2020) pp. 210-220, ISSN 0883-7694
- Popp, A.; V. Distler, K. Jaksch, F. Sedlmeir, C.R. Müller, N. Haarlammert, T. Schreiber, C. Marquardt, A. Tünnermann, G. Leuchs
Quantum-limited measurements of intensity noise levels in Yb-doped fiber amplifiers
Applied Physics B-lasers and Optics 126 (8) (2020) p. 130, ISSN 0946-2171
- Rahimzadegan, A.; D. Arslan, D. Dams, A. Groner, X. Garcia-Santiago, R. Alaei, I. Fernandez-Corbaton, T. Pertsch, I. Staude, C. Rockstuhl
Beyond dipolar Huygens' metasurfaces for full-phase coverage and unity transmittance
Nanophotonics 9 (1) (2020) pp. 75-82, ISSN 2192-8606
- Ran, Y.; A. Boden, A. Richter, S. Guhl, S. Nolte, R. Ackermann
Nonresonant signal assisted high-pressure multi-species gas concentration measurements using ultrabroadband CARS
Osa Continuum 3 (8) (2020) pp. 2036-2043, ISSN 2578-7519
- Reim, A.; R. Ackermann, J. Font-Mateu, R. Kammel, M. Beato, S. Nolte, M. Mann, C. Russmann, M. Wierer
Atomic-resolution mapping of transcription factor-DNA interactions by femtosecond laser crosslinking and mass spectrometry
Nature Communications 11 (1) (2020) p. 3019, ISSN 2041-1723
- Reupert, A.; M. Heck, S. Nolte, L. Wondraczek
Angular Scattering Pattern of Femtosecond Laser-Induced Refractive Index Modifications in Optical Fibers
Advanced Optical Materials (2020) p. 2000633, ISSN 2195-1071
- Richardt, T., M. Heinrich, M. Gräfe, A. Szameit
Possible Link between the Distribution of Atomic Spectral Lines and the Radiation-Matter-Equilibrium in the Early Universe
Annalen der Physik 2020, p. 532, 2000033, ISSN 15213889
- Richardt, T., M. Heinrich, M. Gräfe, A. Szameit
Black Body Radiation: Possible Link between the Distribution of Atomic Spectral Lines and the Radiation-Matter Equilibrium in the Early Universe
Annalen der Physik 532 (6), p. 2070025, ISSN 15213889

