

JAHRESBERICHT 2025

Institut für Nanophotonik Göttingen e.V.

The image shows a close-up of a metallic sign for the IFNANO institute. The sign features the logo 'IFNANO' in large, bold letters, with 'IF' in dark grey and 'NANO' in blue. Below the logo, the text 'INSTITUT FÜR NANOPHOTONIK' is visible in a smaller, dark grey font. The sign is mounted on a metal pole. In the background, a modern building with large glass windows and a blue sky are visible, along with some greenery.

IFNANO
INSTITUT FÜR NANOPHOTONIK

Institut für Nanophotonik Göttingen e.V.

Hans-Adolf-Krebs-Weg 1
37077 Göttingen

Tel.: +49 (0)551/5035-0
Fax: +49 (0)551/5035-99

E-Mail: info@ifnano.de

www.ifnano.de

Impressum

Herausgeber

Institut für Nanophotonik Göttingen e.V. (IFNANO)

Redaktion: apl. Prof. Dr. Alexander Egner (verantwortlich)

Verfasser: Institutsdirektor apl. Prof. Dr. Alexander Egner, Tatjana Kasten, Verwaltung,
zuständige Abteilungen

Koordination, Gestaltung und Layout: Tatjana Kasten

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

Inhaltsverzeichnis

Contents

Vorwort	4	Preface.....	4
Leitbild	6	Mission Statement.....	6
Institutsstruktur.....	8	Institute Structure	8
Das Institut in Zahlen	10	Statistics of the Institute	10
Die Abteilungen	13	The Departments	13
Optische Nanoskopie	14	Optical Nanoscopy	14
Kurze Wellenlängen	30	Short Wavelengths.....	30
Photonische Sensorik.....	50	Photonic Sensor Technologies.....	50
Projekte.....	64	Projekte.....	64
Publikationen.....	66	Publications.....	66
Konferenzbeiträge.....	68	Conference Contributions	68
Abschlussarbeiten	70	Final Thesis	70
Ausgewählte Kooperationspartner	71	Selected Cooperation Partners.....	71
Messen und Veranstaltungen	74	Exhibitions and Events.....	74

Vorwort

Preface

Liebe Leserinnen und Leser,

2025 war für das IFNANO ein Jahr des Aufbruchs. Mit dem weitgehenden Abschluss unseres Generationswechsels haben wir die strukturellen Weichen für die kommende Dekade gestellt: Anstatt mit vier Abteilungen zu arbeiten, gliedert sich unsere Forschung künftig in drei fokussierte wissenschaftliche Einheiten - Optische Nanoskopie, Photonische Sensorik und Kurze Wellenlängen. Jede dieser Abteilungen vereint ein klar definiertes Wellenlängenspektrum und Kompetenzprofil. Gemeinsam bilden sie die Grundlage für unser zentrales Leitprinzip: Licht nicht isoliert als Messmittel zu betrachten, sondern als Bestandteil einer integrierten Kette - von der Quelle über die Wechselwirkung mit Materie bis hin zur Messung, Datenauswertung und Entscheidungsfindung. Wir bezeichnen diesen Ansatz als Systemdenken in der Nanophotonik.

Einen besonders eindrucksvollen Beleg für diese Philosophie lieferte 2025 das EU-Projekt NanoVIB, das wir in diesem Jahr erfolgreich abschließen konnten. Gemeinsam mit Partnern aus Schweden, der Schweiz und Deutschland haben wir eine multimodale Bildgebungsplattform entwickelt, die MINFLUX-Nanoskopie mit molekulspektroskopischen Verfahren kombiniert. Die MINFLUX-Technologie ermöglichte eine Lokalisierungspräzision im Bereich von ein bis drei Nanometern und damit die dreidimensionale Darstellung zellulärer Strukturen auf der Skala einzelner funktioneller Einheiten biologischer Makromoleküle. Durch die Kopplung mit der stimulierten Raman-Streuungs-Mikroskopie (SRS) ist es gelungen, strukturelle und biochemische Informationen in einer einzigen Aufnahme zu vereinen. So konnten bakterielle Zellteilungsprozesse und Virulenzmechanismen mit bislang unerreichter Detailtiefe sichtbar gemacht werden, was langfristig zur Entwicklung neuer Medikamente und Impfstoffe beitragen kann.

Auch im Bereich der kurzen Wellenlängen konnten wir einen bedeutenden Meilenstein erreichen: Das BMFTR-geförderte Projekt FELFocus wurde Ende 2025 erfolgreich abgeschlossen. In Kooperation mit DESY und der Universität Göttingen haben wir ein Mess- und Regelsystem entwickelt, das die Fokussieroptik am Freie-Elektronen-Laser FLASH2 mithilfe selbstlernender Algorithmen automatisch und präzise justiert. Was bislang mit erheblichem Zeit- und Personalaufwand verbunden war, lässt sich künftig effizient und reproduzierbar automatisieren.

Dear Readers,

2025 was a year of new beginnings for IFNANO. With the near-completion of our generational transition, we have set the structural course for the decade ahead: rather than operating with four departments, our research will in future be organized into three focused scientific units - Optical Nanoscopy, Photonic Sensing, and Short Wavelengths. Each of these departments combines a clearly defined wavelength spectrum and competence profile. Together, they form the basis for our central guiding principle: to regard light not in isolation as a measurement tool, but as part of an integrated chain - from the source through its interaction with matter to measurement, data analysis, and decision-making. We refer to this approach as systems thinking in nanophotonics.

A particularly compelling illustration of this philosophy was provided in 2025 by the EU project NanoVIB, which we were able to successfully conclude this year. Together with partners from Sweden, Switzerland, and Germany, we developed a multimodal imaging platform that combines MINFLUX nanoscopy with molecular spectroscopic techniques. MINFLUX technology enables localization precision in the range of one to three nanometers, allowing the three-dimensional representation of cellular structures at the scale of individual functional units of biological macromolecules. By coupling this with stimulated Raman scattering microscopy (SRS), it has been possible to combine structural and biochemical information in a single acquisition. This allowed bacterial cell division processes and virulence mechanisms to be visualized in unprecedented detail - a finding that may contribute in the long term to the development of new drugs and vaccines.

In the field of short wavelengths, we also reached an important milestone: the BMFTR-funded project FELFocus was successfully completed at the end of 2025. In cooperation with DESY and the University of Göttingen, we developed a measurement and control system that uses self-learning algorithms to automatically and precisely adjust the focusing optics at the free-electron laser FLASH2. What previously required considerable time and personnel can now be automated efficiently and reproducibly. The insights gained in the project regarding beam quality and optical load capacity form an important foundation for our further work on laser-based X-ray and EUV sources.

Vorwort

Preface

In der Photonischen Sensorik haben wir 2025 begonnen, unser Systemdenken unter realitätsnahen und anspruchsvollen Bedingungen zu erproben: Im Rahmen eines neuen Projekts entwickeln wir ein robustes Sensorsystem zur Echtzeit-Elementanalyse im Untertagebergbau. Kern des Ansatzes ist die laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) in Kombination mit einer neuartigen Zweifarbendoppelpuls-Technik, die die Emissionssignale signifikant verstärkt. Die gewonnenen Messdaten sollen direkt in digitale Vorhersagemodelle einfließen, um Abbaurouten datenbasiert zu optimieren - ein Beispiel dafür, wie photonische Messtechnik und Datenintelligenz gemeinsam wirtschaftlichen und ökologischen Mehrwert schaffen.

Diese Ergebnisse stehen exemplarisch für unsere neue strategische Ausrichtung: Wir verstehen photonische Systeme als integrierte Lösungen - von der Lichtquelle bis zur Entscheidungsunterstützung. Künstliche Intelligenz und datenbasierte Auswertung sind dabei kein Zusatz, sondern integraler Bestandteil moderner Nanophotonik.

Das IFNANO verfügt über ein hochqualifiziertes Team von 48 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, ohne deren außergewöhnlichen Einsatz diese Erfolge nicht möglich gewesen wäre. Ihr Engagement, ihre Kreativität und ihre wissenschaftliche Exzellenz bilden das Fundament unserer Arbeit - mein herzlicher Dank gilt ihnen allen.

Im Jahr 2025 hat das IFNANO mit einem Betriebs-haushaltsvolumen von 4,49 Millionen Euro gewirtschaftet. 60,9 Prozent dieser Summe wurden durch eigene Einnahmen generiert, während direkte Auftrageinnahmen aus der Industrie 13,4 Prozent beitrugen. Zusätzlich haben wir 590.000 Euro in den Ausbau unserer technologischen Infrastruktur investiert.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre und lade Sie herzlich zur Zusammenarbeit mit uns ein.



In Photonic Sensing, we began in 2025 to put our systems thinking to the test under realistic and demanding conditions: as part of a new project, we are developing a robust sensor system for real-time elemental analysis in underground mining. The core of the approach is laser-induced plasma spectroscopy (LIBS) combined with a novel two-color double-pulse technique that significantly enhances emission signals. The measurement data obtained will feed directly into digital predictive models to optimize extraction routes on a data-driven basis - an example of how photonic measurement technology and data intelligence together create economic and ecological value.

These results are exemplary of our new strategic direction: we understand photonic systems as integrated solutions - from the light source to decision support. Artificial intelligence and data-based analysis are not an add-on, but an integral component of modern nanophotonics.

IFNANO has a highly qualified team of 48 employees, without whose extraordinary commitment these achievements would not have been possible. Their dedication, creativity, and scientific excellence form the foundation of our work - my sincere thanks go to each and every one of them.

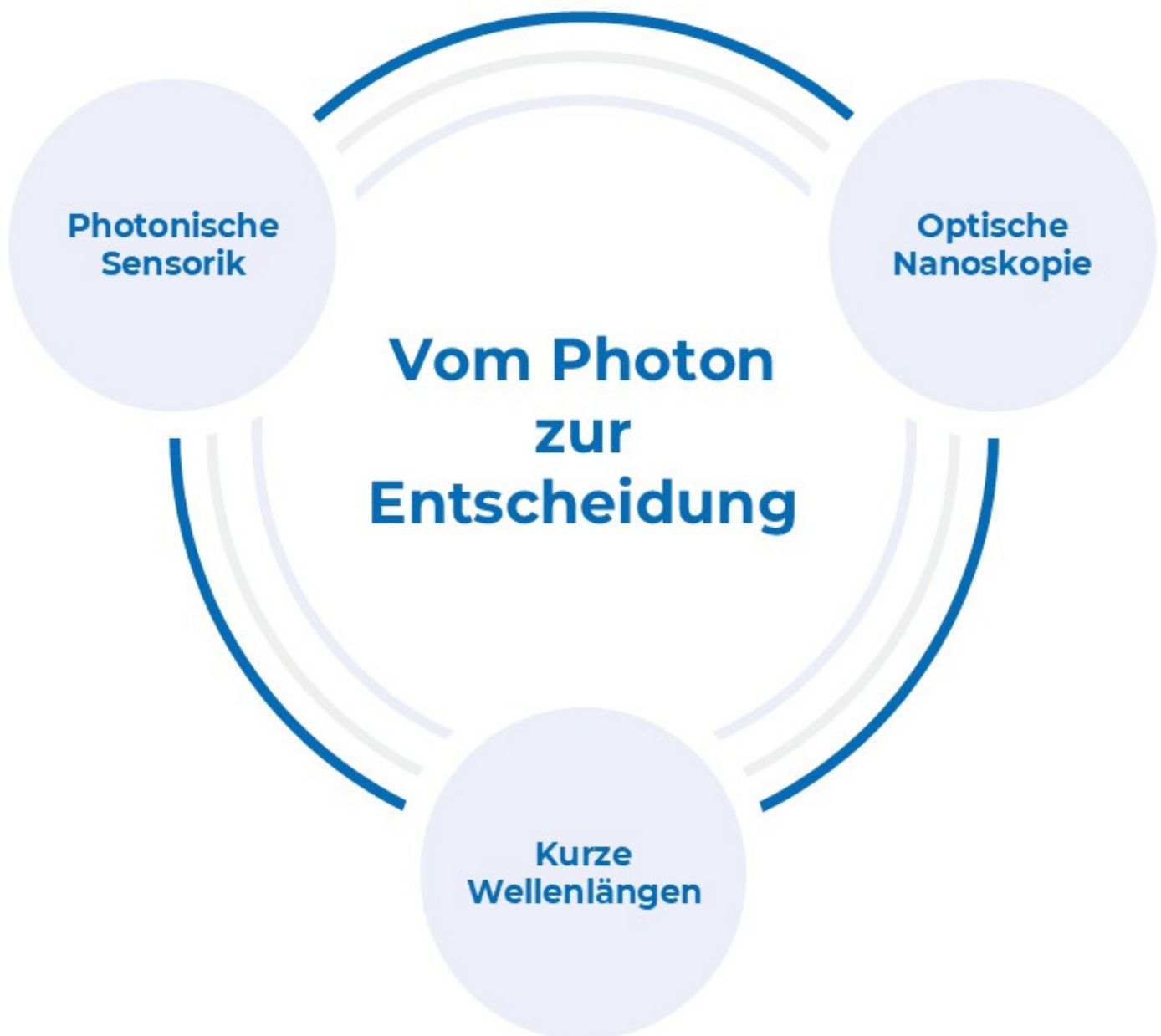
In 2025, IFNANO operated with an annual budget of 4.49 million euros. 60.9 percent of this amount was generated through its own revenues, while direct contract revenues from industry contributed 13.4 percent. In addition, we invested 590,000 euros in expanding our technological infrastructure.

Their commitment, creativity, and scientific excellence form the foundation of our work-my sincere thanks go to all of them.



Leitbild IFNANO

Mission Statement



Leitbild IFNANO

Mission Statement

Intelligente Photonik - vom Photon zur Entscheidung

Unsere Mission ist die anwendungsorientierte Grundlagenforschung auf dem Gebiet der optischen Technologien und der Technologietransfer von der Wissenschaft in die Wirtschaft mit stark regionalem Bezug. Wir setzen Licht als Werkzeug ein und zählen auf dem Gebiet der Nanophotonik zu den weltweit führenden Forschungseinrichtungen.

Das Institut für Nanophotonik Göttingen betreibt interdisziplinäre Spitzenforschung in Kooperation mit regionalen, nationalen und internationalen Partnern aus Industrie und Forschung. Unsere Forschung gliedert sich in drei fokussierte wissenschaftliche Einheiten: Optische Nanoskopie, Photonische Sensorik und Kurze Wellenlängen. Gemeinsam entwickeln wir kompetitive Produkte, Lösungen und Innovationen - zum Wohl der Gesellschaft und zur Stärkung der Wirtschaft. Unser Leitprinzip dabei: Systemdenken in der Nanophotonik - von der Lichtquelle über Messung, Datenintelligenz und Entscheidung.

Wir verstehen uns insbesondere als erster Ansprechpartner für den Mittelstand bei Fragestellungen aus dem Bereich der angewandten Nanophotonik. Forschung, Anwendung und Transfer sind für uns gleichwertige strategische Säulen. Mit unseren Kunden und Partnern arbeiten wir vertrauensvoll, schnell und effektiv zusammen.

Die regionale Wirtschaft profitiert von uns durch Wissenstransfer und exzellent ausgebildete Absolventinnen und Absolventen. Wir initiieren und unterstützen den Dialog und Erfahrungsaustausch über alle Themen der optischen Technologien.

Wir bieten eine industriennahe wissenschaftliche Ausbildung auf höchstem Niveau. Unser Erfolg basiert auf dem Wissen und dem Engagement unserer Mitarbeitenden. Ihre Fähigkeiten und ihre Begeisterung, ein offener Austausch und ein ausgezeichnetes Arbeitsumfeld schaffen die Grundlage für kreative Lösungen von wissenschaftlichen und technologischen Fragestellungen.

Intelligent Photonics - from Photon to Decision

Our mission is to conduct application-oriented basic research in the field of optical technologies and to transfer technology from science to industry with a strong regional focus. We use light as a tool and are one of the world's leading research institutions in the field of nanophotonics.

The Institute for Nanophotonics Göttingen conducts cutting-edge interdisciplinary research in collaboration with regional, national, and international partners from industry and academia. Our research is structured into three focused scientific units: Optical Nanoscopy, Photonic Sensing, and Short Wavelengths. Together we develop competitive products, solutions, and innovations - for the benefit of society and to strengthen the economy. Our guiding principle: systems thinking in nanophotonics - from the light source through measurement, data-driven insight, and decision-making. We primarily see ourselves as the first point of contact for small and medium-sized enterprises in the field of applied nanophotonics. Research, application, and transfer are equal strategic pillars for us. We work with our customers and partners in a trusting, fast, and highly effective manner.

The regional economy benefits from our activities through knowledge transfer and exceptionally well-trained graduates. We initiate and facilitate dialog and knowledge sharing on all topics related to optical technologies.

We offer an industry-oriented scientific education of the highest caliber. Our success is based on the knowledge and dedication of our employees. Their skills and enthusiasm, a spirit of open exchange, and an excellent working environment create the foundation for creative solutions to scientific and technological challenges.

Institutsstruktur Institution Structure

Trägerverein - Vorstand



Prof. Dr. C. Ropers
Vorstandsvorsitzender
Max-Planck Gesellschaft



Dr. Bernd Stoffregen
Schatzmeister
Industrie



Prof. Dr. S.W. Hell
Vorstandsmitglied
Max-Planck Gesellschaft



Prof. Dr. Tim Salditt
Vorstandsmitglied
Universität



Prof. Dr. J. Troe
Vorstandsmitglied
Universität

Institutsleitung



Apl. Prof. Dr. Alexander Egner
Institutsdirektor



Roland Becker
Verwaltungsleiter

Kompetenzfelder



Apl. Prof. Dr.
Alexander Egner
Optische Nanoskopie



Dr.
Claudia Geisler
Optische Nanoskopie



Dr.
Dong Du Mai
Kurze Wellenlängen



Dr.
Hainer Wackerbarth
Photonische Sensorik



Dr.
Carola Gregor
Optische Nanoskopie



Dr.
Peter Simon
Kurze Pulse/Nanostrukturen

KURATORIUM

**Prof. Dr. Thomas A. Klar**

Vorsitzender
Universität Linz
Österreich

**Prof. Dr. Francesca Calegari**

Kuratorin
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaftologie

**Dr. Dietmar Gnass**

Kurator
Polytec GmbH
Waldbronn

**Prof. Dr. Andrea Koch**

Kuratorin
HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
Hildesheim/Holzminen/Göttingen

**Prof. Dr. Sarah Köster**

Kuratorin
Georg-August-Universität
Göttingen

**Prof. Dr. Peter Loosen**

Kurator
Fraunhofer Institut für Lasertechnik
Aachen

Das Institut in Zahlen

Statistics of the Institute



Roland Becker
Verwaltungsleiter

T +49 551/5035-33
F +49 551/5035-99
M roland.becker@ifnano.de

MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Fenja Belosa
Markus Bähr
Tatjana Kasten
Uwe Lampe

Andreas Spata
Wolfgang Schminke
Anette Zwingmann



Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt im Jahr 2025 hatte ein Volumen von 4,49 Millionen Euro. Die Grundfinanzierung als ein wichtiger Bestandteil, wird als institutionelle Förderung vom Land Niedersachsen bereitgestellt. Der Finanzierungsanteil der eigenen Einnahmen am Betriebshaushalt lag bei 60,9 %. Die Einnahmen aus der Industrie trugen mit 13,4 % zur Finanzierung bei.

Investitionen

Im Jahr 2025 wurden Investitionen in die kontinuierliche Erweiterung der technologischen Ausstattung im Gesamtvolumen von 0,59 Millionen Euro getätigt.

Personal

Am Institut für Nanophotonik Göttingen waren zum Stichtag 31.12.2025 insgesamt 48 Mitarbeiter beschäftigt, davon 37 Wissenschaftler und Techniker, was einem Anteil von 77,1 % an den Gesamtbeschäftigten entspricht. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter verfügen mehrheitlich über einen Abschluss als M.Sc. Physik. Darüber hinaus arbeiten am Institut graduierte Photoniker, Chemiker, Informatiker und Kaufleute, die in interdisziplinären Forschungsgruppen tätig sind.

Ausbildung und Qualifikation

Das IFNANO bietet Studentinnen und Studenten die Möglichkeit ihr Studium mit praktischer wissenschaftlicher Arbeit in den Laboren und Werkstätten des IFNANO zu verbinden. Zum Jahresende 2025 wurden 6 wissenschaftliche und studentische Hilfskräfte betreut.

Operating budget

The operating budget in 2025 had a volume of 4.49 million euros. The basic funding as an important component, is provided by the German State of Lower Saxony as institutional grant. The financing share of own revenues at the operating budget was 60.9 %. Industry revenues contributed 13.4 % to the financing.

Investments

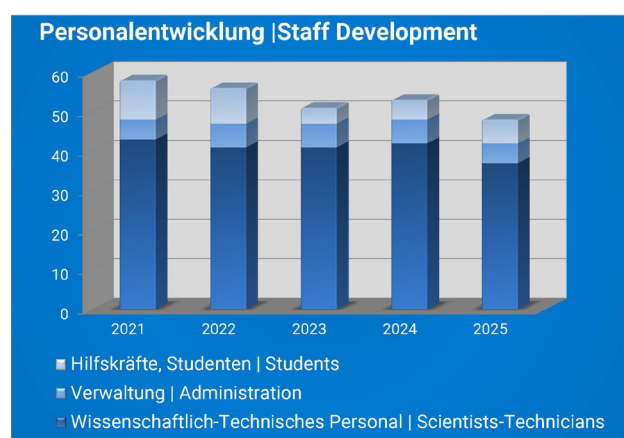
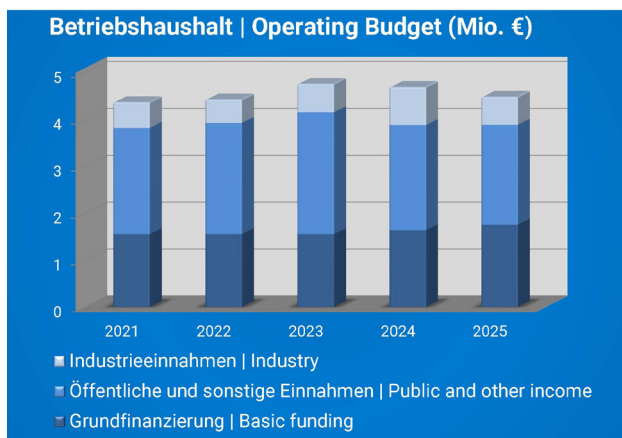
In 2025, a total of 0.59 million euros was invested in the continuous expansion of the technological equipment.

Staff

At year-end 2025, Institut für Nanophotonik Göttingen had 48 employees, 37 of them scientists and technicians, which corresponds to 77.1 % of the total employees. Most of the scientific staff have a graduation as M.Sc. Physics. In addition, graduated photonics, chemists, computer scientists and business people work in interdisciplinary research groups.

Training and qualifications

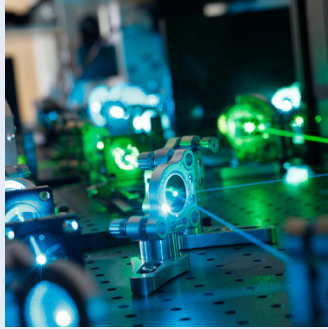
The IFNANO offers students the opportunity to combine their studies with practical scientific work in the IFNANO laboratories and workshops. At the end of 2025, 6 students and research assistants were supported at the IFNANO.



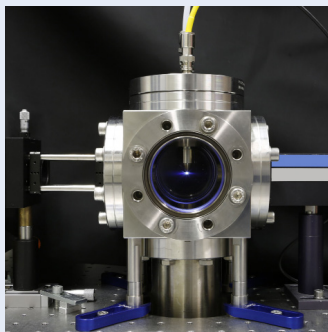


Die Abteilungen

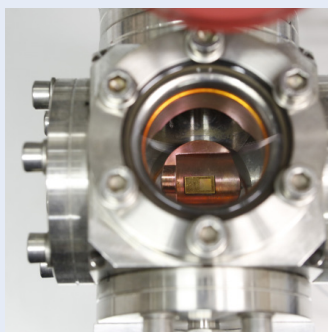
The Departments



Optische Nanoskopie
Optical Nanoscopy



Kurze Wellenlängen
Short Wavelengths



Photonische Sensorik
Photonic Sensor Technologies

Berichte aus der Abteilung Departmental Reports



Apl. Prof. Dr. Alexander Egner
Institutsdirektor
Abteilungsleiter

T +49 551/5035-35
F +49 551/5035-99
M alexander.egner@ifnano.de

Dr. Claudia Geisler
Abteilungsleiterin

T +49 551/5035-65
F +49 551/5035-99
M claudia.geisler@ifnano.de



MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Dr. Mark Bates

Theresa Brinker

Dr. Robin Dohmen

Dr. Carola Gregor

Dr. Torsten Hartmann

Dr. Parul Jain

Yanzeng Li

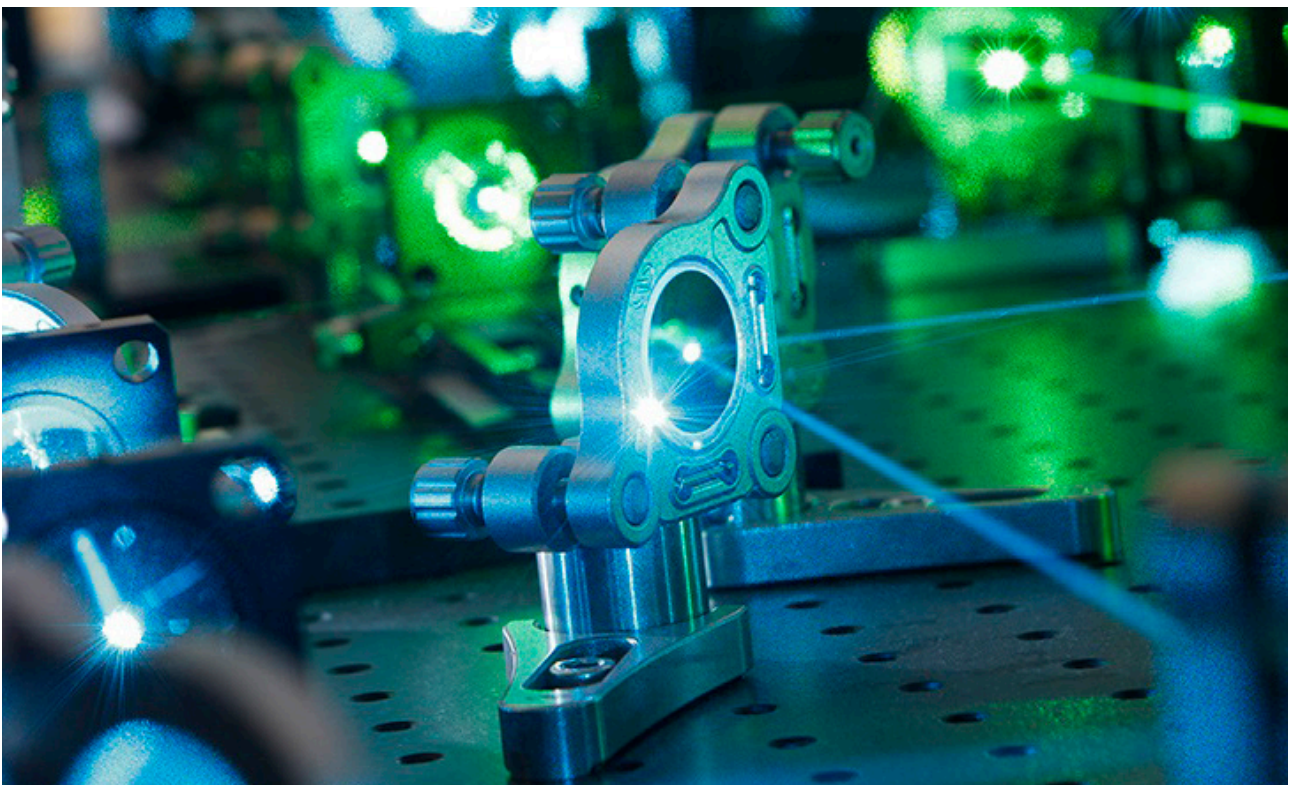
Aishwarya Nair

Ayiben Nuerbahati

Lenny Reinkensmeier

Dr. René Siegmund

Leonie Tomm



Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Das Beobachten der Mikro- und Nanowelt im Inneren biologischer Zellen mithilfe bildgebender Methoden eröffnet beispiellose Möglichkeiten zum Verständnis von zellulären Prozessen. Dieser Erkenntnisgewinn ist ein Schlüssel für die Aufklärung von Krankheitsmechanismen und für die Entwicklung innovativer Diagnoseverfahren und neuer Medikamente.

Die Fluoreszenzmikroskopie hat sich in den Lebenswissenschaften als unverzichtbares Werkzeug etabliert, obwohl sie lange Zeit einer wesentlichen Einschränkung unterlag. Ihre Auflösung war durch die Wellennatur des Lichts auf 200 bis 300 Nanometer begrenzt, was den Zugang zur molekularen Größenskala verwehrt. Die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie umgeht diese Limitierung und bedient sich hierzu eines Tricks. Dabei werden die Eigenschaften fluoreszierender Markermoleküle genutzt, um die Informationen, die sich innerhalb eines verwaschenen Lichtflecks befinden, sequenziell auszulesen. Auf diese Weise ist die Auflösung eines "optischen Nanoskops" nicht mehr durch die Lichtbeugung limitiert, und der Blick in die Nanowelt der Zelle wird scharf. Für ihre bahnbrechenden Beiträge zur Entwicklung der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie wurden 2014 Stefan W. Hell, Eric Betzig und William E. Moerner mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet. Die Abteilung "Optische Nanoskopie" widmet sich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung auf diesem Gebiet und entwickelt das Methodenspektrum der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie kontinuierlich weiter.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt der Abteilung ist die Bildgebung lebender Zellen mittels Biolumineszenz. In diesem Prozess, der in der Natur etwa bei Glühwürmchen vorkommt, wird Licht durch eine biochemische Reaktion von den Zellen selbst erzeugt und kann direkt für die Bildgebung genutzt werden. Anders als bei fluoreszenzbasierten Methoden ist daher kein Anregungslicht erforderlich, was eine besonders probenschonende Bildgebung über längere Zeiträume hinweg ermöglicht.

Observing the micro- and nanoworld within biological cells using imaging methods provides unprecedented opportunities to gain insights into cellular processes. Such knowledge is crucial for unraveling disease mechanisms and for the development of innovative diagnostic tools and novel therapeutics.

Fluorescence microscopy has established itself as an indispensable tool in the life sciences, although it was long constrained by a fundamental limitation. The resolution of the fluorescence microscope was limited to 200 to 300 nanometers by the wave nature of light, which prevented access to the molecular scale. Super-resolution fluorescence microscopy overcomes this limitation by employing an elegant physical principle. It leverages the properties of fluorescent marker molecules to sequentially read out the information within a diffraction-limited spot. In this way, the resolution of an "optical nanoscope" is no longer limited by light diffraction, enabling a clear view into the cell's nanoworld. For their pioneering contributions to the development of super-resolution fluorescence microscopy, Stefan W. Hell, Eric Betzig, and William E. Moerner were awarded the Nobel Prize in Chemistry in 2014. The "Optical Nanoscopy" department is dedicated to application-oriented fundamental research in this area and continually expands the methodological spectrum of super-resolution fluorescence microscopy.

Another research focus of the department is live-cell imaging using bioluminescence. In this process, which occurs naturally in organisms such as fireflies, light is produced by a biochemical reaction within the cells themselves and can be directly harnessed for imaging. Unlike fluorescence-based methods, bioluminescent imaging does not require excitation light, allowing for long-term imaging with minimal impact on the sample.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Multimodale Bildgebungsplattform mit nanoskaliger Auflösung

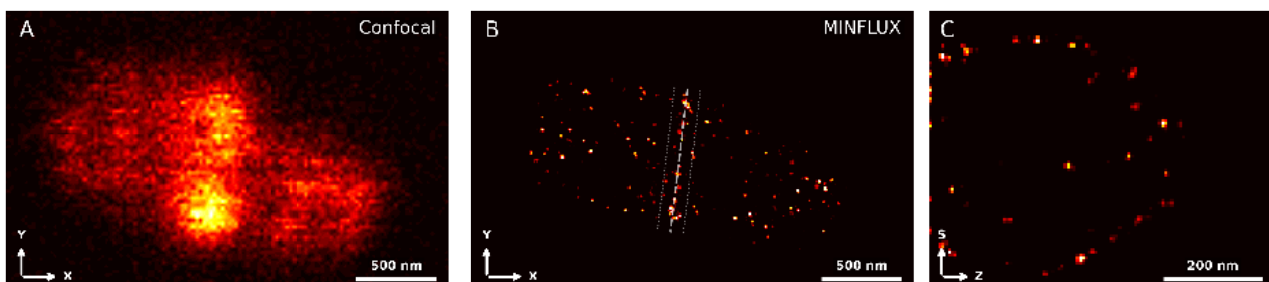
Die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie hat in den vergangenen Jahren entscheidend dazu beigetragen, die strukturelle Organisation biologischer Systeme bis in den Nanometerbereich sichtbar zu machen. Dennoch bleibt das Verständnis zellulärer Prozesse unvollständig, solange strukturelle Informationen nicht mit funktionellen und biochemischen Eigenschaften der Probe verknüpft wird. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Entwicklung integrativer Bildgebungsansätze zunehmend an Bedeutung.

