

JAHRESBERICHT 2024

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 a bold, sans-serif font, 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 curved facade is visible under a clear blue sky. There are green bushes and a paved area in the foreground.

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 Pulse / Nanostrukturen.....	30	Short Pulses / Nanostructures	30
Optik / Kurze Wellenlängen.....	46	Optics / Short Wavelengths	46
Photonische Sensorik.....	56	Photonic Sensor Technologies	56
Projekte.....	72	Projects.....	72
Publikationen.....	74	Publications.....	74
Konferenzbeiträge.....	75	Conference Contributions	75
Abschlussarbeiten	77	Final Thesis	77
Ausgewählte Kooperationspartner	79	Selected Cooperation Partners.....	79
Messen und Veranstaltungen	82	Exhibitions and Events.....	82

Vorwort

Preface

Liebe Leserinnen und Leser,

innovative Technologien öffnen bekanntlich neue Türen. So werden auch wissenschaftliche Erkenntnisse, die bei uns am IFNANO getroffen werden, immer wieder in neue Produkte, Verfahren und Dienstleistungen überführt. 2024 wurden dabei wichtige Impulse unter anderem durch Fortschritte in Bildgebung, Materialbearbeitung und Echtzeitanalyse gesetzt. Große Entwicklungssprünge wurden erneut bei den Bildgebungsstrategien zur Untersuchung biologischer Prozesse erzielt.

Im Rahmen des EU-Projekts -"NanoVIB"- entwickeln wir in enger Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern eine Kombination speziell angepasster molekülspektroskopischer und hochauflösender, fluoreszenzbasierter Bildgebungsverfahren, die tiefere Einblicke in biologische Prozesse ermöglichen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können maßgeblich zum Verständnis von Mechanismen beitragen, durch die Bakterien menschliche Zellen infizieren, und somit die Grundlage für die zukünftige Entwicklung krankheitsspezifischer Medikamente und Impfstoffe schaffen. Ebenfalls durch eine Kombination hochauflösender Mikroskopie-Techniken ist es gelungen, bakterielle Virulenzmechanismen auf bisher unerreichtem Detailniveau zu visualisieren. Eine der neuesten Methoden in diesem Bereich ist die MINFLUX-Nanoskopie, die eine außergewöhnliche Präzision bei der Lokalisierung fluoreszierender Marker bis hinunter in den Bereich von ein bis drei Nanometern bietet.

Große Fortschritte wurden am IFNANO auch bei der Weiterentwicklung der schwarzen Lasermarkierung auf Glas erreicht. Dabei handelt es sich um eine neuartige Methode zur dauerhaften, nahezu unsichtbaren und fälschungssicheren Markierung von Glasstrukturen durch Bestrahlung mit einem UV-Laser - ganz ohne zusätzliches Material. Anwendung findet die schwarze Lasermarkierung nicht nur im Bereich der Produktsicherheit, sondern auch in der Medizintechnik und bei der Individualisierung hochwertiger Komponenten.

Dear Readers,

As we all know, innovative technologies open new doors. At IFNANO, scientific findings are regularly transformed into new products, processes, and services. In 2024, important momentum was driven in particular by advances in imaging, material processing, and real-time analysis. Significant breakthroughs were once again achieved in imaging strategies for the investigation of complex biological processes.

As part of the EU project -"NanoVIB"-, we are working in close collaboration with our project partners to develop a combination of specially adapted molecular spectroscopic and high-resolution fluorescence-based imaging techniques that allow for deeper insights into biological processes. The knowledge gained through this can make a major contribution to understanding the mechanisms by which bacteria infect human cells - thereby laying the groundwork for the future development of disease-specific medications and vaccines. Using a combination of high-resolution microscopy techniques, we have also succeeded in visualizing bacterial virulence mechanisms at a previously unattained level of detail. One of the most recent methods in this area is MINFLUX nanoscopy, which offers extraordinary precision in locating fluorescent markers - down to the range of one to three nanometers.

IFNANO has also made significant progress in further developing black laser marking on glass. This is a novel method for creating permanent, nearly invisible, and forgery-proof markings on glass structures by UV laser irradiation, without the need for any additional materials. Black laser marking is used not only in product security but also in medical technology and in the customization of high-quality components.