- Rupprecht, C.; E. Sedov, M. Klaas, H. Knopf, M. Blei, N. Lundt, S. Tongay, T. Taniguchi, K. Watanabe, U. Schulz, A. Kavokin, F. Eilenberger, S. Hofling, C. Schneider
Manipulation of room-temperature valley-coherent exciton-polaritons in atomically thin crystals by real and artificial magnetic fields
 2d Materials 7 (3) (2020) p. 035025, ISSN 2053-1583
- Rupprecht, C.; M. Klaas, H. Knopf, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. Qin, S. Tongay, S. Schröder, F. Eilenberger, S. Hofling, C. Schneider
Demonstration of a polariton step potential by local variation of light-matter coupling in a van-der-Waals heterostructure
 Optics Express 28 (13) (2020) pp. 18649-18657, ISSN 1094-4087
- 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 C₂Cl₄
 Optics Express 28 (17) (2020) pp. 25037-25047, ISSN 1094-4087
- Schmidt, S.; S. Thiele, A. Toulouse, C. Bösel, T. Tiess, A. Herkommer, H. Gross, H. Giessen
Tailored micro-optical freeform holograms for integrated complex beam shaping
 Optica 7 (10) (2020) pp. 1279-1286, ISSN 2334-2536
- Schulz, U.; N. Gratzke, S. Wolleb, F. Scheinpflug, F. Rickelt, T. Seifert, P. Munzert
Ultraviolet-transparent low-index layers for antireflective coating
 Applied Optics 59 (5) (2020) pp. A58-A62, ISSN 1559-128X
- Seiboth, F.; D. Bruckner, M. Kahnt, M. Lyubomirskiy, F. Wittwer, D. Dzhigaev, T. Ullsperger, S. Nolte, F. Koch, C. David, J. Garrevoet, G. Falkenberg, C.G. Schroer
Hard X-ray wavefront correction via refractive phase plates made by additive and subtractive fabrication techniques
 Journal of Synchrotron Radiation 27 (2020) pp. 1121-1130, ISSN 0909-0495
- Sekman, Y.; N. Felde, L. Ghazaryan, A. Szeghalmi, S. Schröder
Light scattering characterization of single-layer nanoporous SiO₂ antireflection coating in visible light
 Applied Optics 59 (5) (2020) pp. A143-A149, ISSN 1559-128X
- Selmke, M.
Bubble optics
 Applied Optics, Volume 59 (1), pp. 45-58, ISSN 1559128X
- Selmke, M., J.A. Lock
Optical caustics of multiple objects in water: Two vertical rods and normally incident light
 Applied Optics, 59 (26), pp. 7981-7993., ISSN 1559128X
- Septriani, B.; O. de Vries, F. Steinlechner, M. Gräfe
Parametric study of the phase diffusion process in a gain-switched semiconductor laser for randomness assessment in quantum random number generator
 Aip Advances 10 (5) (2020) p. 055022, ISSN 2158-3226
- Shestaev, E.; D. Hoff, A.M. Saylor, A. Klenke, S. Hädrich, F. Just, T. Eidam, P. Jojart, Z. Varallyay, K. Osvay, G.G. Paulus, A. Tünnermann, J. Limpert
High-power ytterbium-doped fiber laser delivering few-cycle, carrier-envelope phase-stable 100 mu J pulses at 100 kHz
 Optics Letters 45 (1) (2020) pp. 97-100, ISSN 0146-9592
- Shestaev, E.; S. Hädrich, N. Walther, T. Eidam, A. Klenke, I. Seres, Z. Bengery, P. Jójárt, Z. Várallyay, Á. Börzsönyi, J. Limpert
Carrier-envelope offset stable, coherently combined ytterbium-doped fiber CPA delivering 1 kW of average power
 Optics Letters 45 (23) (2020) pp. 6350-6353, ISSN 0146-9592
- Siefke, T.; C.B.R. Hurtado, J. Dickmann, W. Dickmann, T. Käseberg, J. Meyer, S. Burger, U. Zeitner, B. Bodermann, S. Kroker
Quasi-bound states in the continuum for deep subwavelength structural information retrieval for DUV nano-optical polarizers
 Optics Express 28 (16) (2020) pp. 23122-23132, ISSN 1094-4087
- Singh, A.; M. Falkner, M. Steinert, T. Kaiser, G. Isic, T. Pertsch
Broadband spatio-temporal propagation characteristics of Airy plasmons
 Osa Continuum 3 (7) (2020) pp. 1870-1878, ISSN 2578-7519
- Sirmaci, Y.; Z. Tang, S. Fasold, C. Neumann, T. Pertsch, A. Turchanin, I. Staude
Plasmonic Metasurfaces Situated on Ultrathin Carbon Nanomembranes
 Acs Photonics 7 (4) (2020) pp. 1060-1066, ISSN 2330-4022
- Sperrhake, J.; M. Falkner, S. Fasold, T. Kaiser, T. Pertsch
Equivalence of reflection paths of light and Feynman paths in stacked metasurfaces
 Physical Review B 102 (24) (2020) p. 8, ISSN 1098-0121