Im Rahmen des EU-geförderten Projekts NanoVIB arbeiteten wir daher in enger Kooperation mit Partnern aus Schweden, der Schweiz und Deutschland an der Entwicklung einer innovativen, multimodalen Bildgebungsplattform. Als technologische Basis diente ein MINFLUX-Nanoskop, das eine Lokalisierungspräzision im Bereich einzelner Nanometer ermöglicht und damit ein zentrales Ziel der biomedizinischen Bildgebung verwirklicht: die dreidimensionale Darstellung zellulärer Strukturen auf der Längenskala einzelner funktioneller Einheiten biologischer Makromoleküle.

Multimodal imaging platform with nanoscale resolution

High-resolution fluorescence microscopy has made a decisive contribution in recent years to visualizing the structural organization of biological systems down to the nanometer scale. Nevertheless, our understanding of cellular processes remains incomplete as long as structural information is not linked to the functional and biochemical properties of the sample. In this context, the development of integrative imaging approaches is becoming increasingly important.

Within the framework of the EU-funded NanoVIB project, we therefore worked in close collaboration with partners from Sweden, Switzerland, and Germany to develop an innovative multimodal imaging platform. A commercial MINFLUX nanoscope served as the technological basis, enabling localization precision on the order of a few nanometers and thereby realizing a central goal of biomedical imaging: the three-dimensional visualization of cellular structures at the length scale of individual functional units of biological macromolecules.



MINFLUX-Bild des Teilungsproteins FtsZ in fixierten *E. coli*-Bakterien. Zur Bildgebung wurde die DNA-PAINT-Methode unter Verwendung des Farbstoffs Atto655 eingesetzt. FtsZ ist ein zentrales Protein der bakteriellen Zellteilung. Ist das Bakterium zur Teilung bereit, sammelt sich FtsZ in der Zellmitte und bildet den sogenannten Z-Ring. A) Konfokales Übersichtsbild: Der Z-Ring ist durch ein erhöhtes Fluoreszenzsignal in der Zellmitte erkennbar. B) MINFLUX-xy-Positionshistogramm: Neben der erhöhten Ansammlung von FtsZ in der Zellmitte ist auch zytosolisches FtsZ sichtbar. C) Schnitt durch die Zellmitte: Die hohe Lokalisationsgenauigkeit der MINFLUX-Nanoskopie wird sichtbar; der Z-Ring ist klar aufgelöst.

MINFLUX image of the division protein FtsZ in fixed *E. coli* bacteria. Imaging was performed using the DNA-PAINT method with the dye Atto655. FtsZ is a key protein in bacterial cell division. When the bacterium is ready to divide, FtsZ accumulates at the cell center and forms the so-called Z-ring. A) Confocal overview image: The Z-ring is visible as an increased fluorescence signal at the cell center. B) MINFLUX xy position histogram: In addition to the increased accumulation of FtsZ at the cell center, cytosolic FtsZ is also visible. C) Cross-section through the cell center: The high localization precision of MINFLUX nanoscopy becomes evident; the Z-ring is clearly resolved.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

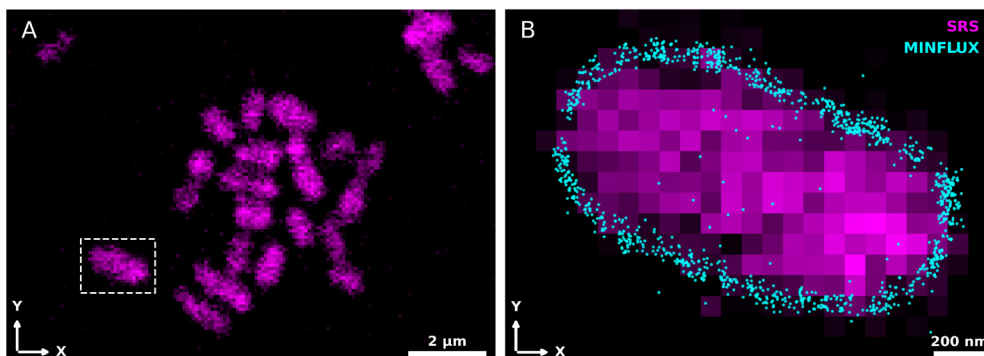
Zentrale Bestandteile der Plattformentwicklung waren die Erweiterung des Spektralbereichs für die MINFLUX-Bildgebung sowie die Integration weiterer Modalitäten, wie Zweiphotonen-Fluoreszenzmikroskopie, Transient-State-Imaging (TRAST) sowie stimulierter Raman-Streuung (SRS).

Während MINFLUX die präzise Bestimmung der Position einzelner fluoreszierender Marker erlaubt, liefert die Zwei-Photonen-Mikroskopie ein räumliches Gesamtbild der Probe und ermöglicht die Untersuchung dynamischer Prozesse auch in größeren Volumina und Probentiefen. Ergänzend dazu erschließt TRAST Informationen über die Mikroumgebung der Fluorophore. Die markerfreie SRS-Mikroskopie erlaubt darüber hinaus eine orts aufgelöste Analyse der chemischen Zusammensetzung der Probe. Auf diese Weise wird es möglich, nanometergenaue Moleküllokalisationen in einen umfassenden strukturellen, funktionellen und chemischen Kontext einzuordnen.

Die entwickelte multimodale Plattform soll dazu beitragen, molekulare Mechanismen – unter anderem bei Pneumokokken-Erkrankungen, die weltweit mit hoher Morbidität und Mortalität einhergehen – besser zu verstehen. Wir sind zuversichtlich, dass dieser integrative Ansatz einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung neuer, effektiverer Behandlungsmöglichkeiten leisten und langfristig dazu beitragen wird, schwere Krankheitsverläufe zu verhindern.

Key aspects of the platform development included the extension of the spectral range for MINFLUX imaging, as well as the integration of additional imaging modalities, including two-photon fluorescence microscopy, transient-state imaging (TRAST), and stimulated Raman scattering (SRS). While MINFLUX allows for the precise localization of individual fluorescent markers, two-photon microscopy provides a spatial overview of the sample and enables the investigation of dynamic processes in larger volumes and at greater sample depths. In addition, TRAST offers information about the local microenvironment of fluorophores. The label-free SRS microscopy further enables spatially resolved analysis of the chemical composition of the sample. Together, these approaches make it possible to place nanometer-precise molecular localizations into a comprehensive structural, functional, and chemical context.

The developed multimodal platform is intended to contribute to a better understanding of molecular mechanisms, including those involved in pneumococcal diseases – severe infections associated with high morbidity and mortality worldwide. We are confident that this integrative approach will make an important contribution to the development of new and more effective therapeutic strategies and, in the long term, help to prevent severe disease outcomes.



Korrelative SRS- und MINFLUX-Bildgebung an fixierten *E. coli*-Bakterien. A) SRS-Übersichtsaufnahme mehrerer Zellen. Dargestellt ist das SRS-Signal der Raman-Bande bei 1100 cm^{-1} . B) Detailaufnahme einer einzelnen Zelle. Das SRS-Signal (magenta) ist mit einem MINFLUX-Positionshistogramm (cyan) überlagert, das die Lokalisation einzelner Membranmoleküle zeigt.

Correlative SRS and MINFLUX imaging of fixed *E. coli* bacteria. A) SRS overview image of multiple bacteria displaying the SRS signal of the Raman band at 1100 cm^{-1} . B) Close-up of a single cell. The SRS signal (magenta) is overlaid with a MINFLUX position histogram (cyan), visualizing the localization of individual membrane molecules.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Schnelle und präzise Driftkorrektur für die einzel-molekülbasierte Nanoskopie

Wie aus der alltäglichen Photographie bekannt ist, führen Bewegungen des Objekts während der Belichtungszeit zu Unschärfen im Bild. Dasselbe gilt auch für die Mikroskopie. Mit dem Aufkommen immer leistungsfähigerer Mikroskopiemethoden, mit denen heute feinste Details biologischer Proben bis in den Nanometerbereich aufgelöst werden können, steigen die Anforderungen an die Stabilität von Mikroskop und Probe deutlich. Dies stellt insbesondere für Methoden der Single Molecule Localization Microscopy (SMLM) wie STORM und MINFLUX eine Herausforderung dar, da diese auf vergleichsweise lange Aufnahmezeiten angewiesen sind.

Um die Auswirkungen von Probenbewegungen zu korrigieren und die Bildschärfe wiederherzustellen, wurden Computeralgorithmen entwickelt, die die Drift aus den Messdaten bestimmen und anschließend korrigieren können. Bisher etablierte Driftkorrekturverfahren für SMLM beruhen auf einer groben zeitlichen Unterteilung der Daten und können daher nur langsam variierende Probedrift zuverlässig korrigieren.

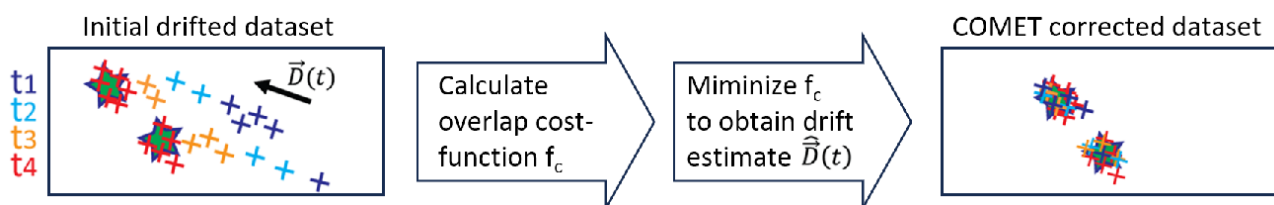
Wir entwickeln daher einen neuen Ansatz zur Driftkorrektur, der die Messdaten effizienter nutzt, um die Probedrift mit deutlich höherer zeitlicher Auflösung und hoher Präzision zu bestimmen.

Fast and precise drift correction for single-molecule-based nanoscopy

As is well known from everyday photography, motion of the object during the exposure leads to image blur. The same principle also applies to microscopy. With the advent of ever more powerful microscopy methods capable of resolving the finest details of biological samples down to the nanometer scale, the stability requirements for both the microscope and the sample have become significantly more demanding. This poses a particular challenge for Single Molecule Localization Microscopy (SMLM) methods such as STORM and MINFLUX, which typically rely on comparatively long data acquisition times.

To compensate for sample motion and restore image sharpness, computational algorithms have been developed that estimate the drift from the recorded data and correct it during post-processing. Existing drift-correction approaches for SMLM rely on a coarse temporal segmentation of the data and can therefore reliably correct only slowly varying sample drift.

To overcome this limitation, we are developing a new drift-correction approach that makes more efficient use of the recorded data to determine sample drift with much higher temporal resolution and precision.



▲ COMET-Prinzip: Links: Originaldatensatz mit den Lokalisationen zweier Emitter, die während der Datenaufnahmezeit von einer zeitabhängigen Drift beeinflusst wurden. Mitte: Unter Verwendung einer mathematische Kostenfunktion, die den Grad der räumlichen Überlagerung der Moleküllokalisationen beschreibt, sowie eines Optimierungsalgorithmus wird der Driftvektor bestimmt, der der tatsächlichen experimentellen Drift entspricht. Rechts: Korrigierter Datensatz, in dem die driftinduzierte Unschärfe vollständig eliminiert ist.

COMET principle: Left: Original dataset showing the localizations of two emitters affected by time-dependent drift during data acquisition. Center: Using a mathematical cost function that quantifies the spatial overlap of the molecular localizations, together with an optimization algorithm, the drift vector corresponding to the true experimental drift is determined. Right: Drift-corrected dataset in which the drift-induced blur has been fully eliminated.

Optische Nanoskopie

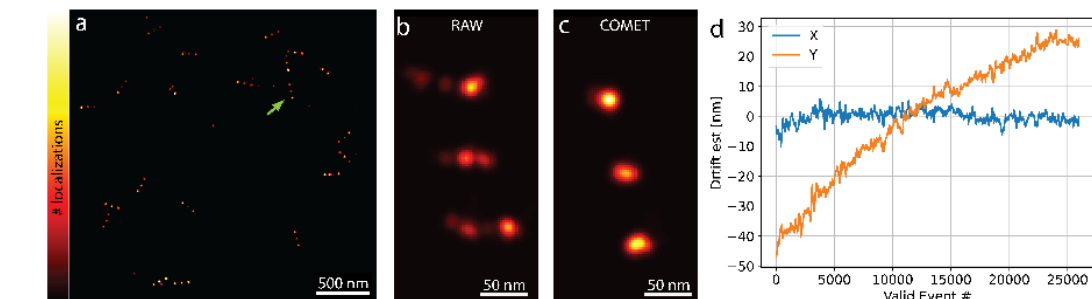
Optical Nanoscopy

Unsere Methode basiert auf der Annahme, dass der zeitabhängige Driftvektor, der die Moleküllokalisationen im Datensatz maximal überlappt, der tatsächlichen experimentellen Drift entspricht. MINFLUX-Messungen an nanoskopischen „DNA-Linialen“ verdeutlichen die Leistungsfähigkeit unseres Ansatzes, den wir als „Cost-Optimized Maximal Overlap Drift Estimation“ (COMET) bezeichnen. In den Rohdaten sind die drei fluoreszenzmarkierten Punkte der Nanoliniale zwar erkennbar, erscheinen jedoch aufgrund der während der Aufnahme aufgetretenen Probenbewegung unscharf. Durch Anwendung des COMET-Algorithmus wird diese Drift korrigiert, sodass die Punkte klar voneinander getrennt sind und eine quantitative Analyse der Struktur möglich ist.

Wir haben gezeigt, dass COMET im Vergleich zu bestehenden Methoden eine bis zu 50-fach höhere zeitliche Auflösung des Driftschätzers erreicht. Dies führt direkt zu einer verbesserten Bildauflösung, da die Unschärfefekte der Probedrift vollständig eliminiert werden können. Zudem zeichnet sich COMET durch eine 100-fach kürzere Berechnungszeit im Vergleich zu herkömmlichen Driftkorrekturmethode aus. COMET steht als Open-Source-Online-Tool zur Verfügung und kann unmittelbar auf bestehende SMLM-Datensätze angewendet werden, um nachträglich driftfreie Bilder zu erhalten.

Our method is based on the assumption that the time-dependent drift vector that maximizes the spatial overlap of molecular localizations in the dataset corresponds to the true experimental drift. The performance of this approach, which we termed Cost-Optimized Maximal Overlap Drift Estimation (COMET), is demonstrated using MINFLUX measurements of nanoscopic DNA nanorulers. In the raw data, the three fluorescently labeled dots on the nanorulers are visible but appear blurred due to sample motion during data acquisition. After applying the COMET algorithm, the drift is corrected, resulting in clearly separated dots and enabling a quantitative analysis of the structure.

We have shown that COMET improves the temporal resolution of the drift estimate by up to a factor of 50 compared with existing approaches. As a direct consequence, image resolution is enhanced because the blurring effects caused by sample drift can be effectively eliminated. In addition, COMET offers a major computational advantage: the processing time is up to 100 times shorter than that of conventional drift-correction methods. COMET is available as an open-source online tool and can be readily applied to existing SMLM datasets, enabling post-processing to obtain drift-free images.



COMET-Anwendungsbeispiel. a) Ausschnitt der gerenderten Darstellung von MINFLUX-Messdaten einer Probe mit DNA-Nanolinialen (3x80nm, GATTAQUANT). Die Messdaten wurden mit COMET driftkorrigiert. b,c) Vergrößerung der in a) mit einem grünen Pfeil markierten Struktur vor (b) und nach (c) der Driftkorrektur. d) Graph der ermittelten Drift in Abhängigkeit von der nach Zeit sortierten Event-Nummern, wobei ein Event den Lokalisationen eines einzelnen Moleküls entspricht. Der Graph zeigt, dass COMET in der Lage ist schnelle Änderungen der Drift zu detektieren.

COMET application example. a) Cropped region of a rendered MINFLUX dataset, recorded on a sample containing DNA nanorulers (3x80 nm, GATTAQUANT). The data were corrected for drift using COMET. b,c) Close-up of the structure marked by a green arrow in a), showing the data before (b) and after (c) drift correction. d) Graph of the estimated drift versus event number, sorted by time, with each event corresponding to the localizations of a single molecule. As demonstrated by this result, COMET is capable of detecting rapid fluctuations in the drift.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Entwicklung einer innovativen Technologieplattform für die Membranforschung

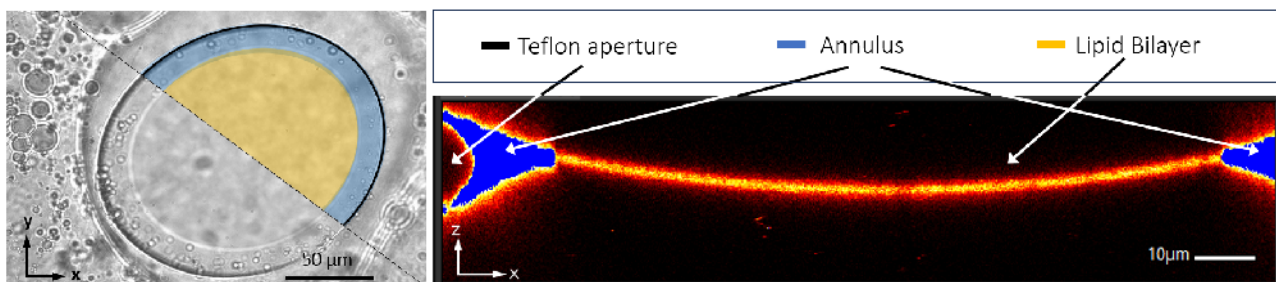
Biologische Zellen sind von einer Membran umgeben, die als Barriere zwischen der Zelle und ihrer Umgebung dient. Diese Membranen bestehen hauptsächlich aus Lipiden und Proteinen und erfüllen zentrale Funktionen wie Signalübertragung und Stofftransport. Ihre Eigenschaften werden maßgeblich durch ihre nanoskalige Organisation sowie die Beweglichkeit ihrer molekularen Bestandteile bestimmt. Daher sind hochpräzise optische Messungen von dynamischen Membranprozessen entscheidend, um die Funktionsweise der Zellmembran besser zu verstehen.

Künstliche Lipiddoppelschichten stellen für die Membranforschung ein geeignetes Modellsystem dar, da sie grundlegende Eigenschaften natürlicher Zellmembranen nachbilden können, ohne durch komplexe Wechselwirkungen mit zellulären Komponenten beeinflusst zu werden. Freistehende Lipiddoppelschichten sind für solche Studien besonders attraktiv, da sie im Gegensatz zu substratgestützten Schichten keine Wechselwirkungen mit festen Oberflächen aufweisen. Ihre optische Untersuchung ist jedoch vergleichsweise anspruchsvoll: Die Lipiddoppelschicht ist typischerweise durch ein Flüssigkeitsreservoir vom Deckglas getrennt, was die Verwendung von Wasser-Immersionsoberflächen erfordert und die Bildqualität aufgrund optischer Aberrationen deutlich verschlechtern kann.

Development of an innovative technology platform for membrane research

Biological cells are surrounded by a membrane that acts as a barrier between the cell and its environment. These membranes consist mainly of lipids and proteins and perform essential functions such as signalling and molecular transport. Their properties are largely determined by the nanoscale organization and mobility of their molecular components. High-precision optical measurements of dynamic membrane processes are therefore crucial for improving our understanding of membrane function.

Artificial lipid bilayers provide a suitable model system for membrane research because they can reproduce key properties of natural cell membranes without being affected by complex interactions with cellular components. Free-standing lipid bilayers are particularly attractive for such studies, because, unlike substratesupported bilayers, they do not interact with solid surfaces. However, their optical investigation is considerably more challenging: the lipid bilayer is typically separated from the coverslip by a liquid reservoir, which requires the use of water-immersion objective lenses and can significantly degrade image quality due to optical aberrations.



▲ Mikroskopieaufnahmen einer freistehenden Lipiddoppelschicht, die in einer Teflonapertur mit ca. 120 µm Durchmesser aufgespannt ist. Links: Hellfeldaufnahme (Draufsicht) mit nachträglicher Einfärbung der Apertur (schwarz), des Annulus (blau) und der Lipiddoppelschicht (orange) in der oberen rechten Bildhälfte. Rechts: Konfokalaufnahme einer fluoreszenzmarkierten Lipiddoppelschicht (zentraler Querschnitt, Falschfarbendarstellung).

Microscopy images of a free-standing lipid bilayer stretched across a Teflon aperture with a diameter of approximately 120 µm. Left: Brightfield image (top view) with the aperture, annulus, and lipid bilayer highlighted in black, blue and orange in the upper right half of the image. Right: Confocal image of a fluorescently-labelled lipid bilayer (central cross-section, false-color representation).

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Gemeinsam mit unserem Kooperationspartner Ionovation entwickeln wir daher eine Technologieplattform, mit der künftig künstliche, freistehende Lipiddoppelschichten direkt auf dem Mikroskop erzeugt und optisch mit nanoskaliger Auflösung untersucht werden können. Für die optische Analyse verwenden wir das MINFLUX-Prinzip, das nanoskalige Lokalisation mit einer zeitlichen Auflösung kombiniert, die im Vergleich zu kamerabasierten Trackingverfahren bis zu hundertfach höher ist.

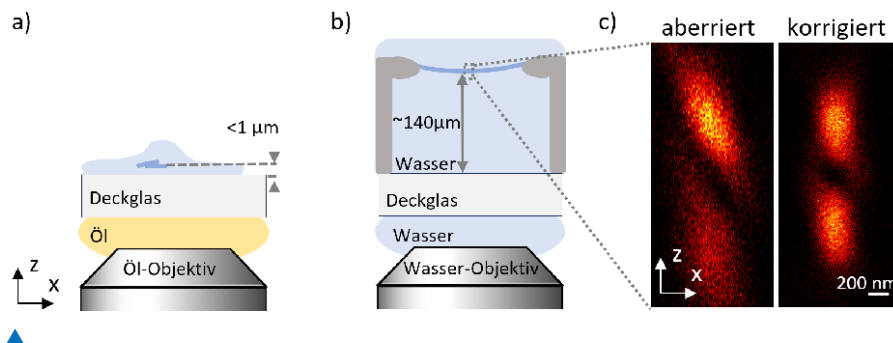
Bislang wurden MINFLUX-Messungen überwiegend mit Öl-Immersionsobjektiven durchgeführt, weshalb Untersuchungen in der Praxis auf substratgestützte Lipiddoppelschichten in unmittelbarer Deckglasnähe beschränkt waren. Im Rahmen des laufenden Projekts implementieren wir daher MINFLUX-Messungen mit einem Wasser-Immersionsobjektiv in freistehenden Lipidmembranen und zeigen, dass durch geeignete Aberrationskorrekturverfahren die Datenqualität auch bei größeren Abständen zwischen Lipiddoppelschicht und Deckglas erhalten bleibt.

Die innovative Technologieplattform wird neue Möglichkeiten zur hochauflösenden Untersuchung der Organisation und Dynamik biologischer Membranen eröffnen, wovon perspektivisch verschiedenste Forschungsfelder wie Zellbiologie, Toxikologie und Wirkstoffentwicklung profitieren können.

In collaboration with our partner Ionovation, we are therefore developing a technology platform aimed at generating artificial free-standing lipid bilayers directly on the microscope and studying them with nanoscale optical resolution. For the optical analysis we employ the MINFLUX principle, which combines nanoscale molecular localization with a temporal resolution up to one hundred times higher than camera-based tracking methods.

Until now, MINFLUX measurements have mainly relied on oil-immersion objective lenses, which in practice has restricted investigations to substrate-supported bilayers located close to the coverslip. Within the framework of the ongoing project, we are therefore implementing MINFLUX measurements with a water-immersion objective lens in free-standing lipid bilayers. We demonstrate that suitable aberration-correction approaches preserve data quality even at larger distances between the lipid bilayer and the coverslip.

The innovative technology platform will open new possibilities for high-resolution investigations of the organization and dynamics of biological membranes. In the long term, a wide range of research fields, including cell biology, toxicology, and drug development, may benefit from these advances.



MINFLUX-Bildgebung. a) Übliche Geometrie mit Öl-Immersionsobjektiv und einer Probenebene in unmittelbarer Nähe der Deckglasoberfläche (Darstellung nicht maßstabsgetreu). b) Geometrie für optische Untersuchungen einer freistehenden Lipiddoppelschicht in größerem Abstand zum Deckglas unter Verwendung eines Wasser-Immersionsobjektivs. c) Fokale Intensitätsverteilung des MINFLUX-Anregungsfokus, beeinflusst durch probeninduzierte Aberrationen (links) und nach erfolgreicher Aberrationskorrektur (rechts). MINFLUX imaging. a) Conventional geometry using an oil-immersion objective lens with the sample plane located in close proximity to the coverslip surface (not to scale). b) Geometry for optical investigations of a free-standing lipid bilayer at a larger distance from the coverslip using a water-immersion objective lens. c) Focal intensity distribution of the MINFLUX excitation focus, affected by sample-induced aberrations (left) and after successful aberration correction (right).

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Schnelle STED-Bildgebung durch adaptive Probenrasterung

Die STED-Mikroskopie hat sich in den Lebenswissenschaften zu einem unverzichtbaren Werkzeug entwickelt, da sie mit einer typischerweise zehnfach verbesserten optischen Auflösung Details sichtbar machen kann, die herkömmlichen Fluoreszenzmikroskopen verborgen bleiben. Infolgedessen findet sie erfolgreich Anwendung in verschiedensten Bereichen wie der Zellbiologie, Immunologie und Krebsforschung.

Das Prinzip der STED-Mikroskopie beruht darauf, dass ein ringförmiger Laserfokus, der mit einem Anregungsfokus überlagert ist, die Größe des fluoreszierenden Bereichs durch stimulierte Emission einengt, was einer Verbesserung der räumlichen Auflösung gleichkommt. Zur Bilderstellung wird dieser verkleinerte fluoreszierende Bereich pixelweise über das Bildfeld gerastert.

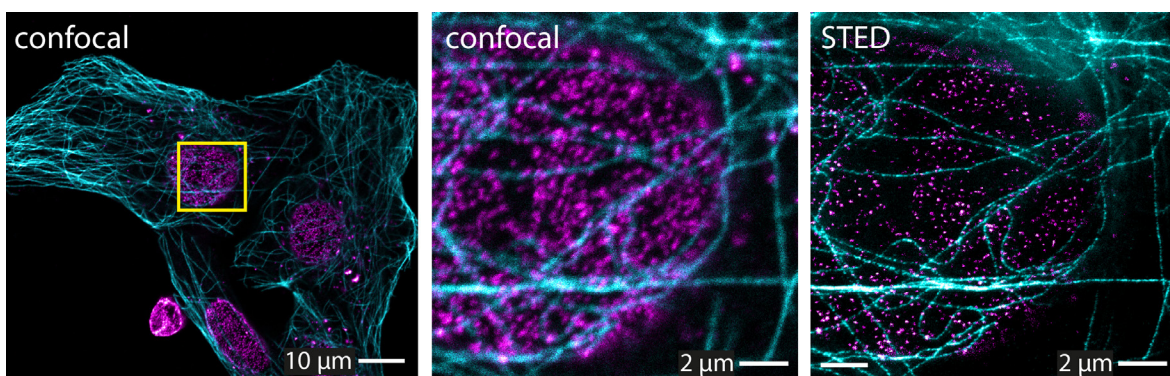
Solche rasterbasierten Nanoskopiemethoden bieten gegenüber weitfeldbasierten Techniken inhärente Vorteile für die Beobachtung schneller dynamischer Prozesse in biologischen Zellen: Da die Aufnahmezeit mit der Anzahl der Rasterpositionen skaliert, kann die Bildgebung erheblich beschleunigt werden, wenn nur ein kleiner Bereich der Probe untersucht wird.

Fast STED imaging through adaptive sample scanning

STED microscopy has become an indispensable tool in the life sciences, as its typically tenfold improved optical resolution enables the visualization of details that remain hidden to conventional fluorescence microscopes. As a result, it has been successfully applied in a wide range of fields, including cell biology, immunology, and cancer research.

The principle of STED microscopy relies on a ring-shaped laser focus that is superimposed with an excitation focus and confines the size of the fluorescent region through stimulated emission, which corresponds to an improvement in spatial resolution. For image acquisition, this reduced fluorescent region is scanned pixel by pixel across the field of view.

Such scanning-based nanoscopy methods offer inherent advantages over wide-field techniques for observing fast dynamic processes in biological cells: since the acquisition time scales with the number of scan positions, imaging can be significantly accelerated when only a small region of the sample is investigated.



Konfokales Übersichtsbild (links) von fluoreszenzmarkierten biologischen Zellen (cyan: Mikrotubulinnetzwerk, magenta: Kernporen) sowie konfokales (Mitte) und STED-Bild (rechts) des im Übersichtsbild markierten gelben Bereichs.

Confocal overview image (left) of fluorescently labeled biological cells (cyan: microtubule network, magenta: nuclear pores), as well as confocal (center) and STED image (right) of the yellow region marked in the overview image.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Obwohl in der Praxis biologische Proben häufig räumlich ausgedehnt sind, treten die interessierenden Strukturen typischerweise nur lokal auf. Daher ist eine vollständige Aufnahme des gesamten Bildfelds oft ineffizient, und eine Beschränkung auf die tatsächlich relevanten Bereiche könnte sowohl die Bildgebung beschleunigen als auch die eingebrachte Lichtdosis deutlich reduzieren.

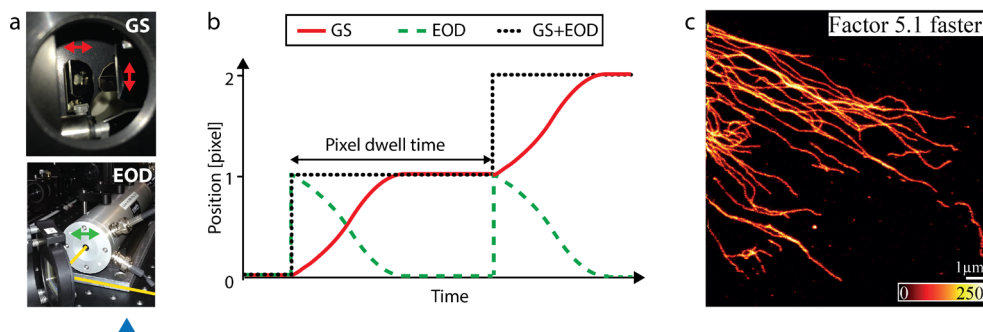
Um dies technisch zu realisieren, verwenden wir ein eigens entwickeltes Scansystem, das einen galvanometrischen Scanner mit elektrooptischen Deflektoren kombiniert und so eine geringe Latenzzeit mit einem großen Bildfeld verbindet. Die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes konnten wir bereits für RESCue-STED demonstrieren: Sobald an einer Position genügend Informationen gesammelt wurden, wird nicht – wie üblicherweise – der Laser abgeschaltet, sondern direkt die nächste Rasterposition angesteuert. Auf diese Weise konnten nicht nur die in die Probe eingebrachte Lichtdosis, sondern auch die Aufnahmezeit um mindestens einen Faktor fünf reduziert werden.

Das kombinierte Scansystem eröffnet dank der präzisen und schnellen Adressierbarkeit einzelner Rasterpositionen weitere Anwendungsmöglichkeiten, wie etwa das Verfolgen von Partikeln oder Filamentdynamiken in Echtzeit. Damit trägt dieser Ansatz zur Umsetzung innovativer Strategien für die dynamische Bildgebung bei.

Although biological samples are often spatially extended in practice, the structures of interest typically occur only locally. Consequently, acquiring the entire field of view is often inefficient, and restricting the scan to the relevant regions could therefore both accelerate imaging and substantially reduce the light dose applied to the sample.

To implement this approach, we use a dedicated, custom-developed scan system that combines a galvanometric scanner with electro-optical deflectors, thereby achieving low latency while maintaining a large field of view. The performance of this approach was demonstrated for RESCue-STED: once sufficient information has been collected at a given position, the laser is not switched off – as is commonly done – but the system directly moves to the next scan position. In this way, both the light dose applied to the sample and the acquisition time could be reduced by at least a factor of five.