Vorwort

Preface

Natürlich waren wir mit unseren Forschungen auch auf anderen Gebieten aktiv. Ein Thema war dabei die Prozesssteuerung und Echtzeit-Materialanalyse. In Zusammenarbeit mit mehreren Projektpartnern wurden spezielle Sensoren entwickelt und bereits erfolgreich eingesetzt, die eine direkte Prozesssteuerung bei der Produktion bestimmter Gummiprodukte ermöglichen und damit für eine erhöhte Qualitätssicherung sorgen. Dabei kommt die LIBS-Technologie (LIBS- Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) zur Echtzeit-Materialanalyse zum Einsatz, die am IFNANO weiterentwickelt und für diesen Zweck deutlich verbessert wurde.

Besondere Erwähnung sollen auch in diesem Jahr natürlich wieder unsere 53 Mitarbeitenden finden, ohne deren überdurchschnittlichen Einsatz und Brillanz die vielen wissenschaftlichen Durchbrüche und hervorragenden Projektergebnisse gar nicht zustande gekommen wären.

Mein herzlicher Dank dafür!

Im Vergleich zum Vorjahr konnte das IFNANO das hohe Niveau seines Betriebshaushalts mit 4,70 Millionen Euro halten. Beachtliche 65,1 Prozent dieser Summe wurden dabei über Drittmittel eingeworben. Die direkten Auftrageinnahmen aus der Industrie trugen hierzu mit 17,3 Prozent bei. und lagen damit wieder auf dem hohen Niveau des Vorjahres.

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



Of course, our research activities extended to other areas as well. One such topic was process control and real-time material analysis. In collaboration with several project partners, we developed and successfully deployed special sensors that enable direct process control in the production of specific rubber products - ensuring increased quality assurance. This involves the use of LIBS technology (LIBS- Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) for real-time material analysis, which has been further developed and significantly optimized for this purpose at IFNANO.

This year, we would once again like to give special recognition to our 53 employees, without whose outstanding commitment and brilliance the many scientific breakthroughs and excellent project results would not have been possible.

My heartfelt thanks go out to them!

Compared to the previous year, IFNANO was able to maintain its high operating budget level at €4.70 million. A remarkable 65.1 percent of this amount was secured through third-party funding. Direct contract revenues from industry contributed 17.3 percent, once again matching the high level of the previous year.

I wish you an inspiring read and warmly invite you to collaborate with us.



Leitbild IFNANO

Mission Statement



Leitbild IFNANO

Mission Statement

Exzellenz durch Zusammenarbeit

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 sind Experten für nanoskaliges Strukturieren, Analysieren und Abbilden mit Licht. Hier gehören wir zu den weltweit führenden Einrichtungen.

Das Institut für Nanophotonik Göttingen betreibt interdisziplinäre Spitzenforschung in Kooperation mit regionalen, nationalen und internationalen Partnern aus Industrie und Forschung und entwickelt auf diese Weise kompetitive Produkte, Lösungen und Innovationen – zum Wohl der Gesellschaft und zur Stärkung der Wirtschaft.

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

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

Wir bieten eine industrienah 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.

Excellence through Collaboration

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 experts in nanoscale structuring, analyzing, and imaging with light. In this field, we are one of the world's leading research facilities.

The Institute for Nanophotonics Göttingen conducts cutting-edge interdisciplinary research in collaboration with regional, national, and international partners from industry and research, and in doing so develops competitive products, solutions, and innovations – for the good of society and to strengthen the economy.

We primarily view ourselves as the first point of contact for small and medium-sized enterprises for all matters in the field of applied nanophotonics. We work with our customers and partners in a trusting, fast, and highly effective manner.

The regional economy benefits from our activities through the transfer of knowledge 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 communication, and an excellent working environment create the foundation for developing creative solutions to scientific and technological challenges.

Institutsstruktur Institution Structure

INSTITUT FÜR NANOPHOTONIK GÖTTINGEN E.V. (IFNANO)



Prof. Dr. J. Tros
Vorstandsvorsitzender
Universität



Dr. Bernd Stoffregen
Schatzmeister
Industrie



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



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



Prof. Dr. Tim Salditt
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.
Carola Gregor
Optische Nanoskopie