- Stanicki, B.; M. Younesi, F.J.F. Lochner, H. Thakur, W.K. Chang, R. Geiss, F. Setzpfandt, Y.H. Chen, T. Pertsch
Surface domain engineering in lithium niobate
 Osa Continuum 3 (2) (2020) pp. 345-358, ISSN 2578-7519
- Steinkopff, A.; C. Jauregui, C. Aleshire, A. Klenke, J. Limpert,
Impact of thermo-optical effects in coherently combined multicore fiber amplifiers
 Optics Express 28 (15) (2020) pp. 38093-38105, ISSN 1094-4087
- Stella, U., T. Grosjean, N. De Leo, L. Boarino, P. Munzert, J.R. Lakowicz, E. Descrovi
Vortex Beam Generation by Spin-Orbit Interaction with Bloch Surface Waves
 ACS Photonics, 7 (3), pp. 774-783, ISSN 23304022
- Stempfhuber, S.; N. Felde, S. Schwinde, M. Trost, P. Schenk, S. Schröder, A. Tünnermann
Influence of seed layers on optical properties of aluminum in the UV range
 Optics Express 28 (14) (2020) pp. 20324-20333, ISSN 1094-4087
- Stenzel, O., S. Wilbrandt, C. Mühlig, S. Schröder
Linear and nonlinear absorption of titanium dioxide films produced by plasma ion-assisted electron beam evaporation: Modeling and experiments
 Coatings 10 (1), art. no.59, ISSN 20796412
- Stoevelaar, L.; J. Berzin, F. Silvestri, S. Fasold, K.Z. Kamali, H. Knopf, F. Eilenberger, F. Setzpfandt, S.M.B. Baumer, G. Gerini, T. Pertsch
Nanostructure-modulated planar high spectral resolution spectro-polarimeter
 Optics Express 28 (14) (2020) pp. 19818-19836, ISSN 1094-4087
- Talbot, L.; D. Richter, M. Heck, S. Nolte, M. Bernier
Femtosecond-written volume Bragg gratings in fluoride glasses
 Optics Letters 45 (13) (2020) pp. 3625-3628, ISSN 0146-9592
- Tanaka, K.; D. Arslan, S. Fasold, M. Steinert, J. Sautter, M. Falkner, T. Pertsch, M. Decker, I. Staude
Chiral Bilayer All-Dielectric Metasurfaces
 ACS Nano 14 (11) (2020) p. 15926–15935, ISSN 1936-0851
- Templin, J., S. Heist, M. Landmann
3D-Wärmebildsystem für Automobilanwendungen
 inspect 21 (3), pp. 18-19, ISSN 16165284
- Trost, M., A. Duparre, D. Ristau, S. Schröder
Optical interference coatings measurement problem 2019
 Applied Optics, 59 (7), pp. 1846-1853, ISSN 1559128X
- Tschernajew, M.; P. Gierschke, H.F. Lin, V. Hilbert, J. Kurdal, A. Stancalie, J. Limpert, J. Rothhardt
Differential pumping unit for windowless coupling of laser beams to ultra high vacuum
 Vacuum 178 (2020) p. 109443, ISSN 0042-207X
- Tuitje, F.; W. Eschen, G.K. Tadesse, J. Limpert, J. Rothhardt, C. Spielmann
Reliability of ptychography on periodic structures
 Osa Continuum 3 (6) (2020) pp. 1691-1702, ISSN 2578-7519
- Tuniz, A.; O. Bickerton, F.J. Diaz, T. Käsebier, E.B. Kley, S. Kroker, S. Palomba, C.M. de Sterke
Modular nonlinear hybrid plasmonic circuit
 Nature Communications 11 (1) (2020) p. 2413, ISSN 2041-1723
- Urban, I., X. Uwurukundo, D. Stumpf, K. Frey, A. Reichenbach, M. Francke, R. Brüning, R. Brunner
Amphibious vision – Optical design model of the hooded merganser eye
 Vision Research 175, pp. 75-84, ISSN 426989
- Vega, A.; S. Saravi, T. Pertsch, F. Setzpfandt
Pinhole quantum ghost imaging
 Applied Physics Letters 117 (9) (2020) p. 094003, ISSN 0003-6951
- Wang, T.; L. M. Deng, H. P. Chung, W. K. Chang, T. D. Pham, Q. H. Tseng, R. Geiss, T. Pertsch, Y. H. Chen
Electro-optically spectrum switchable, multiwavelength optical parametric oscillators based on aperiodically poled lithium niobate
 Optics Letters 45 (20) (2020) pp. 5848-5851, ISSN 0146-9592
- Wengerowsky, S.; S.K. Joshi, F. Steinlechner, J.R. Zichi, B. Liu, T. Scheidl, S.M. Dobrovolskiy, R. van der Molen, J.W.N. Los, V. Zwiller, M.A.M. Versteegh, A. Mura, D. Calonico, M. Inguscio, A. Zeilinger, A. Xuereb,
Passively stable distribution of polarisation entanglement over 192 km of deployed optical fibre
 Npj Quantum Information 6 (1) (2020) p. 5, ISSN 2056-6387
- Werdehausen, D.; S. Burger, I. Staude, T. Pertsch, M. Decker
Dispersion-engineered nanocomposites enable achromatic diffractive optical elements: publisher's note
 Optica 7 (10) (2020) pp. 1426-1426, ISSN 2334-2536

Werdehausen, D.; S. Burger, I. Staude, T. Pertsch, M. Decker
Flat optics in high numerical aperture broadband imaging systems

Journal of Optics 22 (6) (2020) p. 065607, ISSN 2040-8978

Werdehausen, D.; S. Burger, I. Staude, T. Pertsch, M. Decker
General design formalism for highly efficient flat optics for broadband applications

Optics Express 28 (5) (2020) p. 6452-6468, ISSN 1094-4087

Werdehausen, D.; X.G. Santiago, S. Burger, I. Staude, T. Pertsch, C. Rockstuhl, M. Decker
Modeling Optical Materials at the Single Scatterer Level: The Transition from Homogeneous to Heterogeneous Materials