The combined scan system enables additional applications, such as real-time tracking of particles or filament dynamics, thanks to its precise and rapid addressing of individual scan positions. This approach thus contributes to the development of innovative strategies for dynamic imaging.



a,b) Kombiniertes Scansystem: a) Foto zweier galvanometrischer Scanspiegel (GS) und eines elektrooptischen Deflektors (EOD). b) Prinzip des Zusammenspiels beider Komponenten für schnelle Sprünge zwischen Rasterpositionen. c) STED-Bildgebung von Vimentin in Fibroblasten mit fünffach beschleunigter Aufnahme unter Verwendung des kombinierten Scansystems.

a,b) Combined scan system: a) Photograph of the galvanometric scanning mirrors (GS) and an electro-optical deflector (EOD). b) Principle of the interplay between both components for rapid jumps between scan positions. c) STED imaging of vimentin in fibroblasts acquired with a fivefold faster acquisition time using the combined scan system.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Schnelle hyperspektrale SRS-Mikroskopie für die biochemische Bildgebung

Informationen über die biochemischen und strukturellen Eigenschaften biologischer Zellen sind von entscheidender Bedeutung für das Verständnis zellulärer Prozesse. Eine leistungsfähige Kontrastmethode für solche Untersuchungen ist die Mikroskopie auf Basis stimulierter Raman-Streuung (SRS). Im Gegensatz zu fluoreszenzmikroskopischen Techniken ermöglicht sie die Visualisierung molekularer Informationen ohne den Einsatz fluoreszierender Marker.

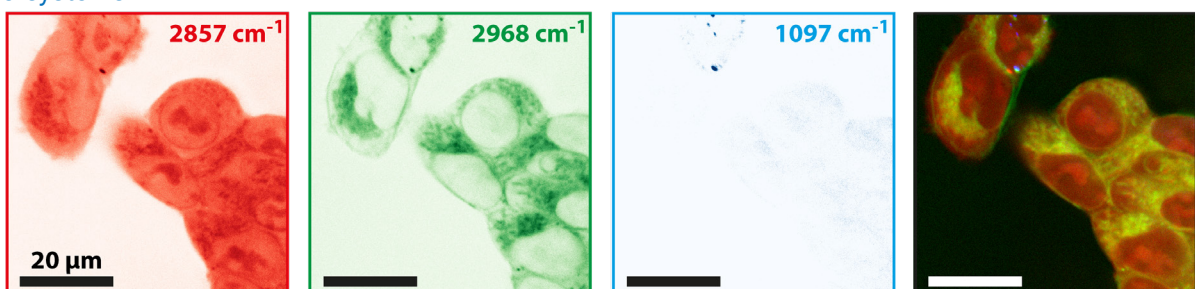
Die SRS-Mikroskopie basiert auf der Wechselwirkung zweier synchronisierter Laserstrahlen, des sogenannten Pump- und des Stokesstrahls. Entspricht die Energiedifferenz zwischen Pump- und Stokesphoton der Vibrationsfrequenz einer spezifischen molekularen Bindung, entstehen kohärente Raman-Signale, die als Intensitätsänderung der eingestrahlten Laserstrahlen detektiert werden können. Durch Variation der optischen Frequenz des Pumpstrahls lassen sich unterschiedliche Vibrationszustände untersuchen, wodurch die spektroskopischen Fingerabdrücke verschiedener Moleküle und Molekülbindungen innerhalb der Probe ortsaufgelöst erfasst werden können. Die erreichbare Bildqualität und Geschwindigkeit der Datenaufnahme hängen dabei nicht nur von den intrinsischen Eigenschaften der Probe ab, sondern maßgeblich auch von den Spezifikationen des eingesetzten Lasersystems.

Fast hyperspectral SRS microscopy for biochemical imaging

Information about the biochemical and structural properties of biological cells is essential for understanding cellular processes. A powerful contrast method for such investigations is microscopy based on stimulated Raman scattering (SRS). In contrast to fluorescence microscopy techniques, it enables the visualization of molecular information without the need for fluorescent markers.

SRS microscopy relies on the interaction of two synchronized laser beams, known as the pump and the Stokes beam. When the energy difference between pump and Stokes photons matches the vibrational frequency of a specific molecular bond, coherent Raman signals are generated and can be detected as intensity changes in the incident laser beams. By tuning the optical frequency of the pump beam, different vibrational states can be probed, allowing the spatially resolved detection of spectroscopic fingerprints of different molecules and molecular bonds.

The achievable image quality and data acquisition speed depend not only on the intrinsic properties of the sample, but also strongly on the specifications of the employed laser system.



Hyperspektrale stimulierte Raman-Mikroskopie an lebenden HEK-Zellen. Die Abbildung zeigt SRS-Bilder, für die drei charakteristische Raman-Banden verwendet wurden (2857 cm^{-1} (rot), 2968 cm^{-1} (grün) und 1097 cm^{-1} (blau)). Die Überlagerung der Einzelbilder (rechts) zeigt die räumliche Verteilung der Moleküle und macht ihre relative Anordnung in der Probe sichtbar.

Hyperspectral stimulated Raman microscopy of living HEK cells. The figure displays SRS images based on three characteristic Raman bands (2857 cm^{-1} (red), 2968 cm^{-1} (green), and 1097 cm^{-1} (blue)). The overlay of the single images (right) reveals the spatial distribution of the molecules, highlighting their relative arrangement within the sample.

Optische Nanoskopie

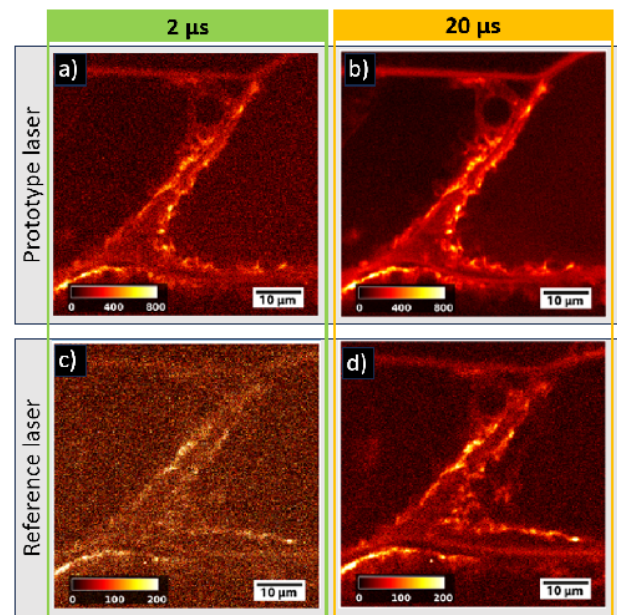
Optical Nanoscopy

Im Rahmen des EU-Projekts NanoVIB haben wir daher zwei Lasersysteme hinsichtlich ihrer Eignung für die SRS-Mikroskopie verglichen: ein kommerziell etabliertes Referenzsystem sowie einen neu entwickelten Laserprototypen unseres Projektpartners APE. Die verbesserten Pulseigenschaften des Prototyps – darunter reduzierte Wiederholrate, erhöhte Energie und optimierte Dauer – erlaubten uns, das Signal-Rausch-Verhältnis der SRS-Mikroskopie um etwa einen Faktor zehn zu steigern. Dadurch wurde es möglich, eine vergleichbare Bildqualität bei deutlich kürzeren Pixelverweildauern zu erzielen. Die geringere Beleuchtungsdauer reduziert die eingebrachte Lichtdosis und trägt dazu bei, die Integrität der Probe zu erhalten und lichtinduzierte Effekte in empfindlichen biologischen Proben zu minimieren. Darüber hinaus ermöglicht der Laserprototyp ein beschleunigtes Frequenztuning des Pumpstrahls und damit eine schnelle sequenzielle Bildgebung über mehrere Raman-Banden hinweg. Diese Fähigkeit ist insbesondere für die hyperspektrale SRS-Bildgebung von Bedeutung und erlaubt die Untersuchung biochemischer Heterogenität in Geweben und anderen komplexen biologischen Proben.

Within the framework of the EU-funded NanoVIB project, we therefore compared two laser systems with regard to their suitability for SRS microscopy: a commercially established reference system and a newly developed laser prototype provided by our project partner APE. The improved pulse characteristics of the prototype – including a reduced repetition rate, increased pulse energy, and optimized pulse duration – allowed us to increase the signal-to-noise ratio in SRS microscopy by approximately a factor of ten. As a result, it became possible to achieve comparable image quality with significantly shorter pixel dwell times. The reduced exposure time lowers the applied light dose, thereby helping to preserve sample integrity and minimize light-induced effects in sensitive biological specimens.

In addition, the laser prototype enables faster frequency tuning of the pump beam, allowing rapid sequential imaging across multiple Raman bands. This capability is particularly important for hyperspectral SRS imaging and facilitates the investigation of biochemical heterogeneity in tissues and other complex biological samples.

SRS-Bilder der CH_2 -Streckschwingung bei 2871 cm^{-1} in epidermalen Zellen einer Zwiebel. Die obere Bildreihe zeigt Aufnahmen mit dem Laserprototypen, die untere Bildreihe Aufnahmen mit dem Referenzlaser. Eine Verlängerung der Pixelverweildauer von $2\ \mu\text{s}$ (links) auf $20\ \mu\text{s}$ (rechts) verbessert die Bildqualität und die Sichtbarkeit der Probenstrukturen für beide Lasersysteme deutlich. Dabei zeigt sich, dass der Prototyp bereits bei einer Pixelverweildauer von $2\ \mu\text{s}$ (a) eine Bildqualität erreicht, die mit der des Referenzlasers bei $20\ \mu\text{s}$ (d) vergleichbar ist. SRS images of the CH_2 stretching vibration at 2871 cm^{-1} in epidermal onion cells. The upper row shows images acquired with the laser prototype, while the lower row shows those obtained with the reference laser. Increasing the pixel dwell time from $2\ \mu\text{s}$ (left) to $20\ \mu\text{s}$ (right) significantly improves image quality and feature visibility for both systems. At a dwell time of $2\ \mu\text{s}$ (a), the prototype laser achieves an image quality comparable to that of the reference laser at $20\ \mu\text{s}$ (d) dwell time.



Optische Nanoskopie Optical Nanoscopy

Autonome Lichterzeugung in lebenden Mäusen

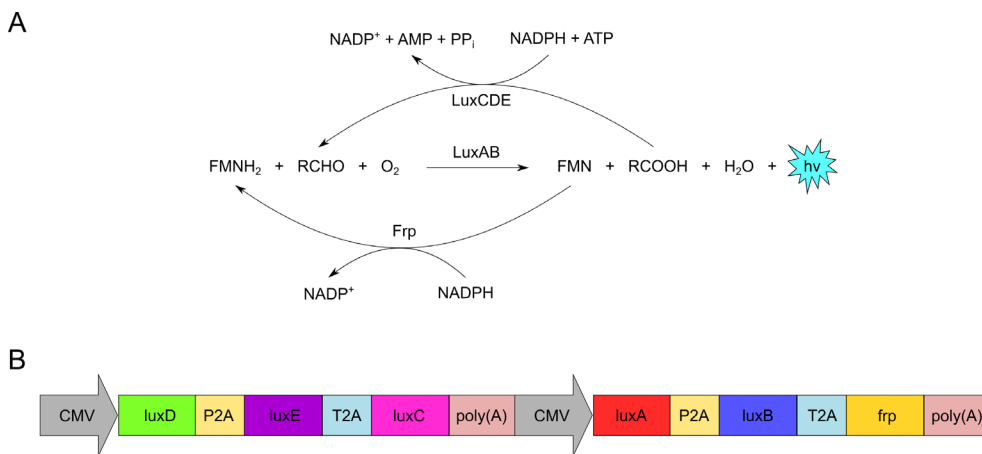
Biolumineszenz ist ein in der Natur vorkommender Prozess, bei dem Lebewesen mithilfe einer chemischen Reaktion Licht erzeugen. Diese Reaktion erfordert ein Substrat, das Luciferin, und wird von einem Enzym, der Luciferase, katalysiert. Biolumineszenz kann für die Bildgebung von lebenden Zellen, Geweben und Organismen ohne Anregungslicht genutzt werden. Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist die Beobachtung von Zellen und biologischen Prozessen im lebenden Tier, wo Fluoreszenzmessungen aufgrund der starken Lichtabsorption im Gewebe und eines hohen Hintergrundsignals durch Autofluoreszenz nur eingeschränkt möglich sind. Darüber hinaus eignet sich die Biolumineszenzbildgebung besonders für Aufnahmen über lange Zeiträume hinweg, da lichtinduzierte Effekte in der Probe, wie Phototoxizität und Photobleichen, vermieden werden.

Ein Nachteil der Biolumineszenzbildgebung ist, dass das Luciferin in den meisten Fällen der Probe von außen zugegeben werden muss. Da es während der Biolumineszenzreaktion verbraucht wird, muss das Luciferin bei Langzeitmessungen wiederholt appliziert werden, was insbesondere im lebenden Tier

Autonomous light generation in living mice

Bioluminescence is a naturally occurring process in which living organisms produce light with the aid of a chemical reaction. This reaction requires a substrate, luciferin, and is catalyzed by an enzyme called luciferase. Bioluminescence can be used for imaging living cells, tissues and organisms without excitation light. An important area of application is the observation of cells and biological processes in living animals, where fluorescence measurements are only possible to a limited extent due to strong light absorption in tissue and high background signals caused by autofluorescence. In addition, bioluminescence imaging is particularly well suited for long-term observations, as light-induced effects in the sample, such as phototoxicity and photobleaching, are avoided.

One disadvantage of bioluminescence imaging is that, in most cases, luciferin has to be added externally to the sample. Because it is consumed by the bioluminescence reaction, luciferin must be applied repeatedly during long-term measurements, which



(A) In der Biolumineszenzreaktion werden ein langkettiger Aldehyd (RCHO) und reduziertes FMN (FMNH₂) durch die bakterielle Luciferase (LuxAB) oxidiert. Die Produkte werden durch den Fettsäurereduktase-Komplex (LuxCDE) bzw. eine Flavinreduktase (Frp) in ihre reduzierte Form zurückverwandelt. (B) Anordnung der für diesen Prozess erforderlichen sechs Gene zur Expression in der Maus. (A) In the bioluminescence reaction, a long-chain aldehyde (RCHO) and reduced FMN (FMNH₂) are oxidized by bacterial luciferase (LuxAB). The products are converted back to their reduced form by the fatty acid reductase complex (LuxCDE) and a flavin reductase (Frp), respectively. (B) Arrangement of the six genes required for this process for expression in mice.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

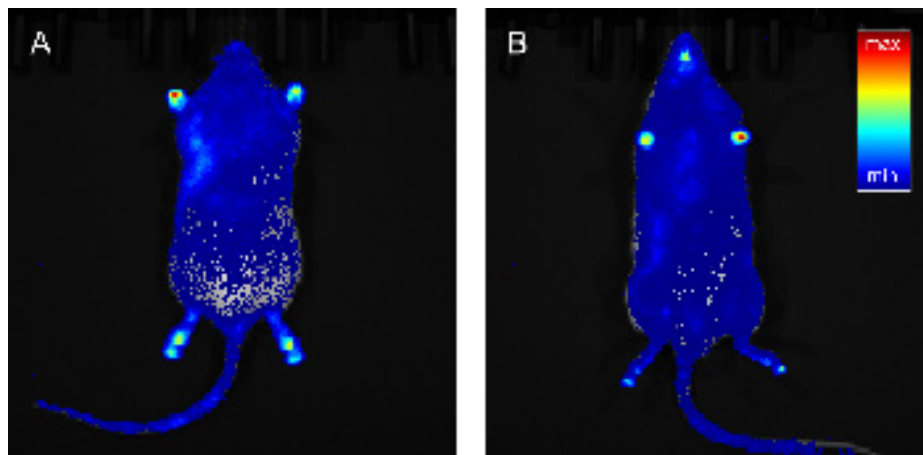
problematisch sein kann und zudem die Quantifizierung des Signals im zeitlichen Verlauf erschwert.

Diese Einschränkungen lassen sich jedoch durch die Verwendung des bakteriellen Biolumineszenzsystems umgehen. Neben der Luciferase werden hierbei weitere Enzyme zur Regenerierung der Substrate in die Zellen eingebracht, was eine vollständig autonome Lichterzeugung ermöglicht.

Das bakterielle Biolumineszenzsystem wurde bislang nur in kultivierten Zellen eingesetzt. Wir konnten dieses System nun erstmals stabil in das Genom von Mäusen integrieren. Damit steht ein neues Tiermodell für die Biolumineszenzbildgebung zur Verfügung, das ohne zusätzliche Substratzugabe unmittelbar für bildgebende Untersuchungen eingesetzt werden kann. Dieser Ansatz eröffnet vielversprechende neue Möglichkeiten für Langzeitstudien, beispielsweise zur Untersuchung von Genexpression oder zirkadianen Rhythmen. Da die Lichtemission von der zellulären Energieversorgung abhängt, kann dieser Ansatz zudem zur Untersuchung von Krankheiten eingesetzt werden, bei denen Stoffwechselprozesse gestört sind oder die zum Zelltod führen. Dazu zählen unter anderem neurologische Erkrankungen, die mit einem Verlust von Nervenzellen einhergehen.

can be particularly problematic in living animals and also complicates the quantification of the signal over time. However, these limitations can be overcome by using the bacterial bioluminescence system. In addition to the luciferase, further enzymes for regenerating the substrates are introduced into the cells, enabling completely autonomous light generation.

The bacterial bioluminescence system has only been used in cultured cells to date. We have now been able to stably integrate this system into the genome of mice for the first time. This provides a new animal model for bioluminescence imaging that can be used directly for imaging experiments without the need for external substrate administration. This approach opens promising opportunities for long-term studies, for example to investigate gene expression or circadian rhythms. Since light emission depends on the cellular energy supply, this strategy can also be used to study diseases in which metabolic processes are impaired or which lead to cell death. These include neurological diseases associated with the loss of nerve cells.



Substratfreie Lichtemission einer lebenden Maus in (A) Bauch- und (B) Rückenlage. Die Helligkeit ist in der gezeigten Farbskala kodiert. Substrate-free light emission of a living mouse in (A) prone and (B) supine position. Brightness is encoded in the color scale shown.

Optische Nanoskopie

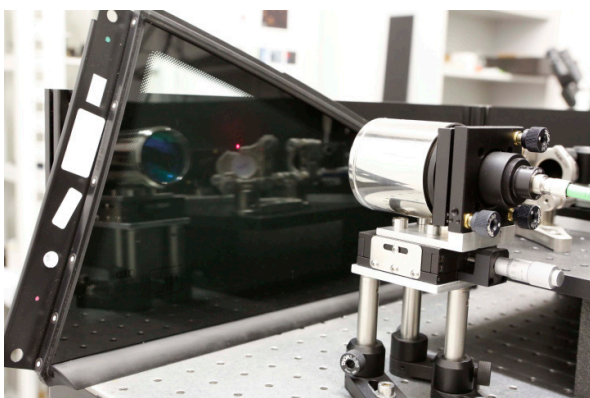
Optical Nanoscopy

Tiefenaufgelöste Charakterisierung spannungsinduzierter Effekte in Glas

Fahrzeugverglasungen haben sich durch die zunehmende Integration zusätzlicher Funktionen wie Hitzeschutz, Head-up Displays sowie Sensoren etwa zur Regen- und Helligkeitserkennung von transparenten Barrieren zu komplexen, mehrschichtigen optischen Bauelementen entwickelt. Die steigende strukturelle Komplexität stellt hohe Anforderungen an die Herstellungsprozesse, da bereits geringe, prozessbedingt eingebrachte Restspannungen die mechanische Integrität, die optische Leistungsfähigkeit und die Langzeitzuverlässigkeit beeinträchtigen können.

Etablierte Prüfverfahren wie Polarimetrie und Streulichtverfahren liefern jedoch nur eingeschränkt aussagekräftige Informationen: Polarimetrische Verfahren erfassen ausschließlich tiefenintegrierte Spannungen, während Streulichtverfahren zwar Tiefenauflösung ermöglichen, jedoch nur punktweise arbeiten und häufig den Einsatz von Immersionsmedien zur Unterdrückung von Oberflächenreflexionen erfordern.

Im Rahmen eines BMBF-Verbundprojekts gemeinsam mit den Partnern Schmidt & Haensch, Saint-Gobain Sekurit und Volkswagen haben wir daher einen Ansatz zur kontaktlosen, nichtdestruktiven und tiefenaufgelösten Analyse spannungsinduzierter optischer Effekte in transparenten und mehrschichtigen Glassystemen entwickelt und experimentell validiert.



Depth-resolved characterization of stress-induced effects in glass

Automotive glazing has evolved from a purely transparent barrier into a complex, multilayer optical component due to the increasing integration of functionalities such as heat protection, head-up displays, as well as sensors for rain and ambient light detection. This growing structural complexity places high demands on manufacturing processes, as even small process-induced residual stresses can impair mechanical integrity, optical performance, and long-term reliability.

Established inspection methods such as polarimetry and light-scattering techniques provide only limited information: polarimetric approaches capture only depth-integrated stresses, while light-scattering methods offer depth resolution but only at discrete points and often require immersion media to suppress surface reflections.

Within a collaborative BMBF project together with our partners Schmidt & Haensch, Saint-Gobain Sekurit, and Volkswagen, we have therefore developed and experimentally validated an approach for the contactless, non-destructive, and depth-resolved analysis of stress-induced optical effects in transparent and multilayer glass systems.

- ◀ **Polarisationssensitive OCT-Charakterisierung von Automobilglas.** Ein fokussierter Laserstrahl wird auf die Probe gerichtet und das rückgestreute Licht interferometrisch detektiert. Durch das Abrastern der Probe lassen sich orts aufgelöste Informationen über die optischen Eigenschaften in Inneren der Glasscheibe erhalten. Polarization-sensitive OCT characterization of automotive glass. A focused laser beam is directed onto the sample, and the backscattered light is detected interferometrically. Scanning the sample enables spatially resolved analysis of the optical properties within the interior of the glass.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Dieser Ansatz basiert auf polarisationssensitiver optischer Kohärenztomografie (PS-OCT), einer interferometrischen Methode zur tiefenaufgelösten Bildgebung, die eine Bestimmung der optischen Verzögerung und daraus abgeleiteter effektiver Doppelbrechung ermöglicht.

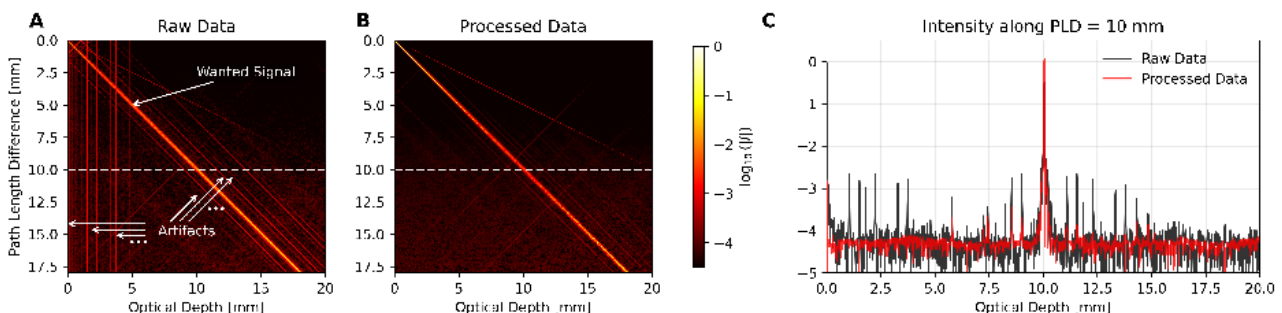
Herausforderungen für die PS-OCT sind starke Reflexionen an der Probenoberfläche, deren Messsignale benachbarte Signale überstrahlen, sowie Mehrfachreflexionen an optischen Komponenten im Laserstrahlengang, die zu einer Überlagerung der Messsignale aus der Probe mit Signalartefakten führen. Essenziell für eine aussagekräftige Datenanalyse waren daher angepasste Mess- und Rekonstruktionsroutinen, die diese unerwünschten Signalbeiträge gezielt reduzieren.

Über geeignete Kalibrationen und materialabhängige Modelle können aus den gemessenen optischen Größen Rückschlüsse auf mechanisch induzierte Spannungen gezogen werden. Unser Ansatz der PS-OCT ermöglicht damit eine kontaktlose und tiefenaufgelöste Charakterisierung spannungsbedingter Effekte in komplexen Glassystemen, die mit etablierten Methoden nur eingeschränkt zugänglich sind.

This approach is based on polarization-sensitive optical coherence tomography (PS-OCT), an interferometric imaging technique that enables the determination of optical retardation and the effective birefringence derived from it.

Challenges for PS-OCT arise from strong reflections at the sample surface, which can overshadow adjacent signals, as well as multiple reflections within optical components in the laser beam path, leading to superposition of the sample signal with artifacts. To enable meaningful data analysis, dedicated measurement and reconstruction routines were developed to specifically suppress these unwanted signal contributions.

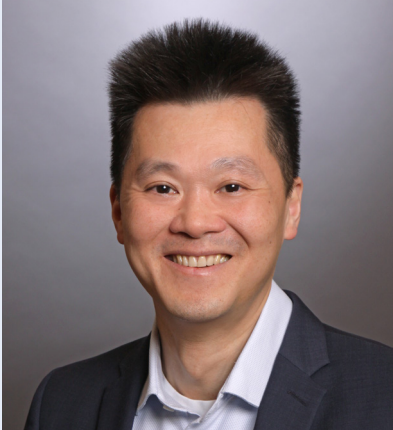
Using appropriate calibrations and material-dependent models, the measured optical quantities can be related to mechanically induced stresses. The presented PS-OCT approach thus enables a contactless and depth-resolved characterization of stress-related effects in complex glass systems that are only partially accessible with established methods.



Unterdrückung unerwünschter Signalbeiträge am Beispiel einer Spiegelprobe: A) Rekonstruierte Intensitäten (logarithmisch) als Funktion der axialen Position (x) in der Probe und der optischen Weglängendifferenz zwischen Referenz- und Probenarm (y). Das Signal des Spiegels erscheint in Abhängigkeit der eingestellten Weglängendifferenz bei unterschiedlichen axialen Positionen (gewünschter Beitrag), während zusätzlich ortsfeste und mit dem Spiegelsignal wandernde Artefakte auftreten. B) Nach Anwendung der Rekonstruktions- und Korrekturverfahren sind unerwünschte Signalbeiträge deutlich reduziert. C) Intensitätsprofile entlang der gestrichelten Linien in A) und B).

Suppression of unwanted signal contributions demonstrated on a mirror sample: A) Reconstructed intensities (logarithmic scale) as a function of axial position in the sample (x) and the optical path length difference between reference and sample arm (y). The mirror signal appears at different axial positions depending on the applied path length difference (unwanted contribution), while additional stationary and co-moving artifacts are present. B) Unwanted signal contributions are significantly reduced after applying the reconstruction and correction procedures. C) Intensity profiles along the dashed lines in A) and B).

Berichte aus der Abteilung Departmental Reports



Dr. Dong Du Mai
Abteilungsleiter

T +49 551/5035-43
F +49 551/5035-99
M dong-du.mai@ifnano.de

Dr. Peter Simon
Ansprechpartner für
Kurze Pulse / Nanostrukturen

T +49 551/5035-21
F +49 551/5035-99
M peter.simon@ifnano.de



MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Anja Ahrens

Moritz Groschopf

Jonathan Holburg

Dr. Jürgen Ihlemann

Maik Lübbecke

Dr. Klaus Mann

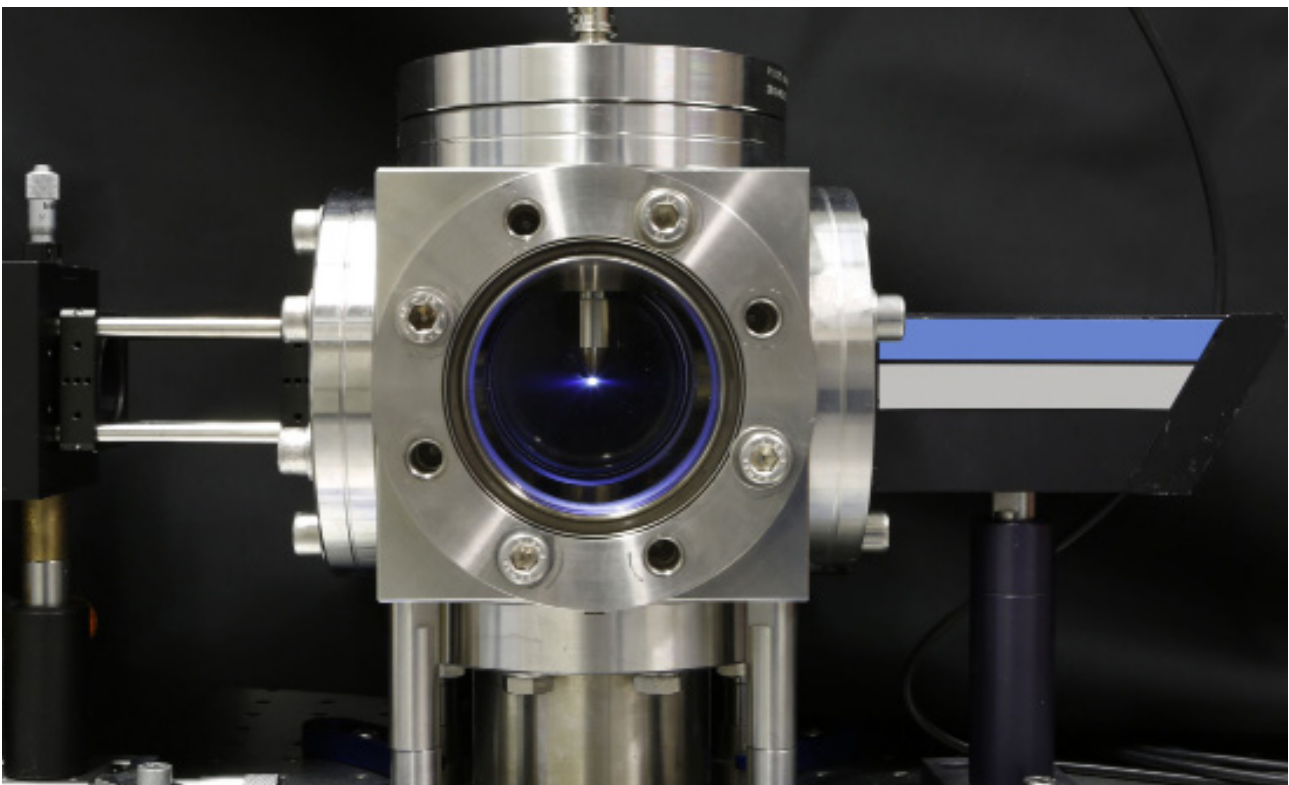
Dr. Jörg Meinertz

Dr. Andreas Röben

Dr. Meike Schellhorn

Dr. Lars Sölter

Dr. Hendrik Wrigge



Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Die Abteilung Kurze Wellenlängen des Instituts für Nanophotonik beschäftigt sich mit der Propagation von Laserstrahlung, der laserinduzierten Wechselwirkung von Plasma und Materie sowie der Charakterisierung von Hochleistungsoptiken. Ein zentraler Schwerpunkt liegt auf der Analyse und Kontrolle des Abstrahlverhaltens von Lasersystemen, insbesondere im tiefen UV-Spektralbereich für Anwendungen in der Halbleiterlithographie. Darüber hinaus entwickelt die Abteilung kompakte, hochbrillante Photonenquellen vom EUV- bis in den weichen und harten Röntgenbereich für spektroskopische und bildgebende Anwendungen bis etwa 70 keV.

Zur Bewertung der Qualität und Langzeitstabilität optischer Komponenten werden spezialisierte Messsysteme eingesetzt, mit denen Absorption, thermische Effekte und laserinduzierte Schadensschwellen präzise bestimmt werden. Die Strahlpropagation und Kohärenzeigenschaften werden mithilfe hochauflösender Wellenfrontsensorik analysiert. Aufbauend darauf wurden photothermische Verfahren zur orts aufgelösten Absorptionsmessung etabliert.

Die entwickelten laserbasierten EUV- und Röntgenquellen ermöglichen Anwendungen wie NEXAFS-Spektroskopie in Transmission und (zukünftig) auch in Reflexion, Röntgenmikroskopie und hochauflösende 3D-Bildgebung. Ergänzend werden Forschungsschwerpunkte in der Laser-Target-Plasma-Wechselwirkung, zeitaufgelöster Röntgenspektroskopie sowie der Erzeugung ultrakurzer Pulse kontinuierlich ausgebaut.

Ein weiterer Fokus liegt auf der laserbasierten Mikro- und Nanostrukturierung von Materialien. Durch den Einsatz ultrakurzer Pulse und fortgeschrittener Bestrahlungsstrategien lassen sich funktionale Strukturen mit Submikrometerauflösung erzeugen. Aktuelle Arbeiten umfassen die Entwicklung leistungsstarker Lasersysteme, periodischer Nanostrukturen, sowie neuer Konzepte für Hochleistungslaserführung und diffraktive optische Anwendungen.