Dr.
Peter Simon
Kurze Pulse/Nanostrukturen



Dr.
Jürgen Ihlemann
Kurze Pulse/Nanostrukturen



Dr.
Dong Du Mai
Optik/Kurze Wellenlängen



Dr.
Klaus Mann
Optik/Kurze Wellenlängen



Dr.
Hainer Wackerbarth
Photonische Sensorik

KURATORIUM

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

Kurator
Universität Linz
Österreich

**Prof. Dr. Philippe Bastiaens**

Kurator
Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie
Dortmund

**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/Holzminde/Göttingen

**Prof. Dr. Sarah Köster**

Kuratorin
Georg-August-Universität
Göttingen

**Prof. Dr. Peter Loosen**

Vorsitzender
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

Dirk Born

Fenja Belosa

Markus Bähr

Tatjana Kasten

Uwe Lampe

Andreas Spata

Stefanie Wegener

Anette Zwingmann



Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt im Jahr 2024 hatte ein Volumen von 4,70 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 65,1 %. Die Einnahmen aus der Industrie trugen mit 17,3 % zur Finanzierung bei.

Investitionen

Im Jahr 2024 wurden Investitionen in die kontinuierliche Erweiterung der technologischen Ausstattung im Gesamtvolumen von 0,40 Millionen Euro getätigt.

Personal

Am Institut für Nanophotonik Göttingen waren zum Stichtag 31.12.2024 insgesamt 53 Mitarbeiter beschäftigt, davon 42 Wissenschaftler und Techniker, was einem Anteil von 79,3 % 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 2024 wurden 5 wissenschaftliche und studentische Hilfskräfte betreut.

Operating budget

The operating budget in 2024 had a volume of 4.70 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 65.1 %. Industry revenues contributed 17.3 % to the financing.

Investments

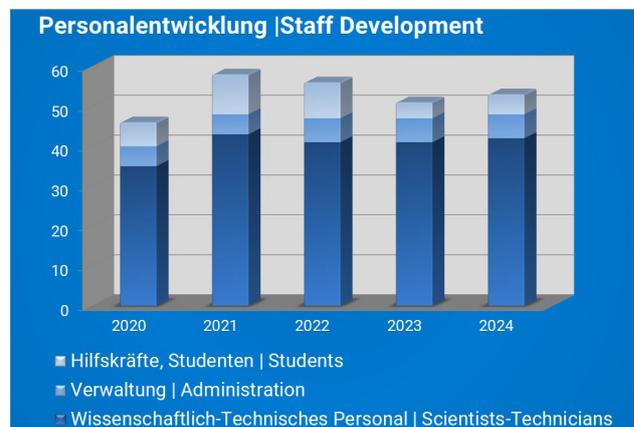
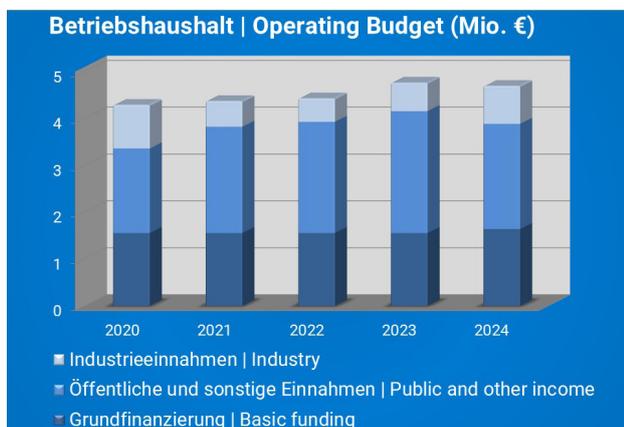
In 2024, a total of 0.40 million euros was invested in the continuous expansion of the technological equipment.