Advanced Theory and Simulations (2020) p. 2000192, ISSN 2513-0390

Worku, N.; H. Gross

Application of Gaussian pulsed beam decomposition in modeling optical systems with diffraction grating

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 37 (5) (2020) p. 797-806, ISSN 1084-7529

Worku, N.; H. Gross

Gaussian pulsed beam decomposition for propagation of ultra-short pulses through optical systems

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 37 (1) (2020) p. 98-107, ISSN 1084-7529

Worku, N.; H. Gross

Spatially truncated Gaussian pulsed beam and its application in modeling diffraction of ultrashort pulses from hard apertures

Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision 37 (2) (2020) p. 317-326, ISSN 1084-7529

Zhang, C.; I. Gebhart, P. Kühmstedt, M. Rosenberger, G. Notni
Enhanced Contactless Vital Sign Estimation from Real-Time Multimodal 3D Image Data

Journal of Imaging 6 (11) (2020) p. 15, ISSN 2313-433X

Zhao, X.; S. Nolte, R. Ackermann

Lasing of N-2(+) induced by filamentation in air as a probe for femtosecond coherent anti-Stokes Raman scattering

Optics Letters 45 (13) (2020) p. 3661-3664, ISSN 0146-9592

Zhong, Y.; Z. Tang, H. Gross

Correction of 2D-telecentric scan systems with freeform surfaces

Optics Express 28 (3) (2020) p. 3041-3056, ISSN 1094-4087

Zhong, Y., Z. Tang, H. Gross

Anamorphic telecentric scan systems with freeform surfaces

Optics Express 28 (3), 3041-3056, ISSN 10944087

A night view of a city, likely a university town, with a starry sky above. The city lights are visible in the lower portion of the image, including a prominent red tower. The sky is filled with numerous stars, creating a deep blue and black gradient.

*welcome to the
valley of photons*

#lichtstadt

IMPRESSUM IMPRINT

Herausgeber | Editor

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

www.iof.fraunhofer.de

Institutsleiter | Director

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Telefon +49 3641 807-202
andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de

Redaktion | Editorial staff

Dr. Robert Kammel
Dr. Stefan Riehemann
Anne Groß
Desiree Haak
Lisa Bock
Elisabeth Lehmann
Dr. Stephanie Hesse-Ertelt
Adlin Bruns

Redaktionsschluss | Editorial deadline

27.3.2021

Gestaltung | Graphic design

Walter Oppel
Jessica Krüger

Druck | Print

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

Bildnachweis | Photo Acknowledgements

Seite | page: 25, 31, 35, 36(2), 37, 38(2), 43, 44, 45, 47(2),
49, 50, 51, 58(1,2), 60, 61, 63, 70, 72, 73,
79(3), 80, 86, 87, 92, 94, 96:

© Die Autorinnen und Autoren / the authors /
Fraunhofer IOF

Seite | page: 28, 36(1), 38(1), 39(3), 46, 54, 104, 110,
112, 116:

© Christian Süß / Fraunhofer IOF

Seite | page: Titel / Cover, 6, 8, 12, 14, 16, 18, 19, 20,
22, 24, 26(1,2), 30, 32, 34, 40, 42, 48, 52, 56,
59, 62, 64, 66(1), 68, 69(2), 74, 76, 78, 79(2),
82, 84, 88, 90, 98, 100, 102, 106, 114, 142:

© Walter Oppel / Fraunhofer IOF

Seite | page: 3: © Thilo Schoch

BMBF / Innovation & Strukturwandel

Seite | page: 4: © Guido Bergmann, Presse- und Informa-
tionsamt der Bundesregierung

Seite | page: 108: © Anna Schroll / MPSP

Seite | page: 120: © Michael Weimer / Fraunhofer IOF

Seite | page: 125: © Guido Bergmann, Presse- und Informa-
tionsamt der Bundesregierung

Persönliche Grußworte | Personal greetings

Das Marketing- und Kommunikations-Team des Fraun-
hofer IOF dankt Sylvia Bathke und Michael Weimer für
ihren jahrzehntelangen Einsatz für die Auswirkung des
Instituts und sendet herzlichste Grüße. #LLAP



Winner Deutscher
Zukunftspreis

3x



iof.fraunhofer.de

**ALL INFO
AT WWW.**



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

FOLLOW US



twitter.com/Fraunhofer_IOF

**WE TWEET
OPTICS**



instagram.com/fraunhofer.iof

**LOOK AT US
ON INSTA**

SCAN ME!