The Short Wavelengths Department of the Institute for Nanophotonics focuses on the propagation of laser radiation, laser-induced plasma-matter interaction, and the characterization of high-performance optical components. A central research emphasis lies on the analysis and control of the emission behavior of laser systems, particularly in the deep ultraviolet spectral range for applications in semiconductor lithography. In addition, the department develops compact, high-brilliance photon sources ranging from the EUV to the soft and hard X-ray regime for spectroscopic and imaging applications up to approximately 70 keV.

To assess the quality and long-term stability of optical components, specialized measurement systems are employed to precisely determine absorption, thermal effects, and laser-induced damage thresholds. Beam propagation and coherence properties are analyzed using high-resolution wavefront sensing techniques. Based on this expertise, photothermal methods for spatially resolved absorption measurements have been established. The developed laser-based EUV and X-ray sources enable applications such as NEXAFS spectroscopy in transmission and, in the future, also in reflection, as well as X-ray microscopy and high-resolution 3D imaging. Complementary research activities include laser-target-plasma interaction, time-resolved X-ray spectroscopy, and the generation of ultrashort laser pulses.

Another focus is on laser-based micro- and nanostructuring of materials. By employing ultrashort pulses and advanced irradiation strategies, functional structures with submicrometer resolution can be fabricated. Current work includes the development of high-power laser systems, periodic nanostructures, and new concepts for high-power beam delivery and diffractive optical applications.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

DFG-Projekt: Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS)

Auf Basis einer kompakten Laborquelle wurde ein hochauflösendes Labormesssystem zur Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS = Near Edge X-ray Absorption Fine Structure) für den Wellenlängenbereich $\lambda = 1\text{--}5\text{ nm}$ entwickelt (siehe Abb. 1). Als Strahlquelle wird ein breitbandig emittierendes laserinduziertes Krypton-Plasma genutzt. Dünne Proben lassen sich in Transmission an verschiedenen Absorptionskanten elementspezifisch untersuchen (z.B. C, N, O, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu). Die Feinstruktur an den Absorptionskanten enthält sowohl qualitative als auch quantitative Informationen über Bindungszustände in der Probe sowie der Konzentration der jeweiligen Komponenten und ist daher für die chemische Analyse sehr gut geeignet.

DFG-Project: X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS)

Based on a compact laboratory source, a high-resolution laboratory system for X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS = Near Edge X-ray Absorption Fine Structure) was developed for the wavelength range $\lambda = 1\text{--}5\text{ nm}$ (see Fig. 1). A broadband-emitting laser-induced krypton plasma is used as the radiation source. Thin samples can be investigated in transmission at various absorption edges in an element-specific manner (e.g., C, N, O, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu). The fine structure at the absorption edges contains both qualitative and quantitative information on the bonding states within the sample as well as on the concentration of the respective components, making the method highly suitable for chemical analysis.

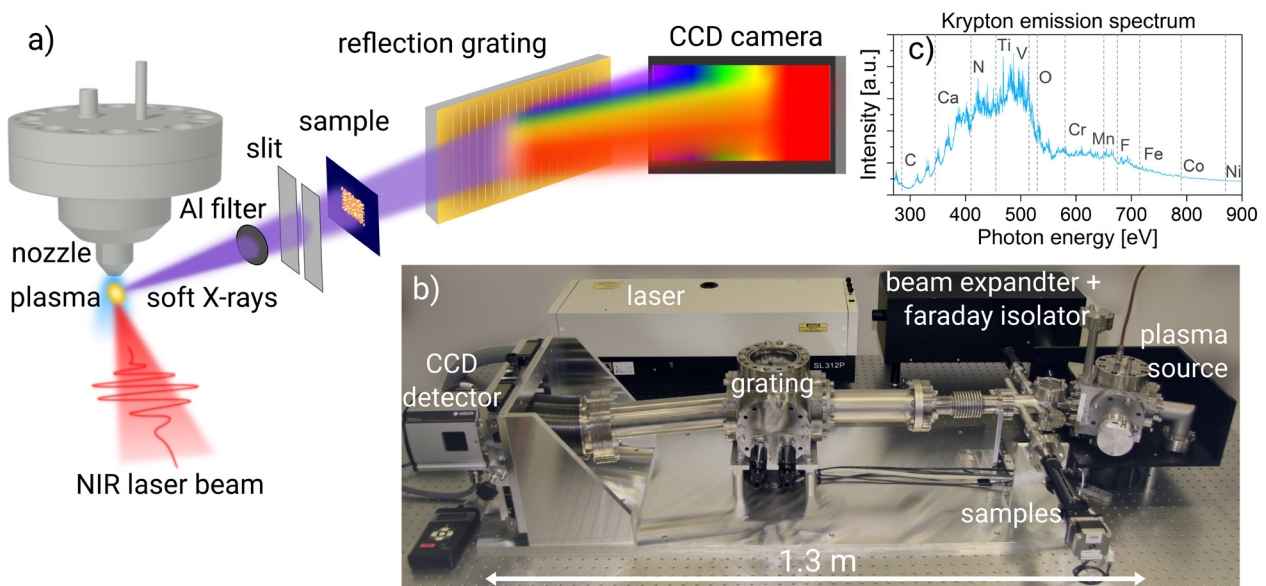


Abb. 1: (a) Schematisches Prinzip des Röntgenabsorptionsspektrometers und (b) Foto des kompakten Laborsystems. (c) zeigt das erzeugte Krypton Emissionsspektrum mit ausgewählten Absorptionskanten in diesem Spektralbereich.

Fig. 1: (a) Schematic principle of the X-ray absorption spectrometer and (b) photograph of the compact laboratory system. (c) shows the generated krypton emission spectra with selected absorption edges in this spectral range.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Ein wesentlicher Meilenstein wurde mit dem erfolgreichen Abschluss des DFG-geförderten NEXAFS-Projekts im Dezember 2025 erreicht. Dabei wurde das kompakte Laborsystem im Institut für Geowissenschaften (Lehrstuhl für Hydrogeologie) an der Friedrich-Schiller-Universität Jena installiert, dessen spektrale Auflösung und Datenqualität mit Synchrotronmessungen vergleichbar sind. Durch eine deutliche Steigerung der Quellenbrillanz können hochwertige NEXAFS-Spektren innerhalb weniger Minuten aufgenommen werden. Neben Messungen im Vakuum erlaubt eine speziell entwickelte Helium-Probenkammer Untersuchungen unter Atmosphärendruck (siehe Abb. 2).

A major milestone was achieved with the successful completion of the DFG-funded NEXAFS project in December 2025. In this context, the compact laboratory system was installed at the Institute of Geosciences (Chair in Hydrogeology) at Friedrich Schiller University Jena, where its spectral resolution and data quality are comparable to those of synchrotron-based measurements. Owing to a significant increase in source brilliance, high-quality NEXAFS spectra can now be acquired within a few minutes. In addition to measurements under vacuum conditions, a specially developed helium sample chamber enables investigations at atmospheric pressure (see Fig. 2).

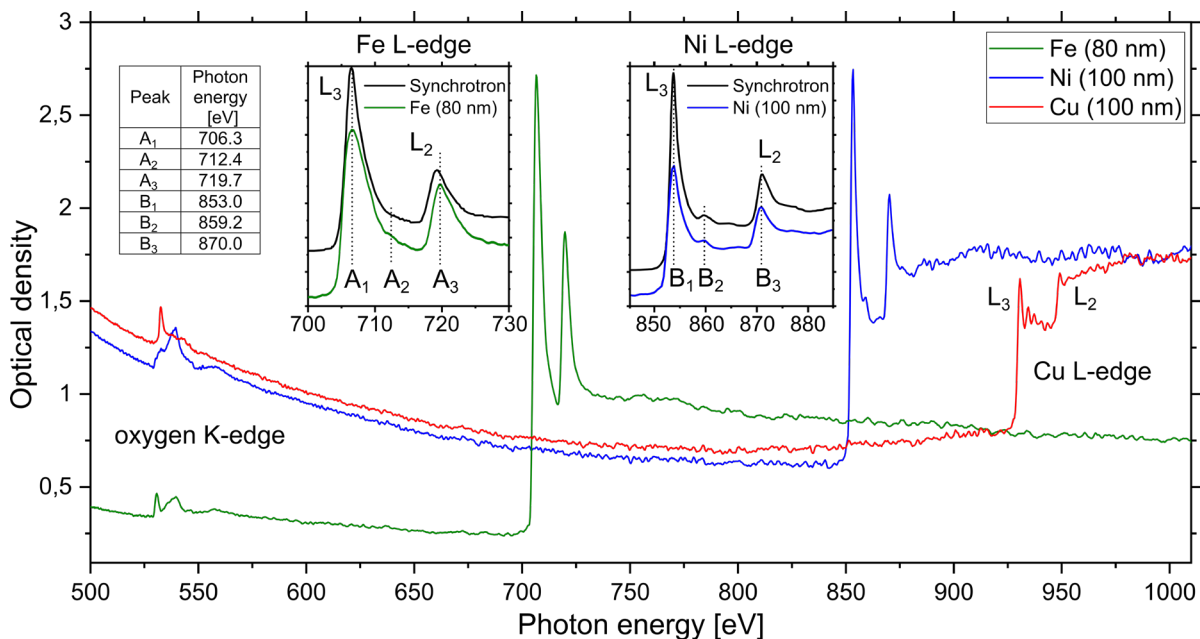


Abb. 2: Röntgenabsorptionsspektren für dünne Fe-, Ni- und Cu-Schichten auf Si₃N₄-Membranen, untersucht an ihren L-Absorptionskanten und an der Sauerstoff-K-Kante (akkumuliert über 750 Pulse). Zum Vergleich sind Messungen am Synchrotron dargestellt, welche die Gesamtelektronenausbeute von Eisen und Nickel zeigen. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen.

Fig. 2: X-ray absorption spectra for thin Fe, Ni and Cu films on Si₃N₄ membranes, investigated at their L-absorption edges and at the oxygen K-edge (accumulated over 750 pulses). For comparison, synchrotron data are displayed showing the total electron yield of iron and nickel (redrawn from Giménez-Marqués et al., *Small* 14(40), 1801900 (2018) and Chang et al., *J. Appl. Phys.* 87(3), 1312-1317 (2000), respectively). The measured data is in very good agreement with the synchrotron data.

Kurze Wellenlängen

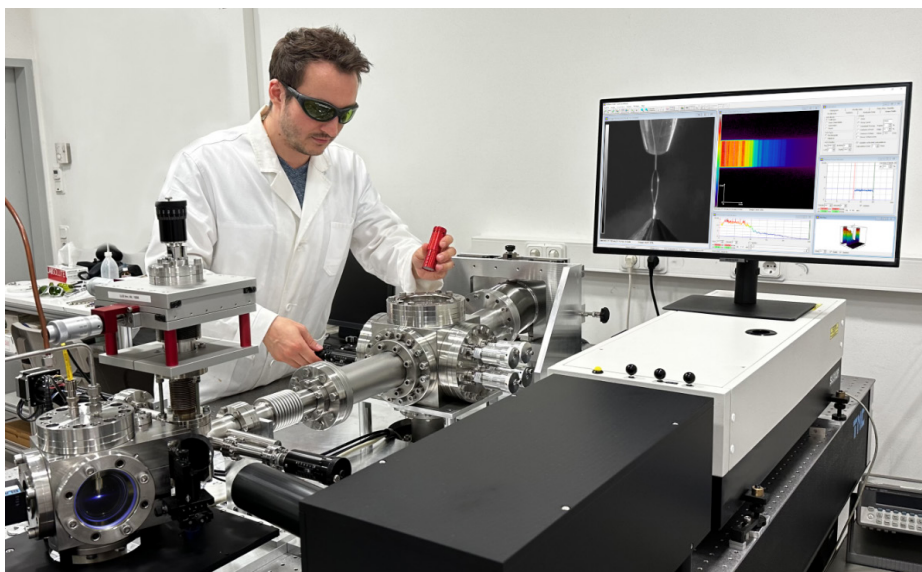
Short Wavelengths

BMFTR-Projekt: Kompakte laser-produzierte Plasmaquelle zur hochauflösenden Spektroskopie im weichen und mittleren Röntgenbereich mittels Flachstrahl Probenezuführung (KOPAS)

Im **KOPAS** Projekt soll eine lasergestützte Plasmaquelle für die Spektroskopie im weichen und mittleren Röntgenbereich entwickelt werden. Aufbauend auf vorhandenen Erfahrungen und gewonnenen Erkenntnisse aus der Röntgen-absorptionsspektroskopie (NEXAFS) der vergangenen Jahre wird eine weiterentwickelte laserproduzierte Plasmaquelle für den weichen und Tender Röntgenbereich realisiert. Mit dem neu entwickelten Spektrometer soll eine Auflösung und Sensibilität erreicht werden, welche qualitativ vergleichbar mit Synchrotron-Messungen ist. Außerdem soll eine neuartige Methode erforscht werden, um flüssige oder in Flüssigkeit gelöste Substanzen im Vakuum zu untersuchen. Bis 2025 konnten zentrale Fortschritte erzielt werden, darunter die Integration eines stabilen Flachstrahl-Jets für kontinuierliche Probenezuführung, der Nachweis von NEXAFS-Messungen an flüssigen und reaktiven Systemen sowie die Erzeugung und Detektion von Photonenenergien jenseits von 2 keV.

BMFTR-Project: Compact laser-produced plasma source for high-resolution spectroscopy in the soft and medium X-ray range using a flat jet sample feeder (KOPAS)

In the **KOPAS** project, a laser-driven plasma source for spectroscopy in the soft and medium X-ray range is being developed. Building on existing experience and insights gained from X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS) over recent years, an advanced laser-produced plasma source for the soft and tender X-ray regime is being realized. The newly developed spectrometer aims to achieve a resolution and sensitivity that are qualitatively comparable to synchrotron-based measurements. In addition, a novel method is being investigated to enable the analysis of liquid samples or substances dissolved in liquids under vacuum conditions. By 2025, major progress has been achieved, including the integration of a stable flat liquid jet for continuous sample delivery, the successful demonstration of NEXAFS measurements on liquid and reactive systems, and the generation and detection of photons with energies exceeding 2 keV.



▲ Abb. 3: Kompakter Laboraufbau zur hochauflösenden Röntgenabsorptionsspektroskopie
Fig. 3: Compact laboratory setup for high-resolution X-ray absorption spectroscopy.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Die laufende Erweiterung des Systems auf Photonenergien von etwa 2-3 keV stellt einen entscheidenden Schritt dar, um künftig auch Absorptionskanten von Elementen höherer Ordnungszahl laborbasiert zugänglich zu machen. Parallel werden weitere Forschungsschwerpunkte in den Bereichen Laser-Target-Plasma-Wechselwirkung, zeitaufgelöste Röntgenspektroskopie, Erzeugung und Charakterisierung ultrakurzer Pulse jenseits der Femtosekunde sowie hochaufgelöste Röntgenbildgebung systematisch ausgebaut. Am Ende des Projekts soll weltweit erstmalig ein Table-Top-Gesamtsystem aus Strahlungsquelle, Spektrometer sowie optionalem Flüssigkeits-Jet als sehr kompakte Einheit zur Verfügung stehen.

The ongoing extension of the system toward photon energies of approximately 2-3 keV represents a decisive step toward laboratory-based access to absorption edges of higher-Z elements. In parallel, further research activities are being systematically expanded in the areas of laser-target plasma interaction, time-resolved X-ray spectroscopy, generation and characterization of ultrashort pulses beyond the femtosecond regime, and high-resolution X-ray imaging. At the end of the project, a globally unique table-top integrated system comprising the radiation source, spectrometer, and an optional liquid jet will be available as a highly compact unit.

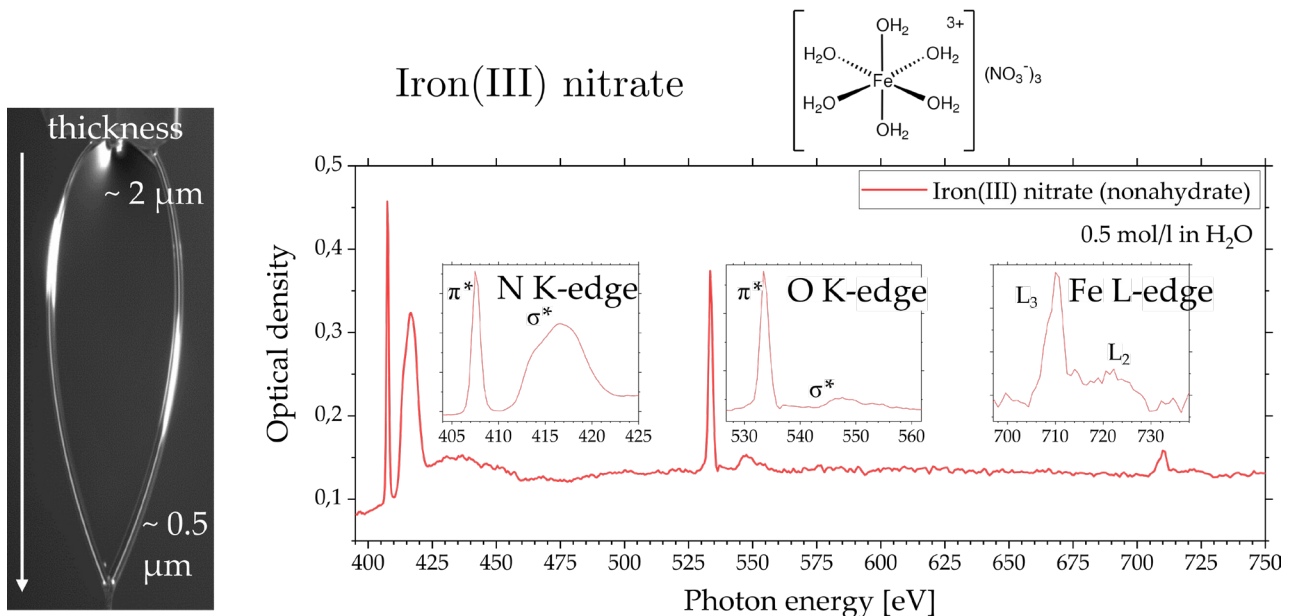


Abb. 4: Links ist eine dünne Flüssigkeitslamelle abgebildet, die zur Bereitstellung flüssiger Proben im Vakuum verwendet wird. Rechts ist ein an dieser Lamelle gemessenes Spektrum von in Wasser gelöstem Eisen(III)-Nitrat dargestellt, das die verschiedenen Absorptionskanten zeigt.

Fig. 4: A thin liquid lamella is shown on the left, which is used to provide a liquid sample in vacuum environment. On the right a spectrum of iron(III)-nitrate dissolved in water is shown, displaying several absorption edges.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

BMFTR-Projekt: Automatisierte Justage von FEL-Fokussieroptiken mit Hilfe von "machine-learning" Algorithmen (FELFocus)

Innerhalb des im Oktober 2022 begonnenen BMFTR-Projekts FELFocus wird in Kooperation mit DESY und dem Institut für Numerische und Angewandte Mathematik der Universität Göttingen ein Mess- und Regelsystem zur automatisierten Justage der Kirkpatrick-Baez (KB)-Optik am Freie Elektronen Laser FLASH 2 / DESY entwickelt. Mit Hilfe dieses Systems sollen sowohl die Strahlqualität im Fokus verbessert als auch der Zeit- bzw. Personalaufwand für die Justage deutlich reduziert werden.

Die Grundidee des Ansatzes (s. Abb. 6) besteht darin, die aktuellen Strahlparameter für einen gegebenen Satz von Aktorpositionen mit Hilfe eines Hartmann-Wellenfrontsensors zu berechnen und als Input eines selbstlernenden Algorithmus zur Lösung des inversen Problems einzusetzen.

BMFTR-Projekt: Automated adjustment of the focusing optics of free-electron lasers with the aid of "machine learning" algorithms (FELFocus)

Within the BMFTR-funded FELFocus project, which started in October 2022, a measurement and control system for the automated alignment of the Kirkpatrick-Baez (KB) optics at the free-electron laser FLASH 2 at DESY is being developed in cooperation with DESY and the Institute for Numerical and Applied Mathematics at the University of Göttingen. The objective of this system is to improve beam quality at the focus while significantly reducing the time and personnel required for optical alignment.

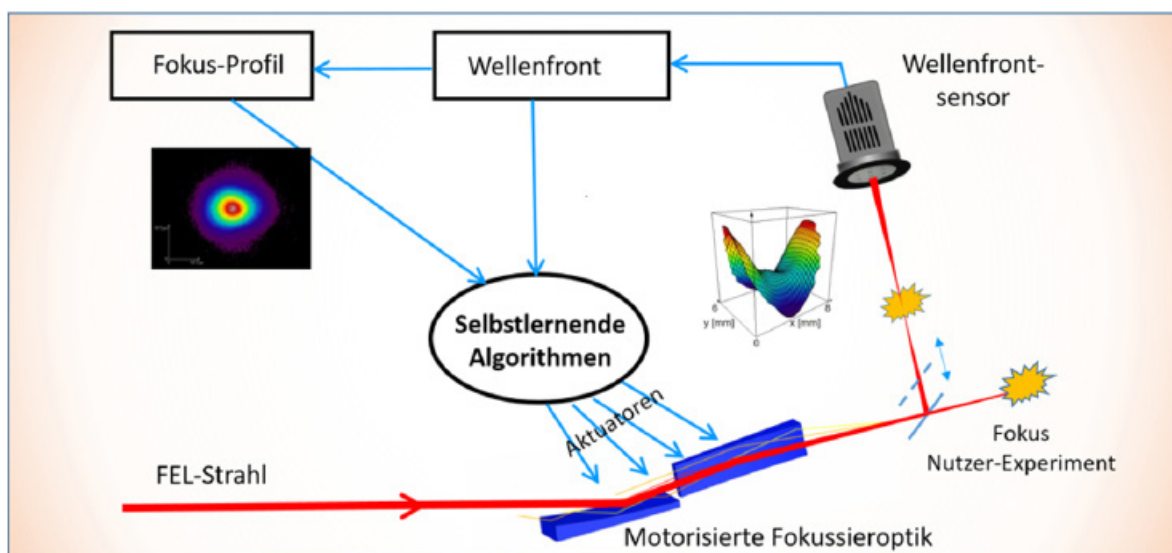


Abb. 5: Prinzip der automatisierten Justage von FEL Fokussieroptiken am Beispiel der Kirkpatrick-Baez-Spiegelanordnung an FL24 / FLASH 2 mit 14 Aktuatoren. Ein beweglicher Planspiegel im FEL-Strahlengang ermöglicht die Aufnahme und Rekonstruktion von Wellenfront und Strahlprofil mit einem Hartmann-Wellenfrontsensor. Aus diesen Daten können Profil und Strahlparameter im Fokus berechnet und als Eingabeinformation für einen selbstlernenden Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Aktorpositionen verwendet werden.

Fig. 5: Planned procedure for the automated adjustment of FEL focusing optics, illustrated for the Kirkpatrick-Baez mirror system of FL24 / FLASH2 (14 actuators). By means of a plane mirror to be moved into the FEL beam path, its wavefront can be registered by a Hartmann wavefront sensor. This allows for evaluation of the beam profile in a plane conjugate to the focus, serving as input for a fast self-learning algorithm for controlling the actuators.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Die wesentliche Herausforderung liegt in der großen Anzahl von gekoppelten Freiheitsgraden (bis zu 14 für eine KB-Optik) und dem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spiegelstellung und Strahlparametern. Im Rahmen des IFNANO-Teilprojekts soll ein geeigneter EUV-Wellenfrontsensor mit besonders großer effektiver Sensor-Fläche entwickelt werden. Darüber hinaus sind eine physikalisch/optische Modellierung des KB-Systems, die Spezifizierung eines optimalen Parameterraums sowie die Programmierung der Schnittstelle zur Hardware am FLASH vorgesehen.

Das Projekt konnte zum Ende des Jahres 2025 erfolgreich abgeschlossen werden. Die im Rahmen von FELFocus gewonnenen Erkenntnisse zu Strahlqualität, Fokusstabilität und optischer Belastbarkeit bilden eine wichtige Grundlage für aktuelle und zukünftige Entwicklungen laserbasierter Röntgen- und EUV-Quellen.

The basic concept of the approach (see Fig. 6) is to determine the current beam parameters for a given set of actuator positions using a Hartmann wavefront sensor and to use these parameters as input for a self-learning algorithm to solve the inverse problem. A key challenge arises from the large number of coupled degrees of freedom (up to 14 for a KB optical system) and the nonlinear relationship between mirror positions and beam parameters. Within the IFNANO subproject, a suitable EUV wavefront sensor with a particularly large effective sensor area is being developed. In addition, physical and optical modeling of the KB system, the specification of an optimal parameter space, and the implementation of the hardware interface to the FLASH facility are planned.

The project was successfully completed at the end of 2025. The insights gained within FELFocus regarding beam quality, focus stability, and optical load tolerance provide an important foundation for current and future developments of laser-based X-ray and EUV sources.

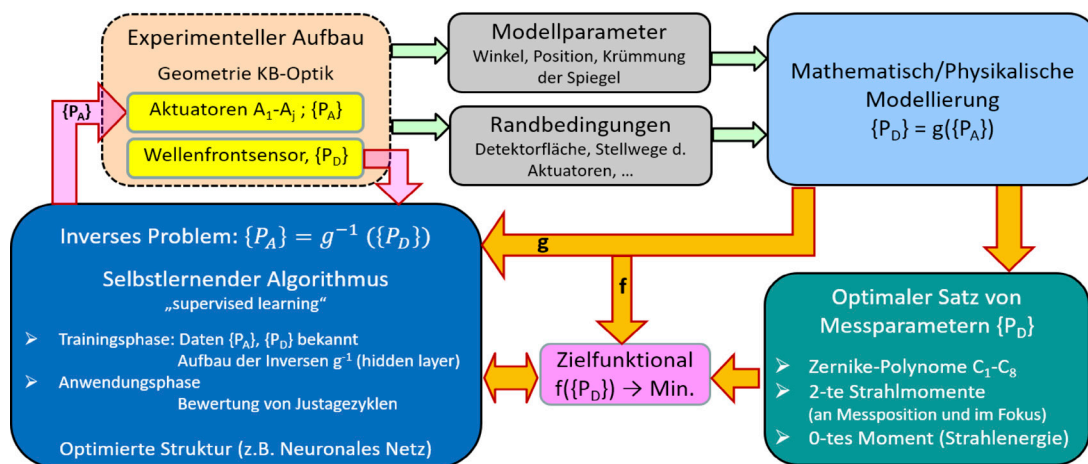


Abb. 6: Links ist eine dünne Flüssigkeitslamelle abgebildet, die zur Bereitstellung flüssiger Proben im Vakuum verwendet wird. Rechts Abb. 6: Blockdiagramm der Teilsysteme und Abhängigkeiten innerhalb der Lösungsstrategie zur optimalen und automatisierten Justage der FEL Fokussieroptik. Ausgehend von der experimentellen Anordnung und einer Modellierung des optischen Systems (Vorwärtsrichtung) soll ein optimaler Satz von Strahlparametern sowie ein Zielfunktional bestimmt und als Input eines selbstlernenden Algorithmus zur Lösung des inversen Problems verwendet werden.

Fig. 6: Block diagram of the sub-systems and their dependencies in the planned solution strategy for the optimal and efficient adjustment of an FEL focusing optics. Starting from the experimental setup and a mathematical model of the system (forward direction) an optimum set of beam parameters and an appropriate target functional shall be determined in order to serve as input information to the "self-learning" algorithm for solution of the inverse problem.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Zeitaufgelöste Messung der Reflektivität von Metallen und Halbleitern

Die Wechselwirkung ultrakurzer Laserpulse mit Festkörpern erlaubt eine hochpräzise Oberflächenbearbeitung und ist daher von großem wissenschaftlichem wie technologischem Interesse. Obwohl die grundlegenden Abläufe der Energiedeposition, des nachfolgenden Energietransfers im Material sowie der resultierenden Materialreaktion bislang nicht vollständig geklärt sind, haben jüngste Fortschritte in der Experimentiertechnik bereits wesentliche Einblicke in diese Prozesse ermöglicht.

Zur weiteren Aufklärung dieser Dynamik haben wir einen optischen Breitband-Pump-Probe-Aufbau für transiente Reflektivitätsmessungen entwickelt, der eine Zeitauflösung von unter 10 fs erreicht. Der Aufbau ermöglicht insbesondere Messungen oberhalb der Modifikationsschwelle der zu untersuchenden Materialien. Die Anregung erfolgt bei 780 nm mit 80-fs-Pulsen und variabler Fluenz. Zur Abfrage der Materialantwort nutzen wir breitbandige, ultrakurze Abtastpulse mit wenigen optischen Zyklen. Diese werden mittels eines hohlfaserbasierten Systems erzeugt, das aus zwei hintereinander geschalteten, im Haus entwickelten, gestreckten Hohlfasern besteht.

Abbildung 1: Schematische Übersicht des Pump-Probe Aufbaus. ▶ Als Pulsquelle wird ein modifizierter Titan:Saphir Laser verwendet. Der Probepuls wird mithilfe zweier, kaskadiert angeordneter gestreckter Hohlfaserkompressor Systeme spektral verbreitert und auf unter 6 fs komprimiert. Damit werden zeitlich hochauflösende Messungen des Materialverhaltens während und nach der Anregung durch den Pumpimpuls ermöglicht.

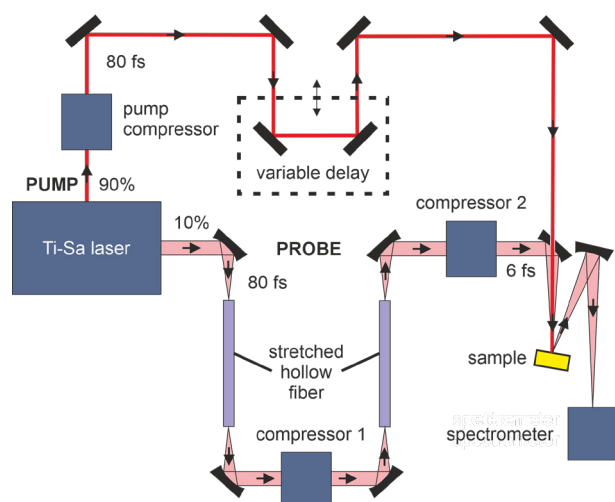
Figure 1: Schematic overview of the pump-probe setup. A modified Ti:sapphire laser is used as the pulse source. The probe pulse is spectrally broadened and compressed to below 6 fs using two cascaded stretched hollow-fiber compressor systems. This enables temporally high-resolution measurements of the material response during and after excitation by the pump pulse.

Time-resolved measurement of the reflectivity of metals and semiconductors

The interaction of ultrashort laser pulses with solids enables highly precise surface processing and is therefore of great scientific and technological interest. Although the fundamental mechanisms of energy deposition, the subsequent energy transfer within the material, and the resulting material response are not yet fully understood, recent advances in experimental techniques have already provided significant insights into these processes.

To further elucidate this dynamics, we have developed an optical broadband pump-probe setup for transient reflectivity measurements that achieves a temporal resolution of below 10 fs. In particular, the setup enables measurements above the modification threshold of the investigated materials. Excitation is performed at 780 nm using 80-fs pulses with variable fluence.

To probe the material response, broadband, ultrashort probe pulses comprising only a few optical cycles are employed.



Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Zur Validierung der Apparatur wurden Messungen an Gold oberhalb der Modifikationsschwelle durchgeführt. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Rethfeld (RPTU Universität in Kaiserslautern) wurde das Verhalten von Gold unter Femtosekundenbestrahlung theoretisch modelliert und den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Die sehr gute Übereinstimmung von Theorie und Experiment über einen weiten Wellenlängenbereich bestätigt die Leistungsfähigkeit des Aufbaus. Wir erwarten, dass dieses neue Werkzeug mit sub-10-fs-Zeitauflösung und breiter spektraler Abdeckung künftig detaillierte Einblicke in die komplexe Dynamik laserangeregter Festkörper liefert, insbesondere in Materialsysteme mit nichtlinearem und ultraschnellem optischem Schaltverhalten.

These pulses are generated using a hollow-fiber-based system consisting of two consecutively arranged, in-house-developed stretched hollow fibers.

To validate the apparatus, measurements on gold above the modification threshold were carried out. In collaboration with the Rethfeld research group (RPTU University of Kaiserslautern), the behavior of gold under femtosecond irradiation was theoretically modeled and compared with the experimental results. The very good agreement between theory and experiment over a wide wavelength range confirms the performance of the setup. We expect that this new tool, with sub-10-fs temporal resolution and broad spectral coverage, will in the future provide detailed insights into the complex dynamics of laser-excited solids, in particular into material systems exhibiting nonlinear and ultrafast optical switching behavior.

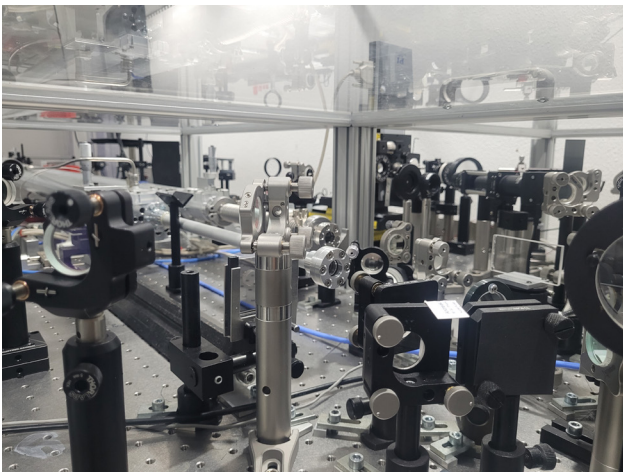


Abbildung 3: Pump Probe Setup. Im Vordergrund sind Teile des Kompressor-spiegelarrays zu erkennen, dahinter die Probenbeobachtung und die Goldprobe.
Figure 3: In the foreground, parts of the compressor mirror array are visible; behind them are the sample observation optics and the gold sample.

Abbildung 2: Fotografie des Pump-Probe-LaboraAufbaus mit kaskadiertem Hohl-faser-kompressor (linke Seite)
Figure 2: Photograph of the pump-probe laboratory setup with a cascaded hollow-fiber compressor (left-hand side).



Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Entwicklung einer Hohlfaservorrichtung für extrem hohe Leistungen

In unserer Abteilung wird seit vielen Jahren die Entwicklung von gestreckten Hohlfasersystemen vorangetrieben. Diese können zur kontrollierten spektralen Pulsverbreiterung der Pulse eingesetzt werden, was insbesondere Voraussetzung für die zeitliche Nachkompression ultrakurzer Pulse darstellt.

Der Ansatz der gestreckten Hohlfaser ist insbesondere für die Erzeugung extrem kurzer Pulse mit nur wenigen optischen Zyklen vorteilhaft. Für derartige Anwendungen sind Hohlfasern Multipasszellen überlegen, die zwar teils vergleichbare Ergebnisse und mitunter sogar höhere Transmissionen liefern, jedoch weniger geeignet für die Erzeugung von Few-Cycle-Pulsen sind.

Development of a hollow-core fiber setup for extremely high powers

In our department, the development of stretched hollow-fiber systems has been pursued for many years. These systems can be used for controlled spectral pulse broadening, which is a key prerequisite for the subsequent temporal compression of ultrashort pulses.

The stretched hollow-fiber approach is particularly advantageous for the generation of extremely short pulses comprising only a few optical cycles. For such applications, hollow fibers are superior to multipass cells, which can achieve partially comparable results and in some cases even higher transmission, but are less well suited for the generation of few-cycle pulses.

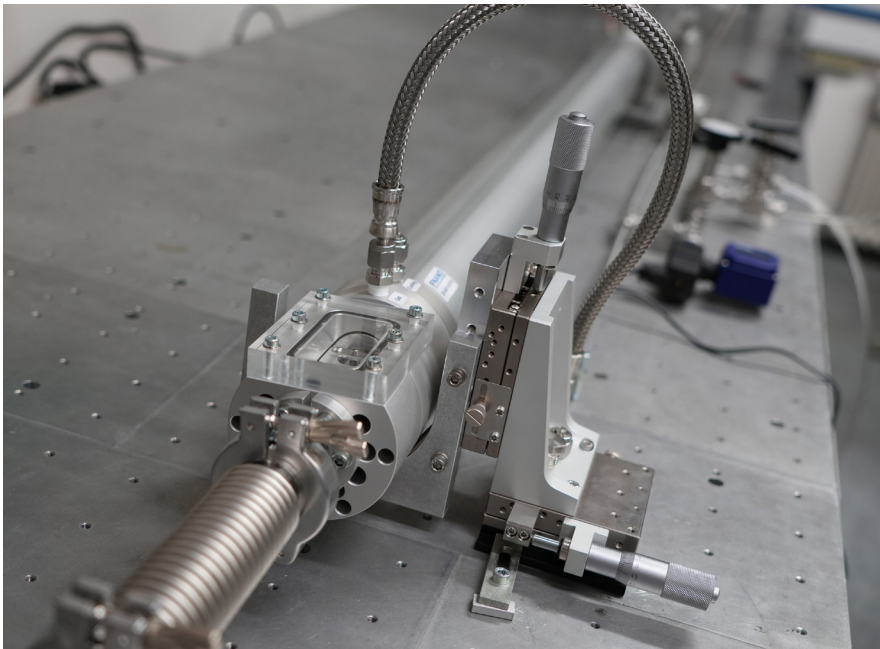


Abbildung 1: Hohlfasersystem mit Vorschaltelement beim Testverfahren im Rahmen der Schutzelemententwicklung.

Figure 1: Hollow-fiber system with upstream protective element during testing as part of the protective element development.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Um die Robustheit der Faser während Justage und Betrieb mit hochenergetischen Lasersystemen zu erhöhen und kostspielige Reparaturen zu vermeiden, wurde ein der Hohlleiter vorgeschaltetes Schutzelement entwickelt. Dieses von der eigentlichen Hohlleiter unabhängige und separat austauschbare Element schützt die Faser effektiv vor Beschädigungen infolge von Strahlpositionsschwankungen oder Fehlausrichtungen. Ein Austausch ist ohne zusätzlichen Justageaufwand möglich.

Experimentell konnte bestätigt werden, dass bei sorgfältiger, einmaliger Justage des Schutzelements weder die Modenqualität des propagierenden Strahls noch die Transmission des Hohlleitersystems beeinträchtigt werden. Damit ermöglicht das Konzept einen schnellen und kostengünstigen Austausch des Vorschaltlements durch den jeweiligen Nutzer vor Ort und reduziert die Ausfallzeit des Pulscompressors signifikant.

To increase the robustness of the fiber during alignment and operation with high-energy laser systems and to avoid costly repairs, a protective element placed upstream of the hollow fiber was developed. This element, which is independent of the hollow fiber itself and can be replaced separately, effectively protects the fiber from damage caused by beam position fluctuations or misalignment. Replacement is possible without additional alignment effort.

Experimental verification showed that, with careful one-time alignment of the protective element, neither the mode quality of the propagating beam nor the transmission of the hollow-fiber system is adversely affected. This concept therefore enables fast and cost-effective replacement of the upstream protective element by the user on site and significantly reduces the downtime of the pulse compressor.



Abbildung 2: Detailansicht des Fasereingangs durch das Sichtfenster. Der Eingang wird durch ein Vorschalt-element vor Beschädigung durch potentiell fehlerhaft ausgerichtete hochenergetische Strahlen geschützt.
Figure 2: Detailed view of the fiber input through the viewing window. The input is protected by an upstream protective element against damage from potentially misaligned high-energy beams.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Erzeugung hochauflöser, individualisierbarer computergenerierter Hologramme (CGH) in transparenten Materialien

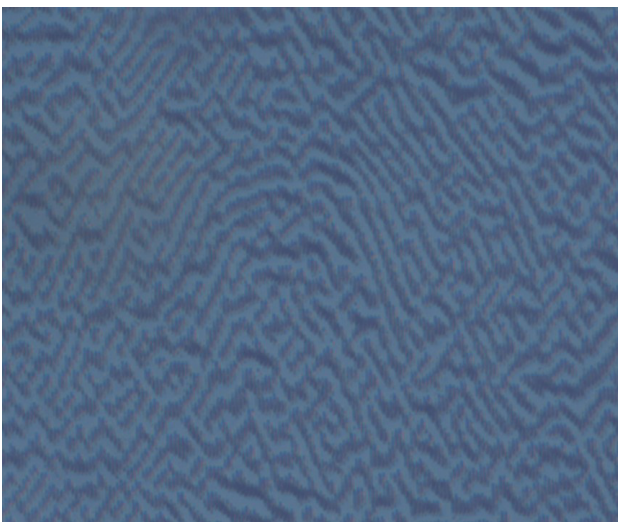
Angesichts zunehmend strenger Richtlinien zur lückenlosen Produktnachverfolgbarkeit und einer stetig wachsenden Zahl von Produktfälschungen besteht ein hoher Bedarf an zuverlässigen und manipulationssicheren Markierungstechnologien.

Eine vielversprechende Lösung stellen computergenerierte Hologramme (CGH) dar. Sie sind nicht nur äußerst schwer zu fälschen, sondern können zudem umfangreiche versteckte Informationen enthalten, die ausschließlich bei Beleuchtung mit einer geeigneten kohärenten Lichtquelle ausgelesen werden können. Das Institut für Nanophotonik entwickelt zusammen mit der Topag Lasertechnik GmbH sowohl eine entsprechende Schreibtechnologie als auch ein kompaktes Lesegerät zur zuverlässigen Detektion.

Generation of high-resolution, customizable computer-generated holograms (CGHs) in transparent materials

In light of increasingly stringent regulations requiring seamless product traceability and the continuously growing number of counterfeit products, there is a strong demand for reliable and tamper-resistant marking technologies.

Computer-generated holograms (CGHs) represent a highly promising solution. They are extremely difficult to counterfeit and can additionally contain large amounts of hidden information that can only be retrieved when illuminated with a suitable coherent light source. The Institute for Nanophotonics, in collaboration with Topag Lasertechnik GmbH, is developing both the corresponding writing technology and a compact reading device for reliable detection.



◀ Abbildung 1: Mit ultrakurzen Laserpulsen im Inneren von einem transparenten Kunststoff erzeugte CGH-Struktur.
Figure 1: CGH structure generated inside a transparent plastic sample using ultrashort laser pulses.

Kurze Wellenlängen

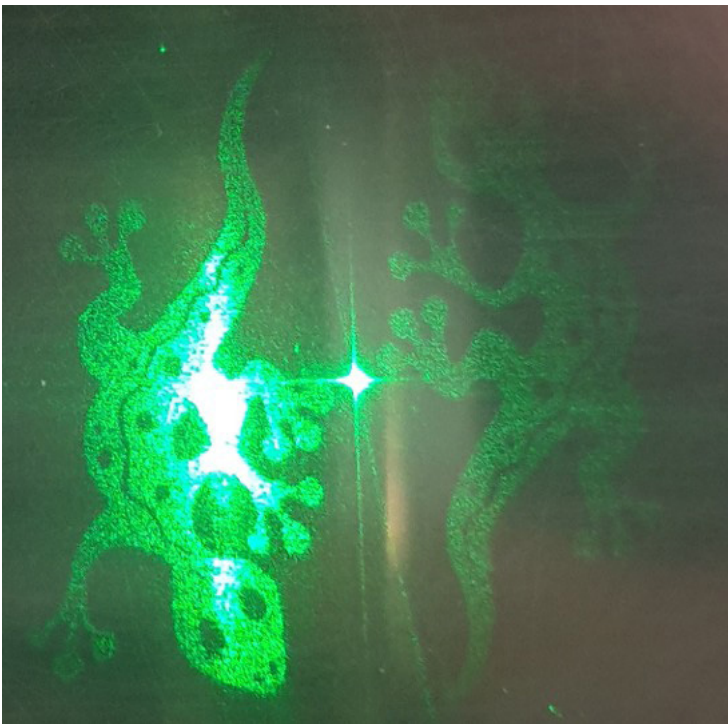
Short Wavelengths

Zur Erzeugung der CGH werden hochaufgelöste holographische Strukturen mithilfe eines Ultrakurz-pulsLasers im Inneren transparenter Materialien geschrieben. Die dafür erforderliche Absorption der Laserstrahlung erfolgt über Mehrphotonenprozesse. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise individuelle, kostengünstig auslesbare und äußerst fälschungssichere Hologramme direkt innerhalb von ID-Karten (etwa Pässen oder Personalausweisen) erzeugen. Das Sicherheitsmerkmal ist damit vollständig im Inneren des Materials eingebettet und somit hervorragend gegen äußere Manipulation geschützt.

Der Schwerpunkt unserer Entwicklung liegt auf der Maximierung der Fälschungssicherheit durch die gezielte Variation der Beugungseigenschaften einzelner CGH-Pixel. Mit einem speziell angepassten Lesegerät können diese kodierte Eigenschaften eindeutig identifiziert werden, wodurch eine hochwirksame und zuverlässige Echtheitsprüfung ermöglicht wird.

To generate the CGHs, high-resolution holographic structures are written inside transparent materials using an ultrashort-pulse laser. The absorption of the laser radiation required for this process occurs via multiphoton processes. In this way, for example, individualized, cost-effectively readable, and highly counterfeit-resistant holograms can be created directly within ID cards (such as passports or personal identification cards). The security feature is thus fully embedded within the interior of the material and is therefore excellently protected against external manipulation.

The focus of our development lies in maximizing counterfeit resistance through the targeted variation of the diffraction properties of individual CGH pixels. Using a specially adapted reading device, these encoded properties can be uniquely identified, enabling highly effective and reliable authenticity verification.



◀ Abbildung 1: Auslesen des Strukturierten Hologramms mit Hilfe eines grünen Lasers.
Figure 2: Readout of the structured hologram using a green laser.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Glas-Phasenmasken

Binäre Phasenmasken sind zentrale Bauelemente der diffraktiven Optik und finden breite Anwendung in der Strahlformung, optischen Filterung sowie in interferometrischen Verfahren. Im Gegensatz zu Amplitudenmasken, die die Lichtintensität modulieren, steuern Phasenmasken das Beugungsbild durch eine räumlich variierende Phasenmodulation der Wellenfront bei gleichzeitig hoher Transmissionseffizienz.

In den letzten Jahren haben wir die Herstellung von Phasenmasken durch Laserstrukturierung einer Siliziumsuboxid-(SiO_x)-Schicht auf einem Quarzglassubstrat demonstriert. Auf diese Weise wurden binäre optische Elemente wie computergenerierte Hologramme oder Phasengitter für die Laser-Mikrobearbeitung und die Mikroskopie mit strukturierter Beleuchtung gefertigt. Dieses Material hat jedoch einen wesentlichen Nachteil: Das substöchiometrische Siliziumoxid absorbiert stark im UV- und noch mäßig im blauen Spektralbereich. Daher ist eine Hochtemperaturnachbehandlung (1000 °C) erforderlich, um SiO_x zu SiO_2 zu oxidieren und so eine vollständig transparente optische Komponente zu erhalten.

Wird statt SiO_x ein Borosilikatglasfilm verwendet, entfällt dieser Hochtemperaturschritt, und die hergestellten Komponenten können direkt oder nach einem moderaten Tempern eingesetzt werden.

Glass phase masks

Binary phase masks are key elements in diffractive optics, widely used for beam shaping, optical filtering, and interferometric applications. Unlike amplitude masks, which control light by attenuating its intensity, phase masks manipulate the diffraction pattern through spatially tailored wavefront phase modulation while largely preserving optical power.

In recent years, we have demonstrated the fabrication of phase masks by laser patterning of a silicon suboxide (SiO_x) film on a fused silica substrate. Binary optics such as computer generated holograms or phase gratings for laser micro machining or structured illumination microscopy have been fabricated this way. However, there is a serious disadvantage using this material. The substoichiometric silicon oxide is strongly absorbing in the UV and even moderately absorbing in the blue spectral range, making a high temperature (1000°C) post processing necessary in order to oxidize SiO_x to SiO_2 and thus obtaining a fully transparent optical component. When a borosilicate glass film is used instead of SiO_x , the high-temperature step is eliminated, and the fabricated components can be applied directly or after an annealing step at moderate temperature. Such glass films with thickness ranging from a few hundred nm to about 1 μm have been deposited on fused silica substrates by magnetron sputtering using a target of BK7-glass.

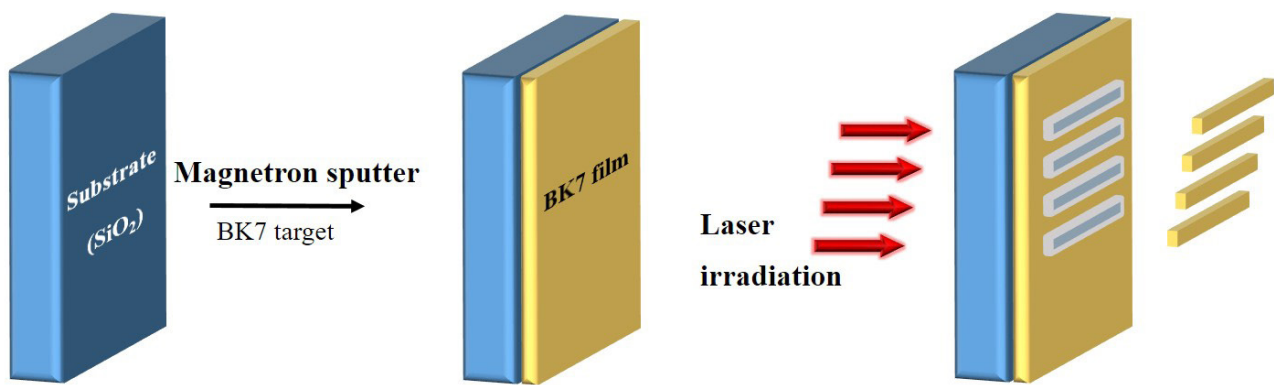


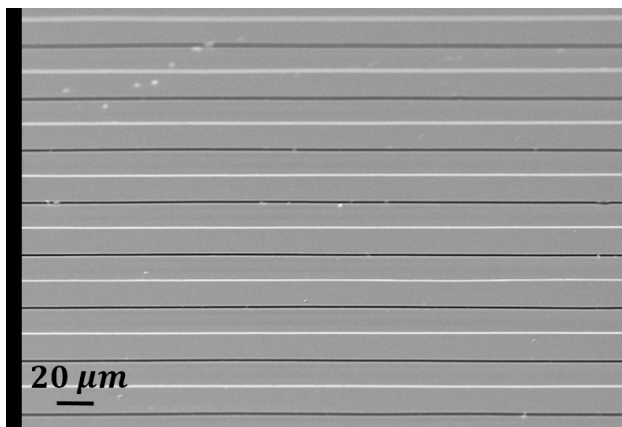
Abb. 1: Dünnschicht-Strukturierung durch Excimerlaser-Rückseitenablation.
Fig. 1: Thin film patterning by excimer laser rear-side ablation.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Solche Glasfilme mit Dicken von einigen hundert Nanometern bis etwa 1 μm wurden durch Magnetronspütern eines BK7-Glas-Targets auf Quarzglassubstrate abgeschieden. Als Beispiel wurde eine binäre Phasenmaske (Linienmuster mit 50 μm Periode) durch Laserablation mit einem ArF-Excimerlaser in Rückseitenkonfiguration unter Verwendung eines Maskenprojektionssystems hergestellt (Abb. 1, 2). Perioden im Bereich von 10 bis 100 μm eignen sich optimal z. B. für Laserinterferenzbearbeitung mit typischerweise 10- bis 25-facher Verkleinerung.

Die Phasenverschiebung $\Delta\Phi$ zwischen den beiden Höhenstufen der Maske mit der Tiefenmodulation d und dem Brechungsindex n des Glasfilms ergibt sich bei der Wellenlänge λ zu $\Delta\Phi = d(n-1) \times 2\pi/\lambda$. Für $d = 1,1 \mu\text{m}$, $\lambda = 405 \text{ nm}$ und $n = 1,53$ ergibt sich $\Delta\Phi \approx 3\pi$. Obwohl für maximale Beugungseffizienz in die ± 1 . Ordnung idealerweise eine Phasendifferenz von π erforderlich ist, ist 3π aufgrund der 2π -Periodizität der Phasenmodulation funktional äquivalent zu π . Das Beugungsmuster eines 405-nm-Strahls, der durch die Phasenmaske transmittiert wird, ist in Abb. 3 dargestellt. Wie erwartet sind nur die ungeradzahigen Beugungsordnungen sichtbar, wobei die Intensität in den ± 1 . Ordnungen maximal ist.



As an example, a binary phase mask (line pattern with 50 μm period) was produced by laser ablation with an ArF excimer laser using a mask projection setup in a rear side configuration (Figs. 1, 2). Periods in the range of 10 to 100 μm are optimally suited e.g. for laser interference processing with typically 10x to 25x demagnification.

The phase shift $\Delta\Phi$ between the two height levels of the mask with depth modulation d , light of a wavelength λ , and a refractive index of the glass film n is given by $\Delta\Phi = d(n-1) \times 2\pi/\lambda$. For $d = 1.1 \mu\text{m}$, $\lambda = 405 \text{ nm}$ and $n = 1.53$ this yields $\Delta\Phi \approx 3\pi$. Although a phase difference of π is ideally required for maximum diffraction efficiency into the ± 1 st orders, 3π is functionally equivalent to π due to the 2π -periodicity of phase modulation. The diffraction pattern of a 405-nm-beam transmitted through the phase mask is shown in Fig. 3. As expected, only the odd-numbered diffraction orders are visible with maximum intensity in the ± 1 st orders.

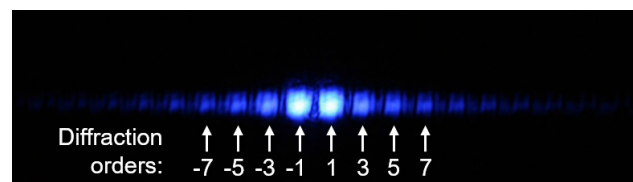


Abb. 3: Durch Bestrahlung der Phasenmaske mit einem Diodenlaser (405 nm) erzeugtes Beugungsbild. Foto von einem weißen Papierschirm hinter der Phasenmaske.

Fig. 3: Diffraction pattern generated by illuminating the phase mask with a diode laser beam at 405 nm. Photo taken from a white paper screen behind the phase mask.

Fig. 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (Blickwinkel 60°) einer in Form eines Liniengitters hergestellten Phasenmaske in 1.1 μm BK7-Glas auf Quarzglas, Linienbreite 28 μm . Laserparameter: 193 nm, 20 ns, 1.15 J/cm², 1 Puls pro Line.

Fig. 2: Scanning electron microscope images (viewing angle 60°) of a phase mask fabricated in form of a line pattern in 1.1 μm BK7-glass on fused silica, line width 28 μm . Laser parameter: 193 nm, 20 ns, 1.15 J/cm², 1 pulse per line.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Drucken von Glas auf Glas

Die additive Fertigung von Glasprodukten ist ein aktives Forschungsfeld. Viele bisherige Verfahren basieren auf der Verarbeitung von geschmolzenem Glas. Dabei entstehen jedoch Grenzen in Präzision und Oberflächenqualität, die eine Nutzung für optische Anwendungen erschweren.

Unser Ansatz verfolgt einen anderen Weg: Wir drucken festes Glas direkt auf ein festes Substrat mithilfe des laserinduzierten Vorwärtstransfers (LIFT). Dabei wird das Aufbaumaterial („Donor“) durch einen Laserimpuls von einem transparenten Träger („Carrier“) auf ein nahebei positioniertes Empfängersubstrat („Receiver“) übertragen (Abb. 1). Wird ein fester Glasfilm als Donor verwendet, können räumlich geformte Laserimpulse kleine „Glasbausteine“ ausschneiden und gezielt auf das Empfängersubstrat übertragen. Eine zentrale Herausforderung ist die zuverlässige Haftung dieser Bausteine – besonders, wenn sowohl Donorfilm als auch Receiversubstrat aus Glas bestehen.

Als Donor-Glasmaterial dient substöchiometrisches Siliziumoxid (SiO_x mit $x < 2$). Dieses lässt sich als dünner Film auf Quarzglas abscheiden und absorbiert ausreichend UV-Licht für den LIFT-Prozess mit einem UV-Excimerlaser. Bei passender Laserfluenz trennt sich der Film im bestrahlten Bereich vollständig vom Träger. Je nach Bedingungen kann der Film zersplittern (Abb. 2a), ohne Haftung bleiben oder erfolgreich auf dem Empfängersubstrat haften (Abb. 2b).

Printing Glass on Glass

The additive manufacturing of glass products is an area of intensive research. Most existing methods build glass structures from molten glass, which poses a major drawback: although the glass solidifies into a 3D shape, the resulting precision and surface quality are inadequate for optical components due to process limitations.

We pursue an alternative approach that prints solid glass directly onto a solid substrate using laser-induced forward transfer (LIFT). In this technique, the donor material is transferred from a transparent carrier substrate to a receiver by a laser pulse applied from the rear side. The donor, detached by the pulse, is deposited onto the receiver positioned in close proximity (Fig. 1). When a solid glass film serves as the donor, spatially shaped laser pulses can cut out “glass building blocks” that are subsequently deposited on the receiver. A key challenge is to ensure adhesion of these blocks, particularly when both donor and receiver are glass.

As donor material, we use substoichiometric silicon oxide (SiO_x with $x < 2$), which can be deposited as thin films on fused silica carriers and exhibits sufficient UV absorption for LIFT with a UV excimer laser. At sufficiently high fluence, the film ruptures along the irradiation boundaries and detaches completely from the carrier within the irradiated area. Depending on conditions, this may lead to (a) film fragmentation (Fig. 2a), (b) detachment without adhesion, or (c) successful transfer with adhesion to the receiver (Fig. 2b).

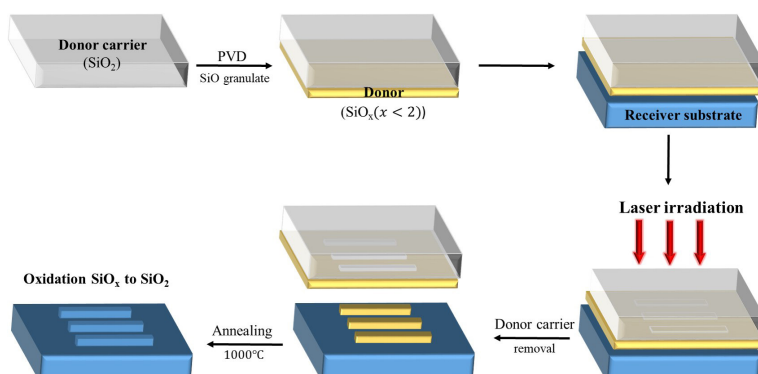


Abb. 1: Schema des laserinduzierten Filmtransfers durch Rückseitenablation mit einem gepulsten Laser.
Fig. 1: Schematic of the laser-induced transfer of SiO_x films through rear side ablation with a pulsed laser.

Kurze Wellenlängen

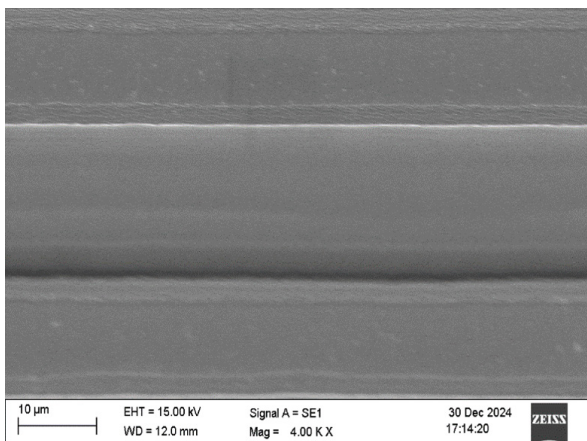
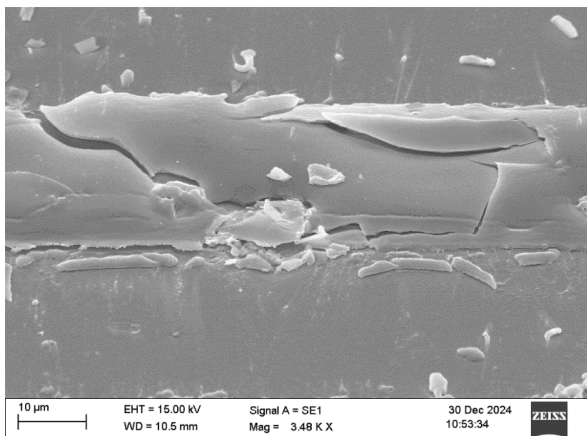
Short Wavelengths

Für eine stabile Übertragung auf Glas, insbesondere Quarzglas, sind zwei Faktoren entscheidend:

1. Die Laserfluenz muss zur Schichtdicke passen – etwa $0,8 \text{ J/cm}^2$ bei 300 nm bis $1,3 \text{ J/cm}^2$ bei 1000 nm (Abb. 3).
2. Der Abstand zwischen Donor und Empfänger muss sehr klein sein; etwa $1 \mu\text{m}$ ist ausreichend, $10 \mu\text{m}$ hingegen zu groß.

Um diesen geringen Abstand sicherzustellen, wurde ein spezielles Andrucksystem entwickelt. Für UV-Anwendungen kann das übertragene SiO_x anschließend durch Hochtemperaturbehandlung zu SiO_2 oxidiert werden, um eine hohe Transparenz im UV-Bereich zu erreichen (Abb. 1).

Potentielle Anwendungen dieser Methode liegen in der additiven Fertigung von optischen Komponenten wie z.B. von Phasenmasken oder computer-generierten Hologrammen.



Successful transfer on glass, especially fused silica, requires:

1. Precise matching of laser fluence to film thickness – about 0.8 J/cm^2 for 300 nm to 1.3 J/cm^2 for 1000 nm films (Fig. 3).
2. A very small donor–receiver gap; a spacing of $\sim 1 \mu\text{m}$ is sufficient, whereas $10 \mu\text{m}$ is too large.

To meet the second condition, a special pressing system was developed. For UV applications, the transferred SiO_x material can subsequently be oxidized to SiO_2 through high-temperature treatment to ensure high UV transparency (Fig. 1).

Potential applications of this method include the additive manufacturing of optical components such as phase masks or computer-generated holograms.

Abb. 2: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von SiO_x -Streifen (Schichtdicke: 705 nm), die mit einem einzelnen Excimerlaser-Puls (Wellenlänge: 248 nm , Fluenz: $1,25 \text{ J/cm}^2$) auf Quarzglas gedruckt wurden. (a) Ohne äußeren Andruck, (b) mit Andruck.
Fig. 2: Scanning electron microscope images of SiO_x strips (thickness: 705 nm) printed on fused silica using a single excimer laser pulse (wavelength: 248 nm , fluence: 1.25 J cm^{-2}). (a) Without external compression, (b) with applied compression.

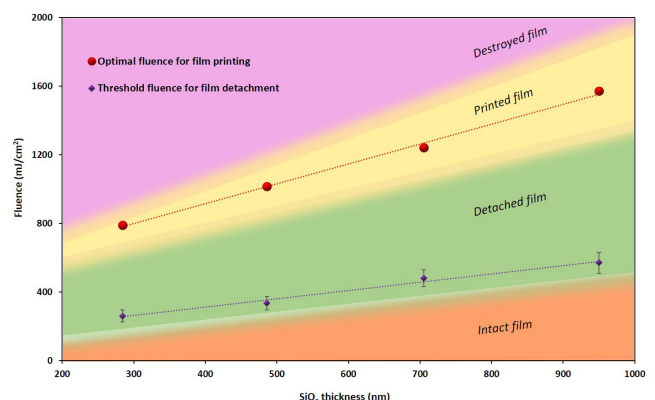


Abb. 3: Schwell- und Optimalfluenz in Abhängigkeit von der SiO_x -Schichtdicke, basierend auf vier experimentell untersuchten Werten. Jeder Punkt stellt den Mittelwert aus 3-5 Messungen dar. Farbcodierte Bereiche kennzeichnen die in den Experimenten identifizierten Prozessregime.

Fig. 3: Threshold and optimum fluences versus SiO_x film thickness, based on four experimentally studied values. Each point represents the average of 3-5 measurements. Color-coded regions indicate process regimes identified from experiments.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Laserinduzierte Spannungserzeugung in Borosilikatglas

Die Herstellung hochpräziser Spiegel erfordert eine präzise Kontrolle schichtinduzierter Verformungen, die insbesondere bei dünnen Substraten aufgrund der quadratischen Abhängigkeit der Krümmung von der Substratdicke kritisch sind. Daher besteht ein hoher Bedarf an Verfahren zur gezielten Formkorrektur funktional beschichteter Substrate.

In den vorangegangenen Jahresberichten wurde gezeigt, dass sich durch laserbasierte Linienstrukturierung von Glasoberflächen gezielt zylindrische Verformungen induzieren lassen, die zur hochpräzisen Formkorrektur beschichteter Substrate, etwa mit reflektierenden Metallschichten, genutzt werden können. Abbildung 1(a) zeigt exemplarisch eine solche Linienstruktur.

Weiterführenden Untersuchungen zur Identifikation der physikalischen Ursachen dieser laserinduzierten Verformungen zeigen, dass zwei Effekte maßgeblich beitragen: eine laserbeeinflusste Zone entlang der Grabenflanken sowie eine spannungsbehaftete Debrissschicht (redeponiertes Material) auf den unbestrahlten Stegen. Beide führen zu anisotropen Spannungszuständen und damit zu gerichteten Verformungen wie der beobachteten zylindrischen Krümmung.

Laser induced stress generation in borosilicate glass

The fabrication of high-precision mirrors requires accurate control of coating-induced deformations, which become particularly critical for thin substrates due to the quadratic dependence of curvature on substrate thickness. Consequently, there is a strong demand for methods enabling targeted figure correction of functionally coated substrates.

In previous annual reports, it was demonstrated that laser-based line structuring of glass surfaces can be used to induce well-defined cylindrical deformations, which can be exploited for high-precision figure correction of coated substrates, for example those with reflective metal layers. Figure 1(a) shows an exemplary line structure.

The present investigations relating to the physical origins of these laser-induced deformations indicate that two effects are decisive: a laser-affected zone along the trench flanks and a stress-bearing debris layer on the unirradiated ridges. Both contribute to anisotropic stress states and thus to directed deformations such as the observed cylindrical curvature.

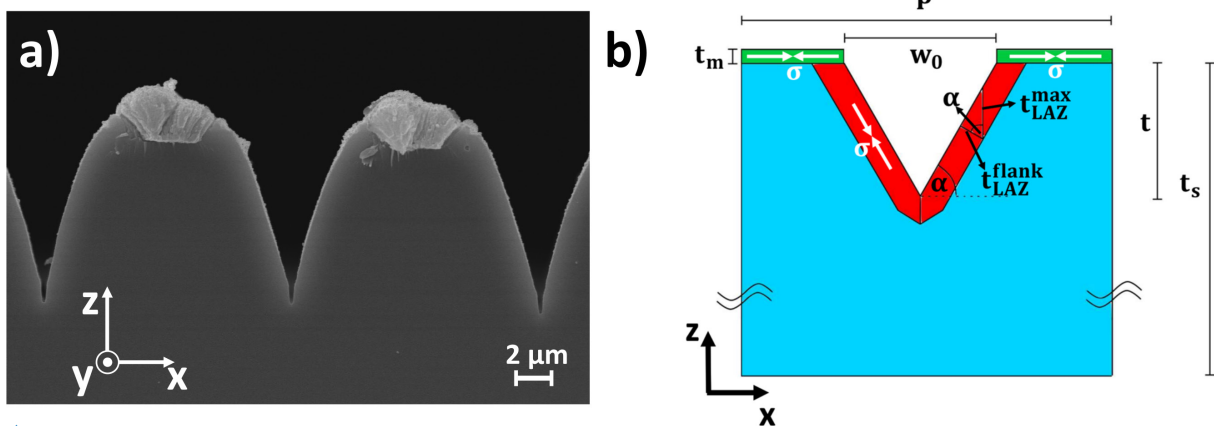


Abb. 1. (a) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Linienstruktur mit Periode $p=12\ \mu\text{m}$, Linienbreite $w_0=6\ \mu\text{m}$ und -tiefe $t=11.5\ \mu\text{m}$. Die Bestrahlungsparameter sind $\lambda=193\ \text{nm}$, $F=1.2\ \text{J}/\text{cm}^2$, $n=80$ und $f=10\ \text{Hz}$. (b) Skizze eines Querschnitts einer Einheitszelle, die als Grundlage für die Finite-Elemente Simulation dient. Der rote Bereich stellt die laser-beeinflusste Zone mit Dicke t_{LAZ}^{flank} entlang der Linienkontur dar. Die Spannungsrichtung hängt hierbei vom Strukturwinkel α ab. Der grüne Bereich stellt die spannungsbehaftete Debrissschicht der Dicke t_m dar. Das Substrat besitzt eine Dicke $t_s=210\ \mu\text{m}$.

Kurze Wellenlängen

Short Wavelengths

Zur weiteren Analyse wurden die Linienstrukturen modelliert und das laserinduzierte Biegeverhalten mittels Finite-Elemente-Methode simuliert. Abbildung 1(b) zeigt den Querschnitt einer entsprechenden Einheitszelle. Die laserbeeinflusste Zone entlang der Grabenflanken weist eine Dicke von etwa $1.3 \mu\text{m}$ auf und ist damit geringer als bei flächiger Bestrahlung ($1.9 \mu\text{m}$), was auf den schrägen Einfall des Laserstrahls zurückzuführen ist. Ergänzend wurde eine spannungsbehaftete Debris-schicht mit einer Höhe proportional zum abgetragenen Volumen berücksichtigt. Der anfängliche Spannungsbetrag beträgt 130 MPa (Zugspannung).

Die FEM-Ergebnisse zeigen, dass die Spannung parallel zur Linienorientierung kaum relaxiert (Abb. 2(a)), während senkrecht dazu eine deutliche Spannungsrelaxation auftritt (Abb. 2(b)). Dadurch wird ausschließlich eine Krümmung parallel zur Linienrichtung induziert, während senkrecht dazu keine relevante Krümmung entsteht. Im mechanischen Gleichgewicht bildet sich erwartungsgemäß eine Druckspannung im Substrat aus. Abbildung 2(c) zeigt exemplarisch die experimentell und numerisch bestimmten Krümmungen für konstante Fluenz und variierende Laserpulszahl.

For further analysis, the line structures were modeled and the laser-induced bending behavior was simulated using the finite element method. Figure 1(b) shows the cross-section of a corresponding unit cell. The laser-affected zone along the trench flanks has a thickness of approximately $1.3 \mu\text{m}$ and is therefore thinner than in the case of homogeneous irradiation ($1.9 \mu\text{m}$), which is attributed to the oblique incidence of the laser beam. In addition, a stress-bearing debris layer with a height proportional to the ablated volume was included. The initial stress magnitude amounts to 130 MPa (tensile stress).

The FEM results show that the stress parallel to the line orientation hardly relaxes (Fig. 2(a)), whereas a pronounced stress relaxation occurs perpendicular to the line orientation (Fig. 2(b)). As a consequence, curvature is induced exclusively parallel to the line direction, while no relevant curvature develops perpendicular to it. In mechanical equilibrium, a compressive stress forms within the substrate. Figure 2(c) exemplarily compares experimentally and numerically determined curvatures for constant fluence and varying pulse number.

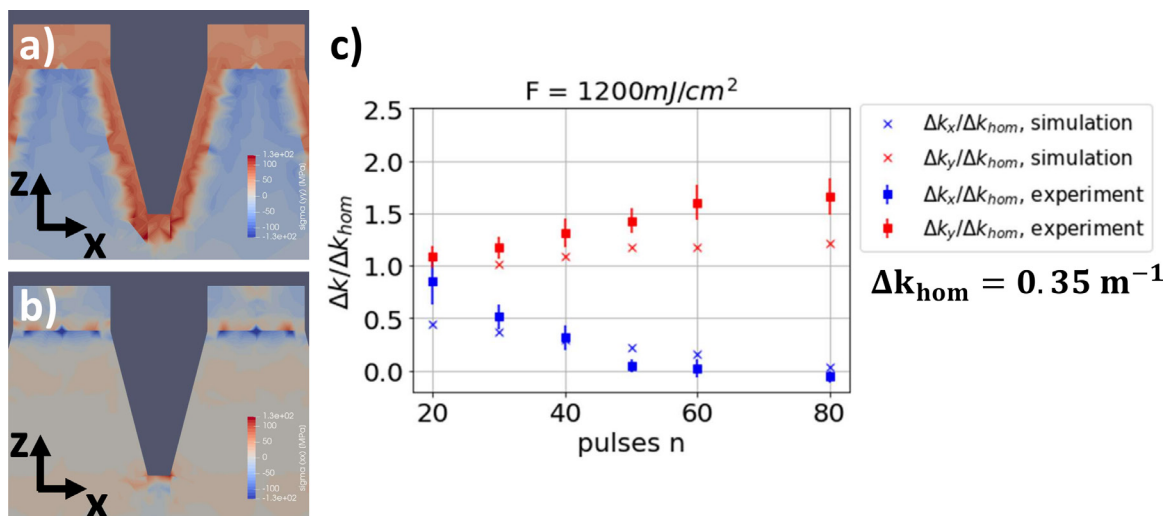


Abb. 2 (a) Betrag der Spannung parallel zur Linienorientierung (y) (rot = Zugspannung, blau = Druckspannung) für die in Abb. 1 (a) gezeigte Linienstruktur. (b) Betrag der Spannung senkrecht zur Linienorientierung (x) (rot = Zugspannung, blau = Druckspannung) für die in Abb. 1 (a) gezeigte Linienstruktur. (c) Normierte induzierte Krümmungen parallel (y) und senkrecht (x) zur Linienorientierung.

Berichte aus der Abteilung

Departmental Reports



Dr. Hainer Wackerbarth
Abteilungsleiter

T +49 551/5035-58
F +49 551/5035-99
M hainer.wackerbarth@ifnano.de

MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Jonas Bedhief

Dr. Georgios Ctistis

Mohammed Dagher

Dr. Jan Geweke

Dr. Christoph Lenth

Stefan Scholz

Pascal Schröder

Dr. Sven Schwabe

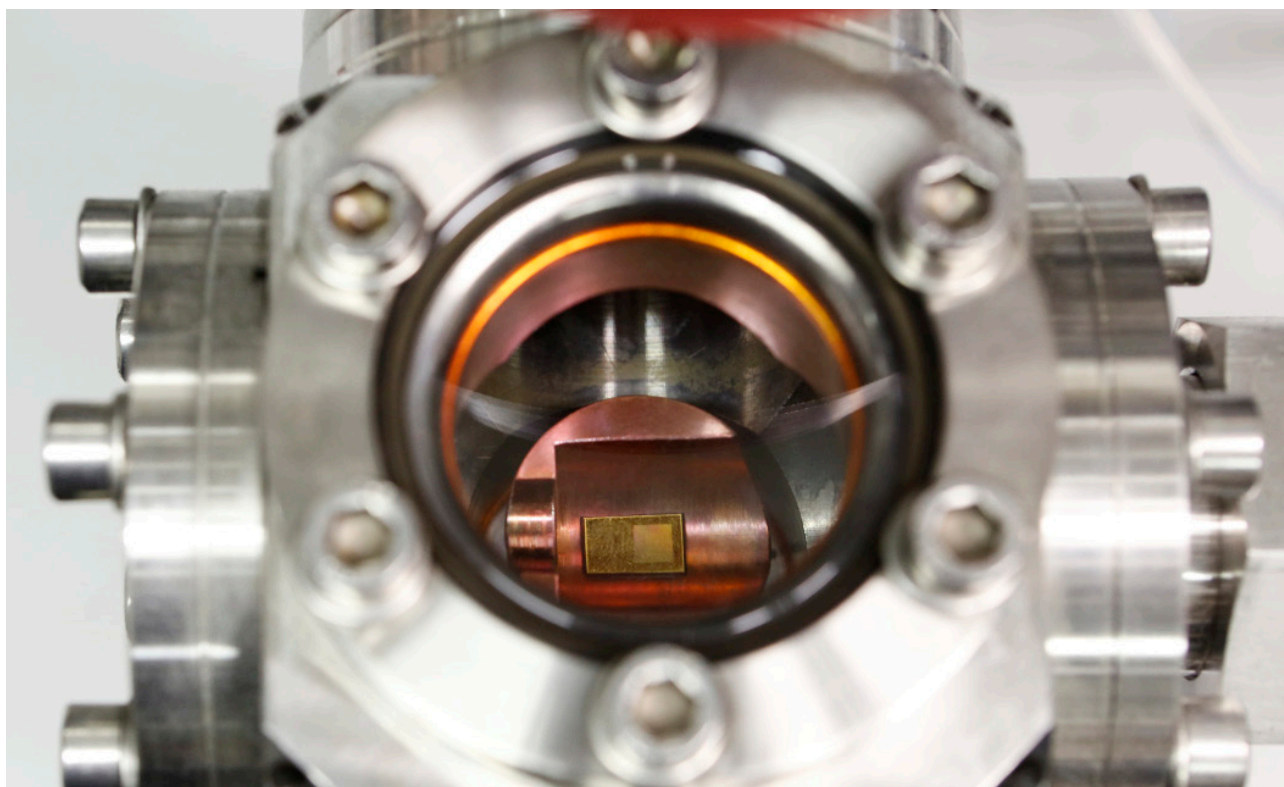
Tianziyu Shen

Fabian Merker-Müller

Dr. Felix Müller

Florian Wieduwilt

Zikai Yang



Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Die Abteilung erforscht und entwickelt neuartige sensorische Messverfahren. Diese basieren überwiegend auf Ramanstreuung, Fluoreszenz, IR-Absorption, Laserinduzierter Plasmaspektroskopie, Fotometrie sowie Ionenmobilitätsspektrometrie. Zudem werden diese häufig mit spezifischen Probenvorbereitungsverfahren und Methoden der künstlichen Intelligenz kombiniert. Die Stärken dieser Sensorverfahren liegen in den meist zerstörungsfreien, berührungslosen sowie schnellen Messungen. Weiterhin ermöglichen sie die Analyse von Elementen, Substanzen, Strukturen sowie komplexen Matrices und biologischen Systemen. Durch neue Kombinationen von den optischen Methoden mit der Mikrofluidik, der Nanotechnologie oder der Chemometrie ergibt sich ein sehr hohes Potenzial für innovative Anwendungen insbesondere in den Arbeitsfeldern Umweltanalytik, Point-of-Care-Testing, Vor-Ort-Analytik, Material- und Bioanalytik und Prozessanalytik.

Im Bereich der Umweltanalytik wird erforscht, ob eine elektronische Nase die Auswirkungen von Dekontaminationsverfahren auf Naturrohstoffe wie Tees und Gewürze erfasst. Zudem wird die hyperspektrale Fotometrie eingesetzt, um Farbveränderungen, die mit den Behandlungen der Naturrohstoffe einhergehen, zu evaluieren. Im Bereich der Prozessanalytik wird die Plasmaspektroskopie für die Bestimmung verschiedener Elemente im Bergbau eingesetzt. Des Weiteren wird intensiv an Point-of-Care-Tests geforscht, bei denen die oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie und hyperspektrale Fluoreszenzauslesung eingesetzt werden, um die Nachweisgrenzen zu verbessern, zu quantifizieren und das Multiplexing mehrerer Analyte zu ermöglichen. Schließlich wird die Plasmonik von komplexen Nanostern-Satelliten-Systemen mittels Raman-Spektroskopie erforscht, die in der Bioanalytik Anwendung finden sollen. Für all die unterschiedlichen analytischen Verfahren werden automatisierte Datenauswertungsverfahren auf der Basis der künstlichen Intelligenz entwickelt.

The department researches and develops novel sensory measurement methods. These are mainly based on Raman scattering, fluorescence, IR absorption, laser-induced plasma spectroscopy, photometry, and ion mobility spectrometry. In addition, these are often combined with specific sample preparation procedures and artificial intelligence methods. The strengths of these sensor methods lie in the mostly non-destructive, non-contact, and fast measurements. They also enable the analysis of elements, substances, structures as well as complex matrices, and biological systems. New combinations of optical methods with microfluidics, nanotechnology or chemometrics result in a very high potential for innovative applications, particularly in the fields of environmental analysis, point-of-care testing, on-site analysis, material and bioanalytics, and process analysis.

In the field of environmental analytics, research is being conducted to determine whether an electronic nose can detect the effects of decontamination procedures on natural raw materials such as teas and spices. In addition, hyperspectral photometry is used to evaluate color changes associated with the treatment of these natural raw materials. In the field of process analytics, plasma spectroscopy is employed for the determination of various elements in mining.

Furthermore, intensive research is being carried out on point-of-care tests, utilizing surface-enhanced Raman spectroscopy and hyperspectral fluorescence detection to improve detection limits, quantify results, and enable multiplexing of several analytes. Finally, the plasmonics of complex nanostar-satellite systems is investigated using Raman spectroscopy, with the aim of applying these systems in bioanalytics. Automated data analysis methods based on artificial intelligence are being developed for all these different analytical techniques.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Entwicklung einer laserbasierten Echtzeit-Elementanalyse für den Bergbau

Die effiziente und nachhaltige Gewinnung von Rohstoffen stellt eine zentrale Herausforderung für die moderne Industrie dar. Besonders in der Planung von Abbaurouten in Bergwerken besteht dabei ein erhebliches Optimierungspotenzial. Durch den Einsatz datenbasierter Vorhersagemodelle kann der Abbau so gesteuert werden, dass vorrangig hochwertiges Gestein gefördert wird, während minderwertiges Material im Grubengebäude verbleibt und somit weder transportiert noch aufbereitet werden muss. Voraussetzung hierfür ist die präzise Kenntnis der Materialzusammensetzung des aktuell gewonnenen Gesteins. Herkömmliche Laboranalysen sind hierfür jedoch zu zeitaufwendig und kostenintensiv und daher nur bedingt geeignet. Das Projekt zielt darauf ab, ein robustes Sensorsystem zu entwickeln, das eine kontinuierliche und ortsnahe Elementanalyse in Echtzeit unter den anspruchsvollen Bedingungen des untertägigen Bergbaus ermöglicht. Kern des Projekts ist die Weiterentwicklung der laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS) durch den Einsatz einer zweifarben-Doppelpuls-Technik.

Development of a laser-based real-time elemental analysis for mining

The efficient and sustainable extraction of raw materials represents a central challenge for modern industry. In particular, there is significant optimisation potential in the planning of mining routes in mines. By employing data-driven predictive models, extraction can be steered so that high-quality rock is preferentially mined, while lower-grade material is left in the pit and thus does not need to be transported or processed. This requires precise knowledge of the composition of the material being extracted at the time. Conventional laboratory analyses, however, are too time-consuming and costly, and therefore only partially suitable.

The project aims to develop a robust sensor system that enables continuous, near-site elemental analysis in real time under the demanding conditions of underground mining. The core of the project is the further development of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) using a two-colour double-pulse technique. This allows a substantial amplification



◀ Zwei Fotos eines Salzgesteins im LIBS-System, aufgenommen durch ein gefärbtes Sicherheitsglas. Links ist die Probe ohne und rechts mit der Plasmaflamme zu sehen. Two photos of a salt rock in the LIBS system, taken through a coloured safety glass. The left image shows the sample without the plasma flame, and the right image shows it with the plasma flame.

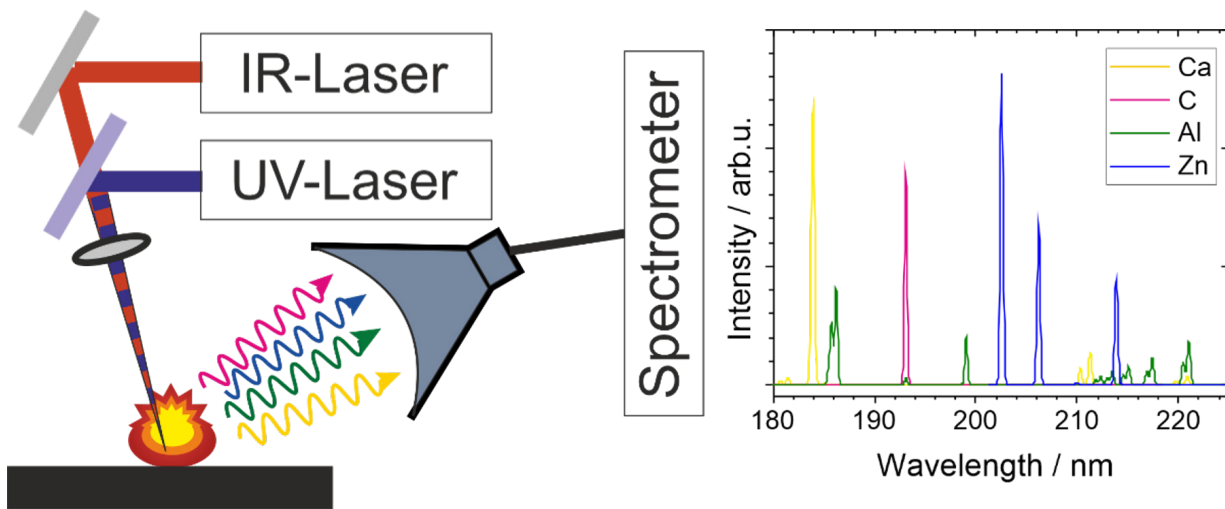
Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Diese ermöglicht eine deutliche Verstärkung der Emissionssignale und schafft damit die Grundlage für den Einsatz der Methode in Echtzeitanwendungen. Aufbauend auf vorhandenen Laboraufbauten wird ein Demonstrator entwickelt, der zunächst im Labor und anschließend unter realen Bergbaubedingungen erprobt wird. Ziel ist die direkte Integration der gewonnenen Messdaten in digitale Vorhersagemodelle zur Optimierung der Abbauprozesse. Durch die Kombination mit komplementären Sensortechnologien, insbesondere Hyperspektralfotometrie, entsteht ein leistungsfähiges Gesamtsystem zur präzisen Vor-Ort-Materialcharakterisierung im Bergbau.

of the emission signals, thereby providing the basis for real-time application of the method.

Building on existing laboratory setups, a demonstrator will be developed during the project. It will first be tested in the laboratory and then deployed under real mining conditions. The goal is the direct integration of the acquired measurement data into digital predictive models to optimise mining processes. By combining it with complementary sensor technologies, particularly hyperspectral photometry, a powerful integrated system for precise on-site material characterisation in mining is created.



▲ Schematische Darstellung des Messprinzips der Laserinduzierten Plasmaspektroskopie. Hier ist die geplante Variante mit Zweifarben-Doppelpuls gezeigt.

Schematic depiction of the measurement principle of laser-induced plasma spectroscopy. Here, the planned variant featuring a two-colour double pulse is shown.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Inaktivierung von Mikroorganismen und Kleinstlebewesen auf Schüttgütern

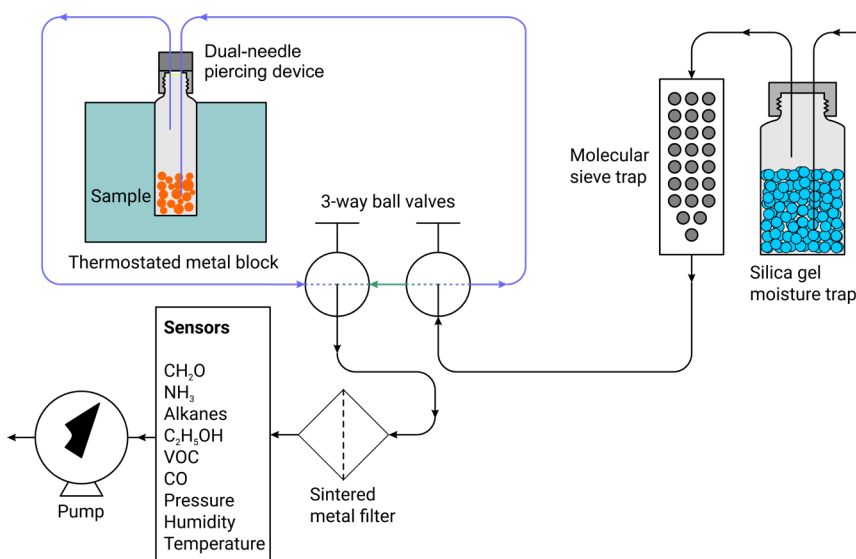
Für Hersteller und Lieferanten von Kräutern, Tees und Gewürzen stellen Kontaminationen durch Mikroorganismen wie Pilze und Bakterien sowie Kleinstlebewesen wie Milben eine erhebliche Herausforderung dar. Diese Verunreinigungen beeinflussen sowohl die Produktqualität und Haltbarkeit als auch die Sicherheit für den Verbraucher. Herkömmliche Methoden zur Inaktivierung, etwa Wasserdampf- oder CO₂-Behandlungen, sind oft unzureichend oder für empfindliche Naturrohstoffe ungeeignet. Daher gewinnen alternative Verfahren, wie die Inaktivierung durch UV-Licht oder der Einsatz von Plasmen, zunehmend an Bedeutung. Ihre Wirkungsweise ist jedoch bislang nicht vollständig erforscht.

Im Rahmen eines Verbundprojekts untersucht das IFNANO die Wirkung dieser Verfahren auf biologische Produkte, indem Veränderungen vor und nach der Behandlung mit Plasma oder UV-Strahlung analysiert werden. Ziel ist die Entwicklung eines kostengünstigen und einfach zu bedienenden Analysesystems, das sich für atline-Messungen direkt

Inactivation of Microorganisms and Small Organisms on Bulk Materials

For manufacturers and suppliers of herbs, teas, and spices, contamination by microorganisms such as fungi and bacteria, as well as microfauna such as mites, represents a significant challenge. These contaminants affect both product quality and shelf life, as well as consumer safety. Conventional inactivation methods steam or CO₂ treatments, for example are often inadequate or unsuitable for delicate natural raw materials. Consequently, alternative approaches, such as UV-light inactivation or plasma-based treatments, are gaining increasing importance, although their mechanisms of action remain incompletely understood.

Within a collaborative project, IFNANO is investigating the impact of these methods on biological products by analysing changes before and after treatment with plasma or UV radiation. The aim is to develop a cost-effective, user-friendly analysis system suitable for at-line measurements directly in an industrial environment, with long-term potential for online analytics.



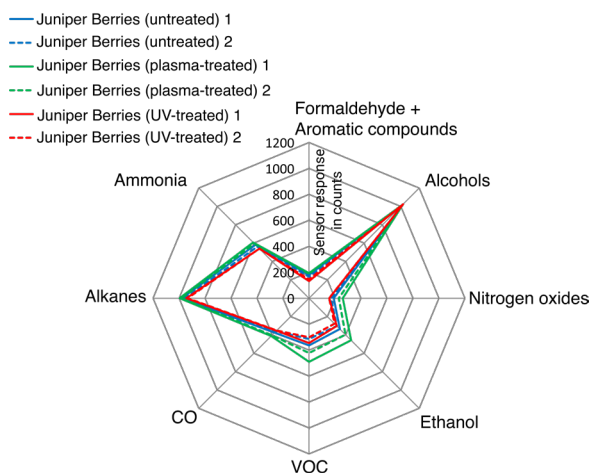
▲ Aufbau Gassensorik-System mit Kernelement elektronischer Nase für die Aromaanalyse von Schüttgütern aus der Lebensmittelindustrie.
Development of a gas sensor system with the electronic nose as the core component for the aroma analysis of bulk goods from the food industry.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

im industriellen Umfeld eignet und langfristig Potenzial für eine Online-Analytik bietet. Für unerwünschte Farbveränderungen werden phototechnische Verfahren auch auf Basis der hyperspektralen Bildgebung entwickelt, während Aromaveränderungen mithilfe einer Gasanalytik auf Basis von Halbleitersensoren untersucht werden. Bei der Gasanalytik kommt eine sogenannte elektronische Nase zum Einsatz, die aus mehreren Halbleitersensoren besteht. Zur Kalibrierung und Standardisierung werden zusätzlich Temperatur, Druck und Luftfeuchte aufgezeichnet. Die auf unterschiedliche Gasarten spezialisierten Sensoren erzeugen dabei ein charakteristisches, produktspezifisches Muster.

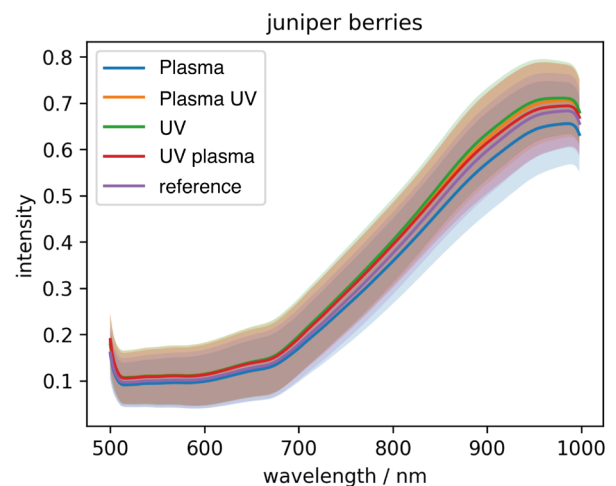
Erste Auswertungen zeigen, dass mit dieser Gas-sensorik tatsächlich Veränderungen infolge des Deaktivierungsprozesses detektiert werden können. Gleichzeitig scheint die optische Qualität kaum beeinflusst zu werden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird derzeit eine Auswertemethode auf Basis des überwachten maschinellen Lernens entwickelt.



▲ Sensorantworten der elektronischen Nase für verschiedene Sensortypen, klassifiziert nach der Substanz, die die maximale Reaktion hervorruft. Sensor responses of the electronic nose for different sensor types, classified by the substance that induces the maximum response.

Photonic techniques based on hyperspectral imaging are being developed to detect unwanted colour changes, while aroma alterations are examined using gas analytics that employ semiconductor sensors. The gas analytics system, commonly referred to as an electronic nose, consists of multiple semiconductor sensors. For calibration and standardisation temperature, pressure, and humidity are simultaneously recorded. The sensors, specialised for different gas species, generate a characteristic, product-specific pattern.

Initial evaluations indicate that this gas-sensor technology can indeed detect changes resulting from the deactivation process, while the optical quality appears to be minimally affected. Building on these findings, a data analysis method based on supervised machine learning is currently being developed.



▲ Spektren, die aus Hyperspektralbildern von unterschiedlich behandelten Wacholderbeeren extrahiert wurden. Die eingezeichnete Linie zeigt die über alle zugehörigen Pixel gemittelte Intensität, während der schattierte Bereich einer Standardabweichung entspricht. In der Legende ist die zugehörige Behandlungsmethode gegeben. Spectra extracted from hyperspectral images of differently treated juniper berries. The solid line shows the intensity averaged across all associated pixels, while the shaded area corresponds to one standard deviation. The legend indicates the associated treatment method.

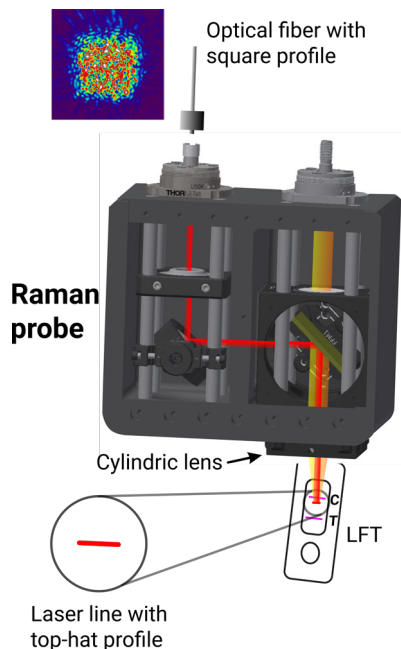
Photonische Sensorik Photonic Sensor Technologies

Multiplex-POC-Tests für die Tiermedizin

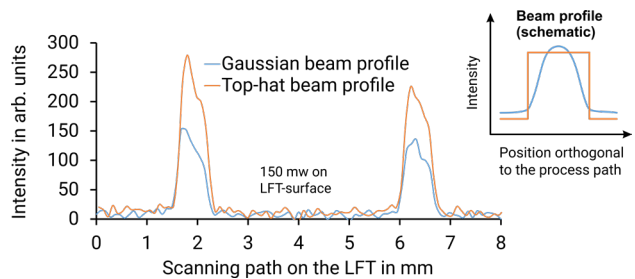
Im Rahmen des Südniedersachsen Point-of-Care-Clusters (SNIPOCC) werden innovative analytische Schnelltests für Veterinär- und Humanmedizin sowie angrenzende Bereiche entwickelt. Das IFNANO bringt hierfür seine Expertise in der Raman-basierten Auslesetechnologie für Lateral-Flow-Tests (LFTs) ein. Raman-Spektroskopie ermöglicht durch klar abgegrenzte Molekülbanden eine hohe Spezifität und Empfindlichkeit bei der Analyse von Test- und Kontrolllinien. Ihr Hauptnachteil - die geringe Quantenausbeute - kann durch plasmonisch verstärkende Markierungspartikel überwunden werden (SERS). Eine zentrale Herausforderung ist die Maximierung der Streulichtausbeute ohne thermische Schädigung der LFTs. Dies lässt sich durch einen Linienfokus anstelle eines Punktfokus reduzieren.

Multiplex lateral POC tests for veterinary medicine

Within the Southern Lower Saxony Point-of-Care Cluster (SNIPOCC), innovative analytical rapid tests are being developed for veterinary and human medicine as well as related fields. IFNANO contributes its expertise in Raman-based readout technologies for lateral flow tests (LFTs). Raman spectroscopy provides high specificity and sensitivity due to its clearly defined molecular bands, enabling reliable analysis of test and control lines. Its main limitation the low quantum yield can be overcome by using plasmonically enhancing marker particles (SERS). A key challenge is to maximize scattered-light yield without causing thermal damage to the LFTs. This can be addressed by using a line focus instead of a point focus. Modern light guides with rectangular cross-sections act as integrated beam-shaping



◀ Raman-Sonde mit Rechteckstrahlprofil für den Anregungslaser. Raman probe with top-hat line focus for the excitation beam.



▲ Signalausbeute beim Abrastern mit Gauss- und Rechteck-Strahlprofil des Anregungslasers. Signal yield in raster scanning using Gaussian and rectangular excitation beam profiles.

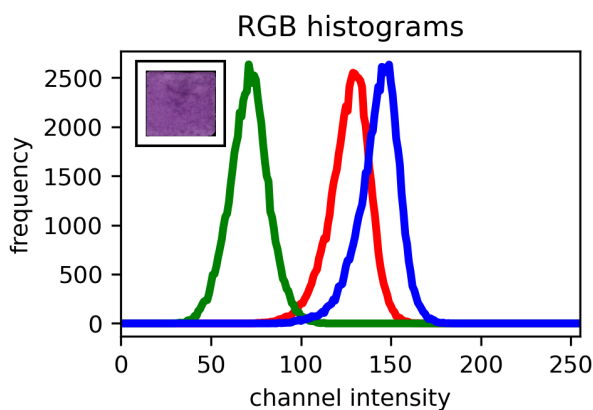
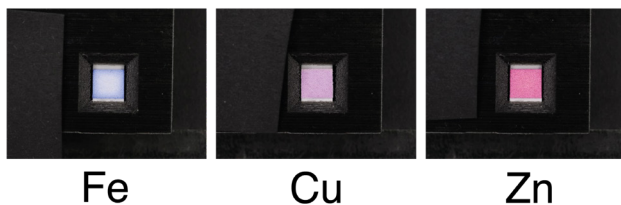
Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Moderne Lichtleiter mit rechteckigem Querschnitt wirken dabei als integrierte Strahlformungsoptiken: In Kombination mit einer Zylinderlinse entsteht ein homogener Top-Hat-Linienfokus, der Überhitzung vermeidet und die Raman-Sonde kaum verteuert. Ein weiteres Teilprojekt untersucht photometrische Methoden zur quantitativen Auswertung von Paper-based Analytical Devices (PADs). Die farbmetrische Reaktion auf Metallionen wie Eisen, Kupfer und Zink wird mittels digitaler Bildanalyse und maschinellem Lernen automatisiert ausgewertet und mit den Ionenkonzentrationen korreliert.

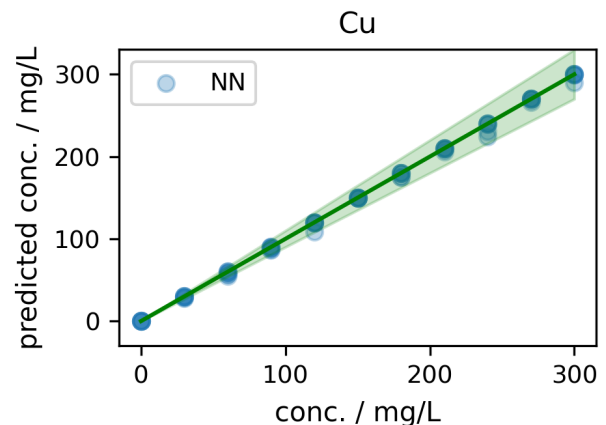
optics: combined with a cylindrical lens, they produce a homogeneous top-hat line focus that prevents over-heating and does not significantly increase the cost of the Raman probe. Another subproject investigates photometric methods for the quantitative evaluation of paper-based analytical devices (PADs). The colorimetric reactions to metal ions such as iron, copper, and zinc are analyzed using digital imaging and machine learning, allowing automated correlation with the respective ion concentrations.

PAD in cassette



▲ Aus Bildern eines PADs zum Nachweis von Kupferionen (s. Inset oben links) extrahierte Histogramme für den roten, grünen und blauen Farbkanal (RGB). Histograms extracted from images of a PAD for detecting copper ions (see inset top left) for the red, green, and blue color channels (RGB).

◀ Bild der PADs in der Kassette.
Image of the PADs inside the cassette.



▲ Mit den Histogrammen wurde ein neuronales Netz (NN) auf die Vorhersage der Metallionenkonzentration trainiert. Die Abbildung zeigt die Korrelation der vorhergesagten zur tatsächlich eingesetzten Konzentration basierend auf einer Kreuzvalidierung nach einer leave-one-out Methodik. Die eingezeichnete Linie symbolisiert eine perfekte Vorhersage, während der schattierte Bereich ein Fehlerintervall von 10% darstellt. A neural network (NN) was trained to predict metal ion concentrations using the histograms. The Figure shows the correlation between the predicted and actual concentrations based on cross-validation using a leave-one-out methodology. The solid line represents a perfect prediction, while the shaded area represents an error interval of 10%.

Photonische Sensorik

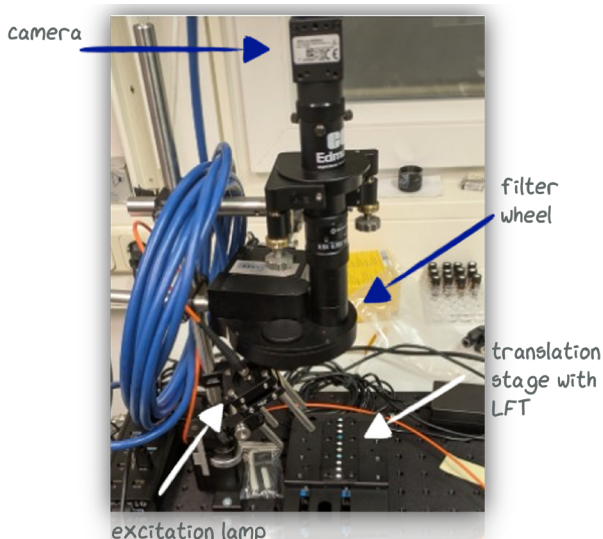
Photonic Sensor Technologies

Neuartige Ausleseverfahren für Lateral Flow Tests für den Einsatz in der Point-of-Care-Diagnostik

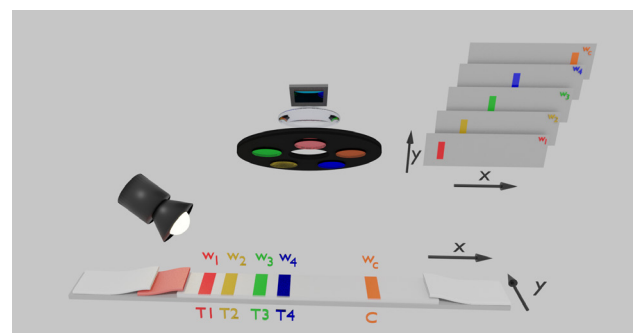
Schnelltests dienen als diagnostisches Werkzeug und ermöglichen eine zügige Einschätzung des Gesundheitszustandes. Ihre aktuelle Funktionsfähigkeit und Produktionskapazität lassen jedoch noch Verbesserungen zu. Das regionale Bündnis SNIPOCC - ein Zusammenschluss aus Industriepartnern und wissenschaftlichen Akteuren - verfolgt das Ziel, Göttingen und Südniedersachsen zu einem Hotspot für die Entwicklung diagnostischer Schnelltests zu machen. Dafür sollen bestehende Beschränkungen wie fehlende Quantifizierung, eingeschränkte Multiparameteranalyse und geringe Digitalisierung überwunden werden. Das IFNANO arbeitet in Kooperation mit der FiSens GmbH an einer innovativen, fluoreszenzspektroskopiebasierten Auslesemethode sowie an einer kostengünstigen, kompakten Auslese-einheit. Diese Auslese-einheit wertet Schnelltests sowohl qualitativ als auch quantitativ aus und stellt die Ergebnisse

New reading processes for lateral flow tests for their use in point-of-care diagnostics

Rapid tests serve as diagnostic tools, enabling a swift assessment of a person's health status. However, their current functionality and production capacity still allow for improvements. The regional alliance SNIPOCC, a consortium of industry partners and academic actors aim to transform Göttingen and South Lower Saxony into a hub for the development of diagnostic rapid tests. To achieve this, existing constraints such as the lack of quantification, limited multi-parameter analysis, and low digitization must be overcome. IFNANO, in cooperation with FiSens GmbH, is developing an innovative fluorescence-spectroscopy-based readout method and a cost-effective, compact readout unit. This unit evaluates rapid tests both qualitatively and quantitatively, delivering the results digitally. Particular emphasis has been placed on making the reader versatile so that a wide



▲ Kompakter Aufbau des multispektralen Fluoreszenz-readers zur Messung von Lateral Flow Tests.
Compact setup of the multispectral fluorescence reader for measuring lateral flow tests.



▲ Schematischer Aufbau des multispektralen Fluoreszenz-Readers.
Schematic setup of the multispectral fluorescence reader.

Photonische Sensorik

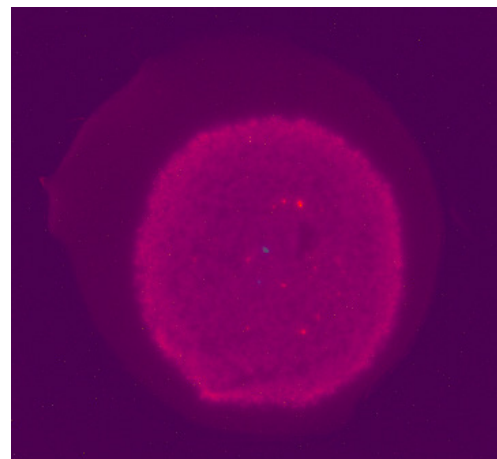
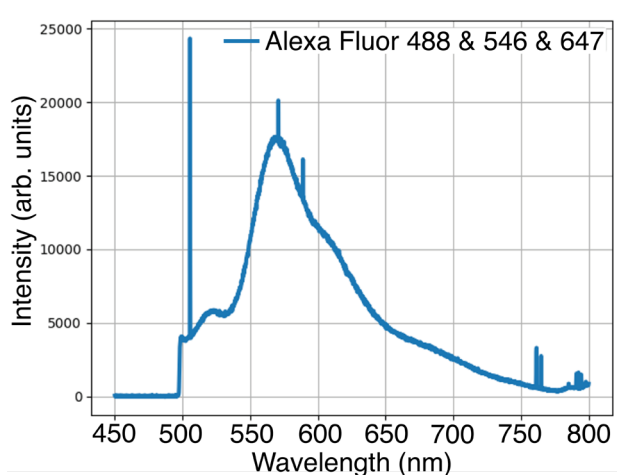
Photonic Sensor Technologies

digital bereit. Besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, den Reader vielseitig einsetzbar zu machen, sodass zahlreiche gängige Fluorophore gleichzeitig angeregt werden können.

Ein weiteres Ziel des Projektes, die Entwicklung eines hyperspektralen Ausleseverfahrens für Lateral-Flow-Tests (LFTs), ermöglicht echtes Multiplexing. Dadurch werden mehrere Analyte gleichzeitig messbar, was einen entscheidenden Fortschritt in der quantitativen Erkennung von multiplen Krankheitserregern darstellt.

Statt langer Wartezeiten auf Laborergebnisse könnten nun mehrere Krankheiten direkt vor Ort diagnostiziert werden. Ein Test, ein Besuch, ein Ergebnis. Das bedeutet schnellere Diagnose, gezielte Behandlung und gerettete Leben durch frühzeitiges Eingreifen.

range of common fluorophores can be excited simultaneously. Another goal of the project is the development of a hyperspectral readout method for lateral flow tests (LFTs), which enables true multiplexing. This allows multiple analytes to be measured at once, representing a decisive advance in the quantitative detection of multiple pathogens. Instead of long wait times for laboratory results, several diseases could now be diagnosed directly on-site: one test, one visit, one result. This translates into faster diagnosis, targeted treatment, and lives saved through early intervention.



▲ (links) Spektrale Antwort (Fluoreszenzemission) von drei gleichzeitig angeregten Fluorophoren. Man erkennt die spektralen Banden und den Überlappbereich. (rechts) Zwei Fluorophore verteilt auf einem LFT. Aufnahme ist aus den Einzelaufnahmen in den Fluoreszenzbändern zusammengesetzt. Man erkennt, dass beide Fluorophore gleichverteilt sind.

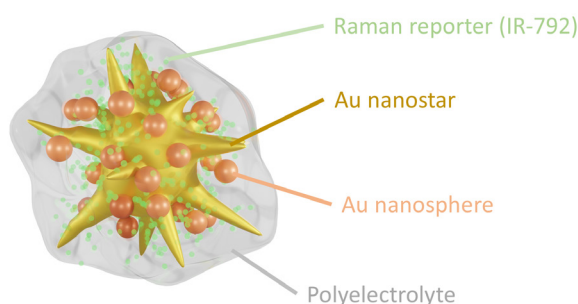
(left) Spectral response (fluorescence emission) of three fluorophores excited simultaneously. The spectral bands and their overlap region are visible. (right) Two fluorophores distributed on a lateral flow test (LFT). The image is composed of the individual acquisitions in the fluorescence bands. It can be seen that both fluorophores are uniformly distributed.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Gold-Nanostern-basierte Kern-Satelliten-Nanotags für oberflächenverstärkte Resonanz-Raman-Spektroskopie

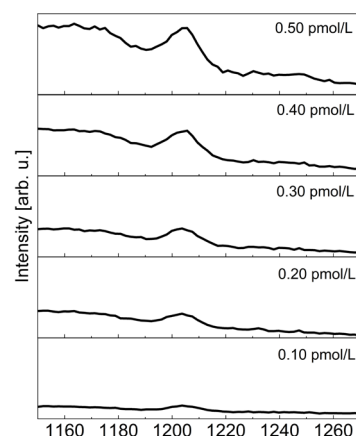
SERS-Nanotags gewinnen zunehmend an Bedeutung für biomedizinische Anwendungen, etwa im Multiplex- und Hochgeschwindigkeits-Bioimaging, bei intraoperativen Tumorerkennungen sowie in weiteren vielfältigen biosensorischen Verfahren. Diese Anwendungen erfordern kurze Integrationszeiten bei zugleich deutlich begrenzten Laserleistungsdichten, wie sie in medizinischen Umgebungen vorgeschrieben sind. Vor diesem Hintergrund ist eine hohe Signalstärke pro Nanotag entscheidend, da die Laserleistung nicht beliebig erhöht werden kann. Gleichzeitig ermöglicht ein stärkeres intrinsisches Raman-Signal geringere Dosierungen, wodurch die Zytotoxizität reduziert werden kann, während die diagnostische Leistung erhalten bleibt. In Kooperation mit der Universität Göttingen wurden unterschiedliche SERS-Tag-Systeme experimentell charakterisiert und hinsichtlich ihres Signalverstärkungsbeitrags durch satellitenartige Nanopartikel quantitativ untersucht.



▲ Schematische Darstellung einer mit dem Raman-Reportermolekül IR-792 beschichteten Core-Satellite-Nanostruktur eines SERS-Nanotags. Schematic illustration of a SERS nanotag core-satellite nanostructure coated with the Raman reporter molecule IR-792.

Gold Nanostar-Based Core-Satellite Nanotags for Surface-Enhanced Resonance Raman Spectroscopy

SERS nanotags are becoming increasingly important for biomedical applications, such as multiplexed and high-speed bioimaging, intraoperative tumor detection, and a wide range of other biosensing techniques. These applications require short integration times while operating under strictly limited laser power densities, as mandated in medical environments. Against this background, a high signal intensity per nanotag is crucial, since the laser power cannot be increased arbitrarily. At the same time, a stronger intrinsic Raman signal enables lower dosages, thereby reducing cytotoxicity while maintaining diagnostic performance. In collaboration with the University of Göttingen, different SERS tag systems were experimentally characterized and quantitatively investigated with respect to their signal enhancement contributions arising from satellite-like nanoparticles.



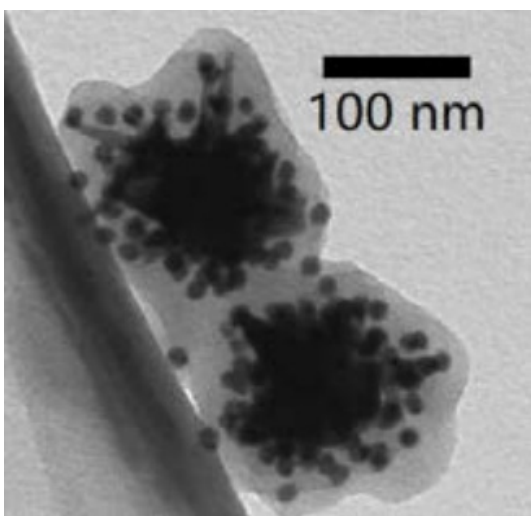
▲ Rohe SERS-Spektren des IR-792-Referenzsignals bei 1206 cm^{-1} aus einer Konzentrationsreihe des SERS-Nanotag-Systems. Raw SERS spectra of the IR-792 reference signal at 1206 cm^{-1} from a concentration series of the SERS nanotag system.

Photonische Sensorik

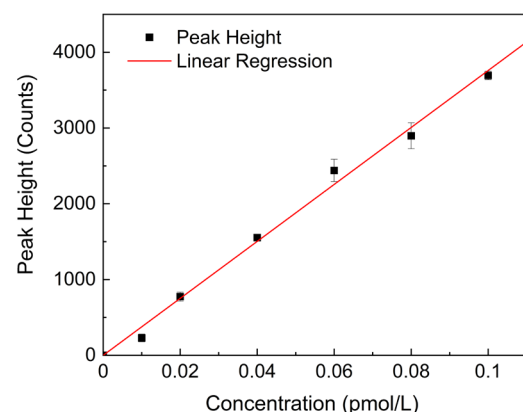
Photonic Sensor Technologies

Die systematischen Messungen bestätigten eine resonanzangepasste Anregung des Reporterfarbstoffs bei 785 nm und zeigten eine deutliche Signalverstärkung in den Spektren. Es zeigte sich, dass durch die Anpassung der PEG-Kettenlänge die Reporter-moleküle in die Hot Spots (Bereiche höchster Feldverstärkung) gelangen und damit enorme Verstärkungen erfahren. Durch die Normalisierung des Reporteranteils ließ sich der strukturelle Verstärkungseffekt der Satelliten-Nanopartikel isolieren. Die optimierte Kern-Satelliten-Struktur erreichte eine Nachweisgrenze von 10 fM bei einer Integrationszeit von 10 s und zeigte eine sehr gute quantitative Linearität. Im Rahmen der Kooperation wurde eine NIR-kompatible, auf Gold-Nanosternen basierende Kern-Satelliten-Plattform entwickelt, die aus nicht zytotoxischen Komponenten besteht und deren kompakte Nanostruktur eine nahezu einzelpartikelnahe SERS-Empfindlichkeit aufweist. Dies ist eine vielversprechende Grundlage für die zukünftige Entwicklung bioanalytischer Anwendungen zu erzeugen. Diese Lösung führte zu einem homogenen Ausgangsstrahl ohne zusätzliche optische Elemente und erwies sich als die effektivere Methode.

Systematic measurements confirmed resonance-matched excitation of the reporter dye at 785 nm and revealed a pronounced signal enhancement in the spectra. It was shown that by adjusting the PEG chain length, the reporter molecules are positioned within the hot spots (regions of highest field enhancement), thereby experiencing enormous signal enhancements. By normalizing the reporter content, the structural enhancement effect of the satellite nanoparticles could be isolated. The optimized core-satellite structure achieved a limit of detection of 10 fM at an integration time of 10 s and exhibited very good quantitative linearity. Within the scope of the collaboration, a NIR-compatible core-satellite platform based on gold nanostars was developed, consisting of non-cytotoxic components and featuring a compact nanostructure with near single-particle-level SERS sensitivity. This represents a promising foundation for the future development of bioanalytical applications.



▲
TEM-Aufnahme einer farbstoffbeschichteten Core-Satellite-Nanostruktur.
TEM image of a dye-coated coresatellite nanostructure.



▲
Bestimmung der experimentellen Nachweisgrenze (LOD) des SERS-Nanotag-Systems. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an, und die durchgezogene Linie stellt eine fehlergewichtete lineare Regression dar.
Determination of the experimental Limit of Detection for the SERS nanotag system. Error bars indicate standard deviation, and the solid line represents an error-weighted linear regression.

Photonische Sensorik

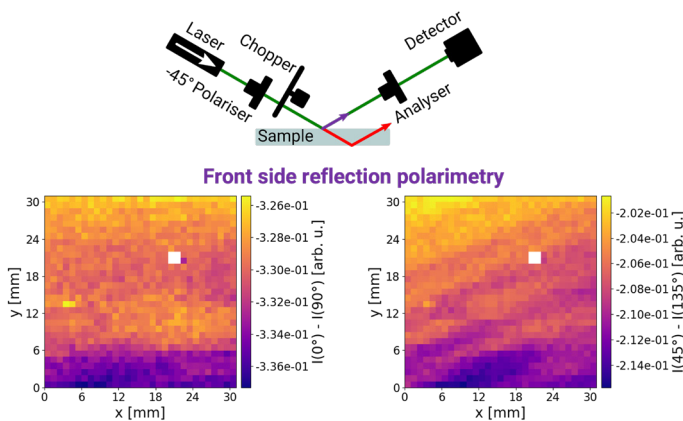
Photonic Sensor Technologies

Schnelle optische Messung der Glasspannung in drei Dimensionen

Glas ist als Werkstoff in zahlreichen Anwendungsbereichen unverzichtbar. Insbesondere neue Entwicklungen in umweltrelevanten Bereichen führen zu stetig steigenden Anforderungen an die Eigenschaften und die Qualität von Glas. So bedingen beispielsweise moderne Windschutzscheiben sehr enge Toleranzen bei Zielparametern wie dem Spannungshaushalt des Glases. Für industrielle Fertigungsprozesse ist es daher von entscheidender Bedeutung, Glasspannungen bereits innerhalb der Produktionskette präzise zu erfassen. Auf diese Weise kann ressourcenschonender gearbeitet werden, indem Glasbruch vermieden und Fehlproduktionen frühzeitig erkannt und unterbunden werden. Der Stand der Technik bislang verfügbarer Messsysteme weist jedoch Defizite hinsichtlich Praktikabilität, Bedienbarkeit und Messgenauigkeit auf, insbesondere im Kontext automatisierter Spannungsmessungen. Vor diesem Hintergrund schlossen sich die Projektpartner Schmidt & Haensch, Saint-Gobain Sekurit und Volkswagen zu einem Verbund zusammen. Ziel des Projekts war die Entwicklung einer nicht-invasiven, optischen Methode zur Messung von Eigenspannungen in Fahrzeugverglasungen.

Fast optical measurement of the glass tension in three dimensions

Glass is an indispensable material in a wide range of application areas. In particular, new developments in environmentally relevant fields are leading to continuously increasing demands on the properties and quality of glass. For example, modern windshields require very tight tolerances for target parameters such as the stress state of the glass. For industrial manufacturing processes, it is therefore crucial to precisely determine glass stresses already within the production chain. In this way, resources can be used more efficiently by preventing glass breakage and by detecting and avoiding defective production at an early stage. However, the current state of the art of available measurement systems shows deficiencies in terms of practicality, ease of use, and measurement accuracy, especially with regard to automated stress measurements. Against this background, the project partners Schmidt & Haensch, Saint-Gobain Sekurit, and Volkswagen formed a consortium. The goal of the project was the development of a non-invasive optical method for measuring residual stresses in automotive glazing.



(oben) Prinzipskizze der Messung an einer Oberfläche.
 (unten) Messung der Oberflächenspannung an einer Seitenscheibe.
 (top) Schematic illustration of the measurement at a surface.
 (bottom) Measurement of the surface stress on a side window.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Die im Rahmen des Projekts entwickelte Messmethode arbeitet kontaktlos und ist für den automatisierten In-line-Einsatz ausgelegt, um den Spannungshaushalt von Glasscheiben während der Fertigung zu bestimmen. Dabei wird ausgenutzt, dass mechanische Spannungen im Glas die Polarisation eines eingestrahlichten Lichtstrahls verändern. Durch eine präzise Analyse der Polarisationsänderung lassen sich somit Rückschlüsse auf die vorliegenden Spannungen ziehen. Die kontaktlose Rasterung der Scheiben erfolgt mithilfe eines Roboterarms, der eine flexible und reproduzierbare Messführung ermöglicht.

The measurement method developed within the project operates in a contactless manner and is designed for automated in-line use to determine the stress state of glass panes during manufacturing. It exploits the fact that mechanical stresses in the glass alter the polarization of an incident light beam. By precisely analyzing these polarization changes, conclusions about the existing stress state can be drawn. Contactless scanning of the panes is carried out using a robotic arm, enabling flexible and reproducible measurement trajectories.



- ◀ Aufbau des Polarimeters und der Ausrichtungsausrüstung auf dem Roboterarm vor einem Einscheibensicherheitsglas. Setup of the polarimeter and alignment apparatus on the robot arm in front of a safety glass.



Projekte

Projects

Projekt Biolumineszenz-Imaging:

Bioluminescence imaging of neurons and cardiomyocytes,
gefördert von der DFG (Exzellenzcluster 2067 Multiscale Bioimaging)

Projekt EdoLoB:

Entwicklung von Doppelpuls-LIBS für on-line Bergbauanwendungen,
gefördert vom BMW im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand

Projekt FASTEST:

Schnelle STED-Scanning-Technologie durch Array-Detektion: Experimenteller Nachweis und optische Umsetzung,
gefördert vom BMWK (ZIM)

Projekt FEL Focus:

Automatisierte Justage von FEL-Fokussieroptiken mit Hilfe von machine-learning-Algorithmen,
gefördert vom BMBF

Projekt FLAG-Marking:

Verfahrensrealisierung zur schnellen großflächigen diffraktiven Glasoberflächenmarkierung,
gefördert vom BMW (ZIM)

Projekt GFM:

Optimierung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes durch Implementierung eines digitalen Gefahrstoffmanagements,
gefördert vom MWK

Projekt GlassPrint:

Digitaler 3D Laserdruck von festem Glas,
gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

Projekt KOPAS:

Kompakte laser-produzierte Plasmaquelle zur hochauflösenden Spektroskopie im weichen und mittleren Röntgenbereich mittels Flachstrahl Probenzuführung,
gefördert vom BMBF

Projekt Laser-RedFrettCorr:

Inline-Verfahren zur Reduzierung der Anfälligkeit von Steckverbindern gegenüber Reibkorrosion durch lokale Laserstrukturierung der funktionsrelevanten Bereiche,
gefördert vom BMWK (ZIM)

Projekt LabaKom:

Laserbasierte Spannungskompensation bei Glassubstraten in der Dünnschichttechnologie,
gefördert vom BMWK (IGF)

Projekt LipidStar - Superresolution-Technologie:

Freistehende Lipidmembranen für Anwendungen in Superresolution-Tracking und -Mikroskopie,
gefördert von der EU (EFRE/Niedersachsen)

Projekt NanoVIB:

Nanoscale Visualization to understand bacterial virulence and invasiveness - based on fluorescence nanoscopy and vibrational microscopy,
gefördert von der EU (H2020-ICT-36-2020 Disruptive photonics technologies)

Projekte

Projects

Projekt NanoVidere II:

Schnelle monochromatische Reflexionsnanoskopie mittels Absorptionsmodulation, gefördert von der DFG

Projekt NanoPhotonik:

Stärkung des Innovations- und Wirtschaftsstandorts Niedersachsen, gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur

Projekt NEXAFS:

Laboratory-scale NEXAFS spectroscopy for the investigation of Fe oxides and organic matter in soil, gefördert von der DFG

Projekt PhotoPlasma:

Kombination photonisch induzierter Verfahren mit plasmabasierten Techniken zur nachhaltigen Inaktivierung von Mikroorganismen auf Schüttgütern in der Agrarwirtschaft, gefördert durch das Netzwerk EIP Agrar & Innovation Niedersachsen zusammen mit dem Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Projekt 5D-FiBEr:

5-dimensionale Biolumineszenzmessung in Gewebemodellen, gefördert vom BMWK (ZIM)

Projekt Rubin SNIPOCC:

Südniedersachsen Point of Care Cluster, Erfassung des Endwicklungsbedarfs und Konzeption von Projektideen für innovative Schnelltests,

Verbundprojekt 1: AnaPOC:

Steigerung der Sensitivität und Erweiterung des Analytportfolios von POC-Tests

Verbundprojekt 2: qDigiPOC:

Entwicklung eines fluoreszenzbasierten Schnelltest-Komplettsystems zur quantitativen und digitalisierten Analyse von POC-Tests,

gefördert vom BMWi im Rahmen der Fördermaßnahme: Innovation & Strukturwandel des BMBF

Projekt ultra-nanoSCALE:

Bildfeld- und tiefenabhängige PSF-Modelle für die Analyse von SMLM-Daten, gefördert vom BMWK (ZIM)

Projekt μ HI-Light - HERO:

Entwicklung von Laser-Schreibsystem und Auslesegerät für hyperdimensional verschlüsselte Mikromarkierungen, Mikromarkierungen, gefördert vom BMWK (ZIM)

Publikationen

Publications

A. Kiszka, C. Dullin, H. Steffens, T. Koenen, E. Rothermel, F. Alves, C. Gregor:

Autonomous bioluminescence emission from transgenic mice, *Science Advances* 11(28), eads0463 (2025),

<https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0463>

C. V. Srambickal, H. M. Esmaeeli, J. Piguet, L. Reinkensmeier, R. Siegmund, A. Agostinho, M. Bates, A. Egner, J. Widengren:

Near-infrared MINFLUX imaging enabled by suppression of fluorophore blinking, *Science Advances* 11(49), eadw3149 (2025),

<https://doi.org/10.1126/sciadv.adw3149>

L. Reinkensmeier, R. Siegmund, M. Bates, G. Stibenz, P. Trabs, S. Popien, I. Rimke, S. Heuke, A. Egner:

Novel Laser Technology Enables 10x Faster SRS Imaging and Rapid Tuning in Biological Samples, *bioRxiv* (2025),

<https://doi.org/10.1101/2025.01.31.635524>

J. I. Gallea, O. Nevskiy, Z. Kaźmierczak, I. Gligonov, T. Chen, P. Miernikiewicz, A. M. Chizhik,

L. Reinkensmeier, K. Dąbrowska, M. Bates, J. Enderlein:

Super-Resolution Goes Viral: T4 Virus Particles as Versatile 3D-Bio-NanoRulers, *Advanced Materials* 37(12), 2403365 (2025),

<https://doi.org/10.1002/adma.202403365>

R. Meyer, U. Unkelbach, P. Jain, U. Rölleke, N. Schwarz, A. Perez-Tirado, A. V. Schepers, C. Geisler, A. Janshoff, S. Köster:

The Keratin Cortex Stabilizes Cells at High Strains, *bioRxiv* (2025),

<https://doi.org/10.1101/2025.02.24.639846>

R. Meyer, U. Unkelbach, P. Jain, U. Rölleke, N. Schwarz, A. Perez-Tirado, A. V. Schepers, C. Geisler, A. Janshoff, S. Köster:

The Keratin Cortex Stabilizes Cells at High Strains, *bioRxiv* (2025),

<https://doi.org/10.1101/2025.02.24.639846>

E. Rosten, D. Stedman, L.-Y. Chu, K. Wickramanayake, G. Littlejohn, K. Baxter, G. McConnell, S. Culley, Q. Ch'ng, C. Leterrier, M. Bates, I. M. Molodtsov, S. Cox:

Extracting biological structure and heterogeneity from the nano to the macro scale, *bioRxiv* (2025),

<https://doi.org/10.1101/2025.08.06.668903>

F. B. Müller, G. Ctistis:

Quantifying stress states of theoretically modeled polarimetric measurements on dielectric media, *Phys. Rev. Applied* 24, 034035 (2025),

<https://doi.org/10.1103/rh94-jdw2>

G. Marowsky, F. Wieduwilt, J. Holburg, L. Lakemann, S. Figul:

Innovative liquid flat-jet system for microfluidic applications in vacuum, *Proc. of SPIE* 13312, 1331202 (2025),

<https://doi.org/10.1117/12.3043755>

F. Wieduwilt, J. Geweke, F. Merker-Müller, H. Linxweiler, R. M. Heeb, G. Ctistis, H. Wackerbarth:

Enhancing safety for infusion treatment in oncology through a data-driven multisensory approach based on optical methods, *Proc. SPIE* 13316, 1331609 (2025),

<https://doi.org/10.1117/12.3043812>

Publikationen

Publications

J. Holburg, S. Figul, A. Charvat, H. Bluhm, B. Abel, G. Marowsky, D.-D. Mai, K. Mann:

Soft X-ray Absorption Spectroscopy with a Flat Liquid Jet in Vacuum Using a Table-Top Laser-Induced Plasma Source, *X-Ray Spectrometry*, (2025), <https://doi.org/10.1002/xrs.3474>

L. J. Richter, U. Ross, M. Seibt, J. Ihlemann:

Transmission electron microscopy analysis of UV laser implanted gold nanoparticles and their influence on photoluminescence enhancement from silicon nanocrystals
Discover Nano 20, 82 (2025), <https://doi.org/10.1186/s11671-025-04263-1>

N. Bakhtiari, L. J. Richter, J. Ihlemann:

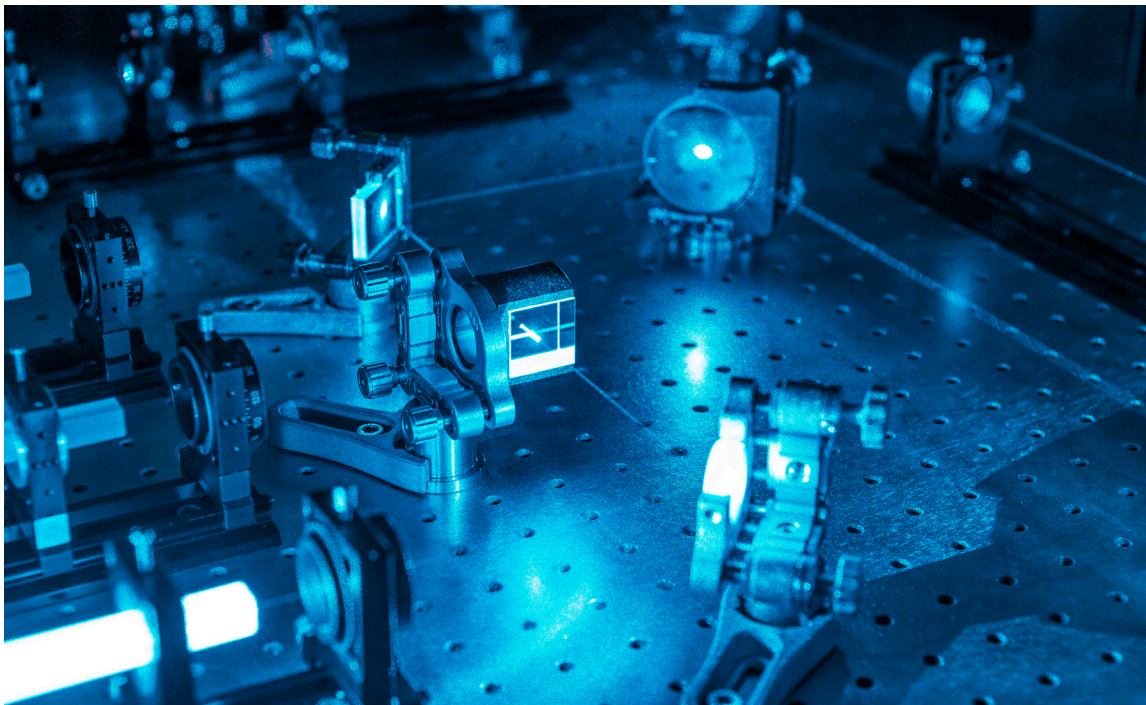
Laser patterning of glass films for the fabrication of binary silicate glass optics
Applied Physics A 131, 843 (2025), <https://doi.org/10.1007/s00339-025-08990-1>

A. Röben, J. Ihlemann:

Generation of anisotropic stress in borosilicate glass by excimer laser irradiation
Optics Express 33, 49284 (2025), <https://doi.org/10.1364/OE.576307>

H. M. Wrigge, T. Held, P. D. Ndione, T. Nagy, B. Rethfeld, P. Simon:

Apparatus for broadband, time-resolved measurements of laser-induced reflectivity transients with sub-10 fs resolution
Optics & Laser Technology, (2025), <https://doi.org/10.1364/OE.576307>



Konferenzbeiträge

Conference contributions

**F. Wieduwilt, J. Geweke, F. Merker-Müller,
H. Linxweiler, R. M. Heeb, G. Ctistis,
H. Wackerbarth:**

Enhancing safety for infusion treatment in oncology through a data-driven multisensory approach based on optical methods, Optical Diagnostics and Sensing XXV: Toward Point-of-Care Diagnostics, SPIE Photonics West, San Francisco, USA (01.2025)

A. Röben, J. Ihlemann:

Anisotropic stress generation in borosilicate glass by nanosecond excimer laser irradiation for figure correction Photonics West, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIX, San Francisco, USA (01.2025)

**G. Marowsky, F. Wieduwilt, J. Holburg,
L. Lakemann, S. Figul:**

Innovative liquid flat-jet system for microfluidic applications in vacuum", SPIE Photonics West 2025, San Francisco, USA (01.2025)

C. Lenth, S. Pagel-Wieder, H. Wackerbarth:

Multiplex Tests in POC Analysis: A Combination of Lateral Flow Assay and Paper-Based Color Change Test for the Assessment of Inflammatory Processes in Cows, ANAKON, Leipzig (03.2025)

N. Bakhtiari, J. Ihlemann:

SiO_x-Based Printing of Glass Components via Laser-Induced Forward Transfer for High-Precision Optical Applications
CINSaT Spring Colloquium, Friedrichroda (03.2025)

**V. Reimer, G. Ctistis, K. Fedorov, D. Theodoridis,
P. Guehlke, C. Waltermann, J. Koch, W. Schippers:**
Fiber Optical Point-of-Care Fluorescence Reader, European Conference on Biomedical Optics, Munich (06.2025)

N. Ayiben, R. Siegmund, A. Egner:

Background Noise and PSF Characterization for high reflecting sample in PS-SS-OCT Using the Movement of Mirror on Reference Arm, European Conference on Biomedical Optics 2025, München (06.2025)

**I. Rimke, L. Reinkensmeier, R. Siegmund,
G. Stibenz, P. Trabs, S. Popien, C. Canela,
X. Gao, W. Min, A. Egner:**

Fast and ultrasensitive multispectral SRS imaging with new light source, European Conference on Biomedical Optics 2025, München (06.2025)

**J. Zhang, P. Jain, C. Geisler, S. Nagorny,
T. Weingartz, A. Eitzeroth, A. Egner, C. Rembe:**

1D Line-Scan Imaging of Gold Nanoparticles beyond Diffraction Limit with White Light via Absorbance Modulation Nanoscopy, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XIV, part of SPIE Optical Metrology, München (06.2025)

**F. Wieduwilt, J. Geweke, F. Merker-Müller,
G. Ctistis, H. Wackerbarth:**

Identification of Critical Care Medications: Optical Approaches, Raman Fest, Frankfurt (07.2025)

**H. Wackerbarth, Q. Song, Y. Cai, F. Wieduwilt,
P. Vana:**

Gold Nanostars – Satellite Nanolabels for Surface-Enhanced Raman Spectroscopy, Raman-Fest, Frankfurt (07.2025)

F. Müller, H. Wackerbarth, G. Ctistis:

Quantifiable surface stress evaluation of dielectric materials, e.g. glass, using contactless reflection polarimetry, SPIE optics and Photonics, San Diego, USA (08.2025)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

C. Lenth, A. Schumann, F. Ude, H. Wackerbarth:
A Field-Deployable GC-IMS Method for the On-Site Detection of Sulfur Mustard and Its Degradation Products in Marine Sediments, 34th International Conference on Ion Mobility Spectrometry, Berlin (08.2025)

P. Schröder, H. Wackerbarth, G. Ctistis:
Hyperspectral Fluorescence Reader for Lateral Flow Tests, SPIE Optics and Photonics, San Diego, USA (08.2025)

P. Schröder, H. Wackerbarth, G. Ctistis:
Hyperspectral Fluorescence Reader for Lateral Flow Tests, SPIE Optics and Photonics, San Diego, USA (08.2025)

J. Geweke:
Photonische Verfahren für Point-of-Care-Anwendungen, 11. Partnerschafts-symposium „Plasma for Life“, Göttingen (09.2025)

A. Egner:
Pushing the Limits: Innovations in Super-Resolution Fluorescence Microscopy, Göttingen Expansion Microscopy Forum 2025, Göttingen (09.2025)

G. Marowsky, F. Wieduwilt, J. Holburg, L. Lakemann, S. Figul:
Innovative liquid flat-jet system for microfluidic applications in vacuum, SPIE Photonics West, Proceedings Volume 13312, Microfluidics, BioMEMS, and Medical Microsystems XXIII; 1331202, San Francisco, USA, (09.2025)

M. Bates, L. Reinkensmeier:
Optimal drift correction of SMLM image data with COMET (Workshop), MIFOBIO Functional Microscopy For Biology, Seignosse, Frankreich (10.2025)

H. Wackerbarth:
Photonische Sensorik für die Industrie, Umweltschutz und Medizin, ISFH Colloquium, Hameln (11.2025)

A. Röben, J. Meinertz, J. Ihlemann:
Laserbasierte Spannungskompensation bei Glassubstraten in der Dünnschichttechnologie F.O.M-Konferenz "Stärkung der Innovationskraft zwischen Grundlagenforschung und Prototypentwicklung" (11.2025)

J. Meinertz, J. Ihlemann:
Materialbearbeitung von Glas mittels UV-Lasern: Schicht- und Oberflächenstrukturierung Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) (11.2025)

Abschlussarbeiten

Final Thesis

Theresa Brinker

Bacterial Bioluminescence System for Live-Cell Imaging in Mammalian Cells

Dissertation

Georg-August-Universität Göttingen (05.2025)

Hendrik Wrigge

Development and Characterization of a Pump-Probe Setup for Broadband Time-Resolved Reflectivity Measurements with Sub-10 Femtosecond Resolution

Dissertation

Georg-August-Universität Göttingen (05.2025)

Felix B. Müller

Quantification procedure of surface stress states and its application for measurements on glass using a reflection polarimeter

Dissertation

Georg-August Universität Göttingen (06.2025)

Lenny Reinkensmeier

Advanced Imaging for Minflux Nanoscopy

Dissertation

Georg-August-Universität Göttingen (07.2025)

Andreas Röben

Elastic deformation of thin glass by excimer-laser-induced stress modification

Dissertation

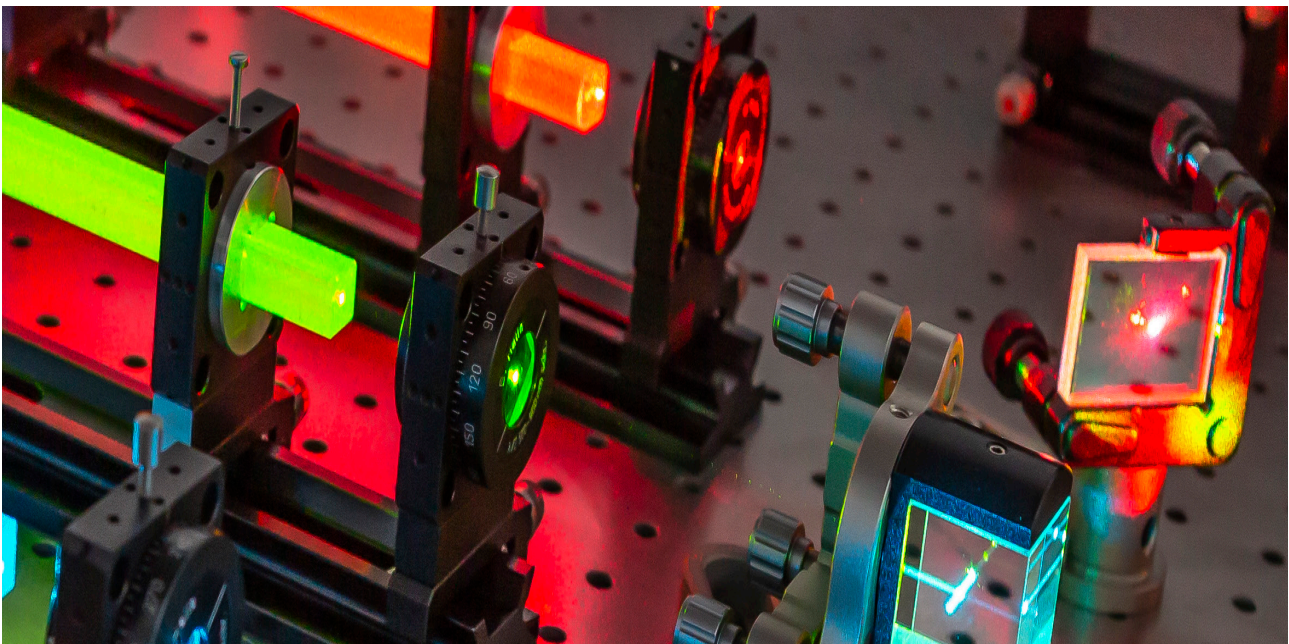
Georg-August-Universität Göttingen (07.2025)

Ayiben Nuerbahati

Swept-source Polarization Sensitive Optical Coherence Tomography for Depth-selective Measurement of Stress Distribution in Automotive Glass Samples

Dissertation

Georg-August-Universität Göttingen (12.2025)



Ausgewählte Kooperationspartner Selected Cooperation Partners

INTERNATIONAL



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
Ben-Gurion University
of the Negev

NATIONAL



LOKAL



Ausgewählte Kooperationspartner

Selected Cooperation Partners

JAHRESRÜCKBLICK 2025

DIE ZUSE-GEMEINSCHAFT – unsere bundesweite Stimme der wirtschaftsnahen Forschung

Unser Institut gehört zu den rund achtzig Mitgliedern der Zuse-Gemeinschaft – einem branchenübergreifenden, technologieoffenen Forschungsverbund und verlässlichen Transferpartner für den Mittelstand.

2025 stand ganz im Zeichen der Bundestagswahl und des 10-jährigen Bestehens der Zuse-Gemeinschaft. Innovationspolitisch setzte der Koalitionsvertrag wichtige Signale: Das klare Bekenntnis zur innovations- und transferorientierten Industrieforschung sowie die Verankerung der Programme ZIM, IGF und INNO-KOM wurden ausdrücklich begrüßt. Zugleich bleibt die Forderung nach einer auskömmlichen Finanzierung von mindestens einer Milliarde Euro jährlich sowie einem dynamischen Mittelaufwuchs bestehen.

Ein starkes Zeichen der Vernetzung setzte das Strategietreffen am Laser Zentrum Hannover e.V.. Gemeinsam mit den Landesforschungsgemeinschaften – darunter Forschungs- und Technologieverbund Thüringen e.V., innBW - Innovationsallianz Baden-Württemberg, JRF - Johannes-Rau-Forschungsgemeinschaft und Sächsische Industrieforschungsgemeinschaft (SIG) – wurden strategische Fragen intensiv diskutiert: von der Rolle der Forschungsgemeinschaften im Kontext der DAFG über einheitliche Regelungen für bundesgeförderte Projekte bis hin zu einem diskriminierungsfreien Zugang zu Bundesmitteln.

Auch im Innovationsrat wurden neue Akzente gesetzt. Bei der Sitzung bei der SLV Halle GmbH standen Einblicke in die Praxis und die Weiterent-

wicklung strategischer Themen im Mittelpunkt. Mit Benjamin Redlingshöfer als neuem Vorsitzenden und Jörg Nitzsche als stellvertretendem Vorsitzenden übernimmt eine neue Spitze Verantwortung für die kommenden Jahre.

Ein besonderer Höhepunkt war die Feier des 10-jährigen Jubiläums in der Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Der Festakt bot einen würdigen Rahmen, um auf eine Dekade erfolgreicher transferorientierter Forschung zurückzublicken und zugleich den Blick nach vorn zu richten. In seiner Festrede skizzierte Präsident Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian die Entwicklung der Zuse-Gemeinschaft zu einer starken Stimme der praxisnahen Industrieforschung.

In ihren Keynotes würdigten die Parlamentarischen Staatssekretäre Matthias Hauer und Gitta Connemann MdB die Rolle der Zuse-Gemeinschaft im Innovationssystem. Besonders prägnant war die Einordnung, die Zuse-Gemeinschaft habe sich als „dritte Säule“ der deutschen Forschungslandschaft etabliert – weil ihre Forschung für den Mittelstand unverzichtbar sei und dort wirke, wo sie konkret gebraucht werde.

Zehn Jahre nach ihrer Gründung ist die Zuse-Gemeinschaft fest in der deutschen Forschungslandschaft verankert. 2025 hat gezeigt: Transferorientierte Industrieforschung bleibt ein zentraler Baustein für Wettbewerbsfähigkeit, regionale Wertschöpfung und Innovationsdynamik im Mittelstand – heute mehr denn je.

Weitere Informationen finden Sie unter:
www.zuse-gemeinschaft.de

Ausgewählte Kooperationspartner

Selected Cooperation Partners



ZUSE-GEMEINSCHAFT
FORSCHUNG, DIE ANKOMMT.



Festakt 10 Jahre Zuse-Gemeinschaft in der Berlin-Brandenburgischen Akademie (oben) | Parlamentarischer Staatssekretär des BMFTR Matthias Hauer bei seinem Impuls (mitte links) | Parlamentarische Staatssekretärin des BMWi Gitta Connemann und Prof. Martin Bastian, Präsident der Zuse-Gemeinschaft (mitte rechts) | Die Preisträgerinnen und Preisträger des Zuse-Nachwuchsforscherpreis Marie Mahnkopf, Franziska Trodtfeld und Luis Wachter mit Prof. Martin Bastian und Prof. Holger Schlingloff (unten)
© David Ausserhofer

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Laser World of Photonics 2025

Die Weltleitmesse der Laser- und Photonikindustrie fand vom 27. bis 30. Juni 2023 in München statt. Unser Institut präsentierte dort eine Reihe innovative Technologien und Anwendungen im Bereich der Laser- und Photonikforschung:

Eines unserer Ausstellungsstücke betraf die Herstellung holografischer Strukturen auf Glas. Mit einem eigens entwickelten Verfahren können wir auf Glasoberflächen beugende Strukturen erzeugen, die Licht in seine Spektralfarben zerlegen. Diese Strukturen können als Sicherheitsmerkmale für Werkstücke dienen, sowie zur Speicherung von Informationen wie QR-Codes oder zu dekorativen Zwecken genutzt werden.

Zudem stellten wir eine gestreckte, flexible Hohl-faser vor, die zur Kompression ultrakurzer Laserpulse dient. Durch die skalierbare Länge der Faser können wir große Kompressionsfaktoren erreichen. Zudem ermöglicht ein spezielles Kühl- und Schutzkonzept den Betrieb auch bei extrem hohen Pulsleistungen.

Laser World of Photonics 2025

The world's leading trade fair for the laser and photonics industry took place from June 27th to 30th, 2023, in Munich. At this trade fair, our institute showcased various innovative technologies and applications in the field of laser and photonics research:

One of our exhibits involved the production of holographic structures on glass. With a specially developed technique, we can create diffractive structures on glass surfaces that disperse light into its spectral colors. These structures can be used as security features for workpieces, as well as for information storage (such as QR codes) or for decorative purposes.

Furthermore, we presented a stretched, flexible hollow fiber that allows the compression of ultra-short laser pulses. The scalable length of the fiber enables us to achieve significant compression factors. Additionally, a special cooling and protection concept enables operation even at extremely high pulse powers.



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Weiterhin zeigten wir eine von uns entwickelte Laborplasmaquelle, die weiche Röntgen- und Extrem Ultraviolette (EUV) Strahlung erzeugt. Diese Quelle findet Anwendung in der Optikcharakterisierung mittels Reflektometrie sowie in der chemischen Analytik mittels Absorptionsspektroskopie. In der Röntgenmikroskopie ermöglicht sie Auflösungen im Nanometerbereich. Zudem können wir mit geeigneten Optiken die Strahlung fokussieren und Stabilitäts- und Zerstörschwellmessungen an EUV-optischen Materialien und Sensoren im Zusammenhang mit der zukünftigen Halbleiterlithographie-Wellenlänge von 13,5 Nanometer durchführen. Mit dem Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor des IFNANO können wir Laserstrahlen in Echtzeit Analysieren und deren Ausbreitungsverhalten prognostizieren. Schließlich präsentierten wir in München das STED-Prinzip, mit dem mikroskopische Aufnahmen mit einer Auflösung von nur wenigen zehn Nanometern im sichtbaren Spektralbereich erstellt werden können. Die Detailschärfe dieser Bilder ist bis zu zehnmal höher als bei der klassischen Fluoreszenzmikroskopie. Dadurch ist es möglich, molekulare Prozesse in lebenden Zellen zu untersuchen.

We also displayed a laboratory plasma source developed by us, which generates soft X-ray and extreme ultraviolet (EUV) radiation. This source can be used for optical characterization through reflectometry and chemical analysis via absorption spectroscopy. In X-ray microscopy, it enables resolutions in the nanometer range. Furthermore, with suitable optics, we can focus the radiation and perform stability and damage threshold measurements on EUV optical materials and sensors for future semiconductor lithography wavelength of 13.5 nanometers. Using the IFNANO's Hartmann-Shack wavefront sensor, we can analyze laser beams in real-time and predict their propagation.

Finally, we presented the STED principle in Munich. It allows the creation of microscopic images with a resolution of just a few tens of nanometers in the visible spectral range. The level of detail in these images is up to ten times higher than that in classical fluorescence microscopy, thus enabling the study of molecular processes in living cells.



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Besuch einer chinesischen Delegation am IFNANO

Am 30. April 2025 begrüßte das Institut für Nanophotonik Göttingen (IFNANO) eine Delegation von Guangzhou Yipengke Technology Co., Ltd. Zu Gast waren Herr Qixun Wei und Herr Xinmin Lu, die sich über neueste Entwicklungen in der photonischen Detektion, insbesondere für den Einsatz in Schnelltests und Dienstleistungen, informierten.

Dr. Wackerbarth und PD Dr. Frank Gessler stellten die Forschungsarbeiten und neuen Technologien vor. Im Anschluss erhielten die Gäste bei einer Laborführung einen praktischen Einblick in die innovativen Technologien des IFNANO.

Visit of a Chinese Delegation at IFNANO

On April 30, 2025, the Institute for Nanophotonics Göttingen (IFNANO) welcomed a delegation from Guangzhou Yipengke Technology Co., Ltd. The guests, Mr. Qixun Wei and Mr. Xinmin Lu, were interested in learning about the latest developments in photonic detection, particularly for use in rapid testing and related services.

Dr. Wackerbarth and PD Dr. Frank Gessler presented their research activities and new technologies. This was followed by a guided tour of the laboratories, where the visitors gained practical insights into IFNANO's innovative technologies.

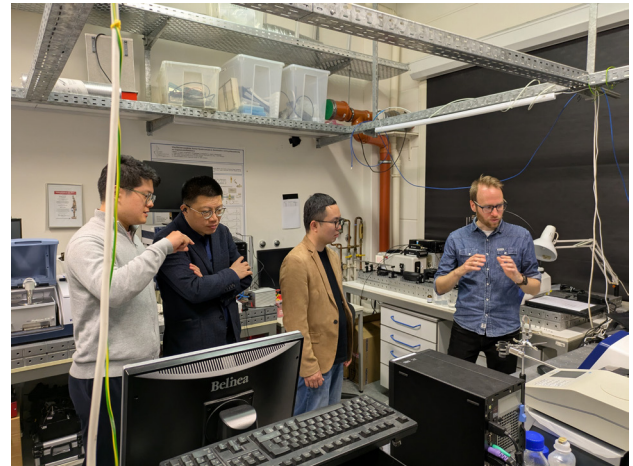
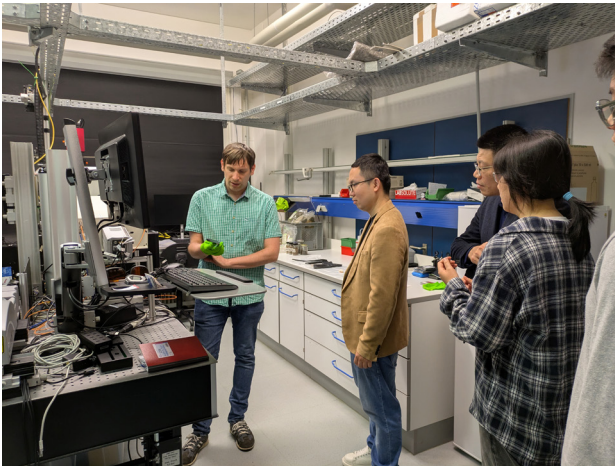


Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Das Treffen fand im Rahmen des Südniedersächsischen Point-of-Care Clusters statt und diente nicht nur dem fachlichen Austausch, sondern auch der Anbahnung von Kooperationen im Bereich photonic Schnelltest- und Detektionstechnologien. Beide Seiten zeigten Interesse an einer engeren Zusammenarbeit, um gemeinsam neue Anwendungen und Dienstleistungen zu entwickeln.

The meeting took place the South Lower Saxony Point-of-Care Cluster and served not only for professional exchange but also to initiate potential collaborations in the field of photonic rapid testing and detection technologies. Both sides expressed interest in closer cooperation to jointly develop new applications and services.



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

SNiPoCC-Abschlussstagung 2025

Südniedersachsen setzt neue Maßstäbe in der Schnelltest-Diagnostik

Göttingen, 26.08.2025 - Mit einer hochkarätig besuchten Abschlussstagung am Institut für Nanophotonik Göttingen (IFNANO) ist am Dienstag das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt geförderte Projekt „Südniedersachsen Point-of-Care-Cluster“ (SNiPoCC) erfolgreich zu Ende gegangen. Drei Jahre lang arbeitete ein regionales Bündnis aus Wissenschaft und Wirtschaft daran, innovative, hochsensitive und nachhaltige Schnelltestverfahren zu entwickeln, die bestehende Diagnostiklösungen in Funktionalität und Leistungsfähigkeit deutlich übertreffen. Anwendungsfelder reichen von der Human- und Veterinärmedizin über die Forensik bis hin zur Umwelt- und Gefahrstoffanalytik.



Dem Netzwerk gehörten zwölf Partner an - darunter kleine und mittelständische Unternehmen, die Georg-August-Universität Göttingen sowie der internationale Life-Science-Konzern Sartorius. Koordiniert wurde das Projekt von der nal von minden GmbH, einem europaweit führenden Entwickler von Schnelltests für Human- und Veterinärmedizin. Ziel war es, die Brücke zwischen Grundlagenforschung, angewandter Entwicklung und konkretem Marktbedarf zu schlagen.

SNiPoCC Final Conference

Southern Lower Saxony Sets New Standards in Rapid Test Diagnostics

Göttingen, August 26, 2025 - With a high-profile closing conference at the Institute for Nanophotonics Göttingen (IFNANO), the federally funded project “Southern Lower Saxony Point-of-Care Cluster” (SNiPoCC) successfully concluded on Tuesday. Over the past three years, a regional alliance of science and industry has been working to develop innovative, highly sensitive, and sustainable rapid testing methods that significantly surpass existing diagnostic solutions in terms of functionality and performance. Fields of application range from human and veterinary medicine to forensics, as well as environmental and hazardous substance analysis.



The network comprised twelve partners – including small and medium-sized enterprises, the University of Göttingen, and the international life sciences company Sartorius. The project was coordinated by nal von minden GmbH, one of Europe’s leading developers of rapid tests for human and veterinary medicine. Its objective was to bridge the gap between fundamental research, applied development, and concrete market needs.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Im Rahmen der Abschlussveranstaltung stellten die beteiligten Partner ihre Ergebnisse vor und diskutierten mit Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Praxis. Das IFNANO präsentierte dabei neuartige photonische Ausleseverfahren, darunter eine Fluoreszenz-basierte Technologie, die die parallele Auswertung mehrerer Fluorophore ermöglicht. Damit lassen sich auf einem einzigen Teststreifen zuverlässig unterschiedliche Krankheitsindikatoren - etwa für Erkältung, Grippe oder Corona - ebenso wie Drogen wie Kokain, Heroin oder Amphetamin unterscheiden.

Ein weiteres Highlight war die Zusammenarbeit zwischen IFNANO und der miprolab GmbH: Gemeinsam entwickelten sie einen Lateral-Flow-Test zur quantitativen Bestimmung von Cortisol, der auf oberflächenverstärkter Raman-Spektroskopie basiert. Dank einer eigens entwickelten Raman-Sonde konnte das Signal-Rausch-Verhältnis bei Lateral-Flow-Tests entscheidend verbessert werden - ein Meilenstein für präzisere und vielseitigere Schnelltestverfahren.



Mit dem erfolgreichen Abschluss von SNIPOCC ist es gelungen, Südniedersachsen als Innovationsstandort im Bereich Point-of-Care-Diagnostik weiter zu stärken und den Grundstein für zukünftige Entwicklungen im internationalen Wettbewerb zu legen.

During the final event, participating partners presented their results and engaged in discussions with experts from both academia and industry. IFNANO showcased novel photonic readout technologies, including a fluorescence-based method enabling the simultaneous evaluation of multiple fluorophores. This innovation allows reliable differentiation of various disease markers - such as for the common cold, influenza, or COVID-19 - as well as substances like cocaine, heroin, or amphetamines on a single test strip.

Another highlight was the collaboration between IFNANO and miprolab GmbH: Together they developed a lateral flow test for the quantitative measurement of cortisol, based on surface-enhanced Raman spectroscopy. With the aid of a specially designed Raman probe, the signal-to-noise ratio in lateral flow tests was significantly improved - a milestone for more precise and versatile rapid testing methods.



With the successful completion of SNIPOCC, Southern Lower Saxony has further strengthened its position as an innovation hub in point-of-care diagnostics, laying the foundation for future developments in international competition.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Zukunftstag im IFNANO

Ein Blick in die Welt von morgen

Jeder Tag ist eine Chance, die Zukunft zu gestalten. Seit 2001 haben interessierte Mädchen und Jungen der Jahrgangsstufen 5 bis 12 jedes Jahr die Möglichkeit, am Zukunftstag einen spannenden Blick in Berufe zu werfen, die sie sonst vielleicht nicht in Betracht gezogen hätten. Besonders wichtig ist diese Veranstaltung in Zeiten des wachsenden Fachkräftemangels, der durch den demographischen Wandel noch verstärkt wird. Besonders im Bereich der Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik ist es unerlässlich, junge Talente zu fördern – und dabei vor allem auch Mädchen zu ermutigen, in diese oft männerdominierten Berufsfelder einzutauchen. Der Zukunftstag setzt hier einen wichtigen Akzent.

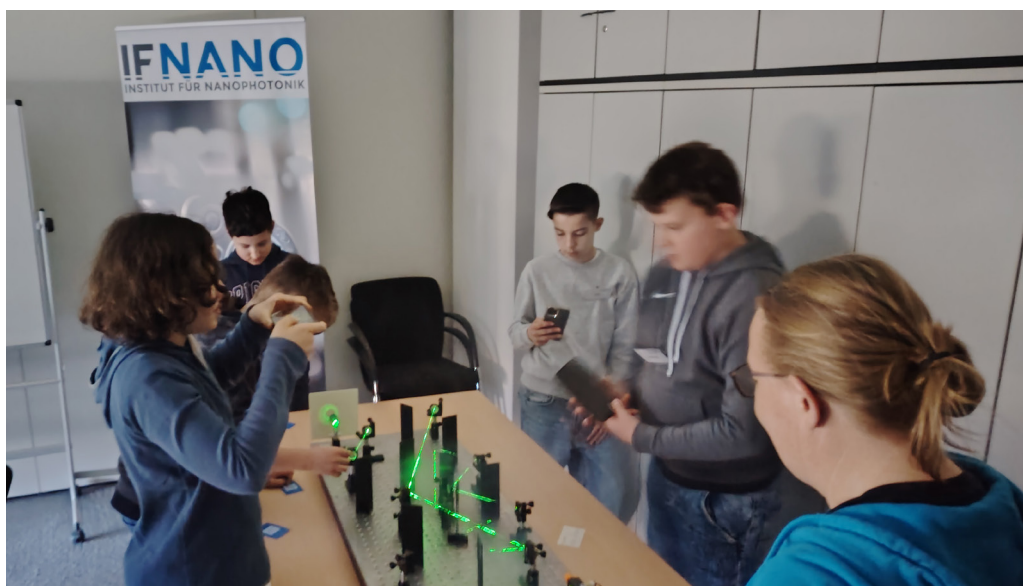
Am 3. April 2025 hatten sechs Schülerinnen und Schüler im Alter von 11 bis 14 Jahren die Gelegenheit, das IFNANO zu besuchen und das faszinierende Feld der Nanotechnologie kennenzulernen. Bei einer ausführlichen Führung durch das Institut erhielten die jungen Teilnehmer einen tiefen Einblick in die Arbeit der Wissenschaftler und Forscher.

Zukunftstag at the IFNANO

A Glimpse into the World of Tomorrow

Every day is a chance to shape the future. Since 2001, interested girls and boys from grades 5 to 12 have had the opportunity each year to take part in Future Day, gaining an exciting look into professions they might not have otherwise considered. This event is especially important in times of growing skilled labor shortages, which are further intensified by demographic changes. It is particularly essential to promote young talent in the fields of mathematics, computer science, natural sciences, and technology – and especially to encourage girls to explore these often male-dominated career paths. Future Day makes a valuable contribution in this regard.

On April 3, 2025, six students aged 11 to 14 had the opportunity to visit IFNANO and discover the fascinating field of nanotechnology. During an in-depth tour of the institute, the young participants gained a deep insight into the work of scientists and researchers.



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events

Doch das war noch nicht alles: Unter fachkundiger Anleitung durften die Jugendlichen selbst aktiv werden und als Forscher experimentieren. Mit hoher Konzentration und großem Interesse tauchten sie in die spannende Welt der (Laser-) Physik ein und erfuhren, wie ein Gravurlaser funktioniert, warum Rosen in Sekunden zu Eis werden und vieles mehr.

But that wasn't all: under expert guidance, the students were able to get hands-on and experiment as researchers themselves. With great focus and curiosity, they dove into the exciting world of (laser) physics, learning how an engraving laser works, why roses can freeze in seconds, and much more.