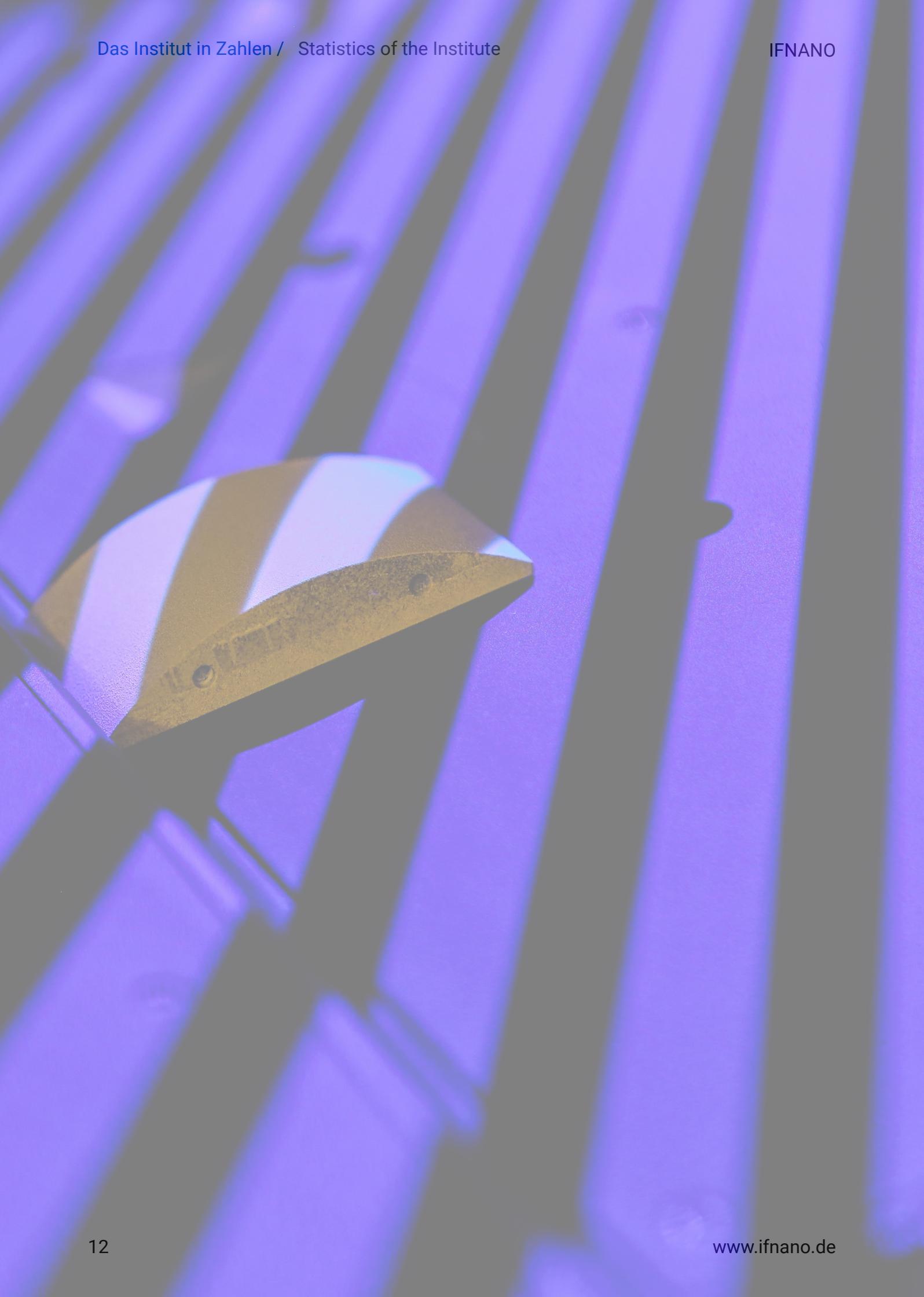
Staff

At year-end 2024, Institut für Nanophotonik Göttingen had 53 employees, 42 of them scientists and technicians, which corresponds to 79.3 % 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 2024, 5 students and research assistants were supported at the IFNANO.



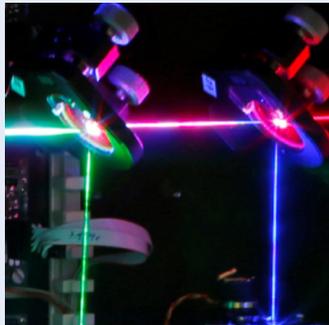


Die Abteilungen

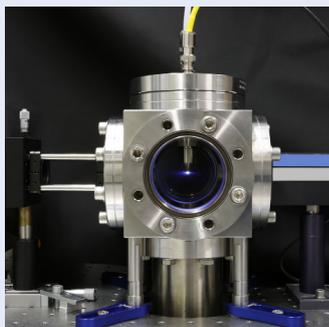
The Departments



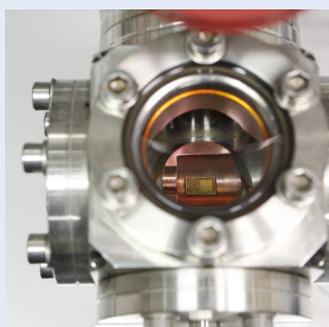
Optische Nanoskopie
Optical Nanoscopy



Kurze Pulse / Nanostrukturen
Short Pulses / Nanostructures



Optik / Kurze Wellenlängen
Optics / 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

Lenny Reinkensmeier

Dr. Carola Gregor

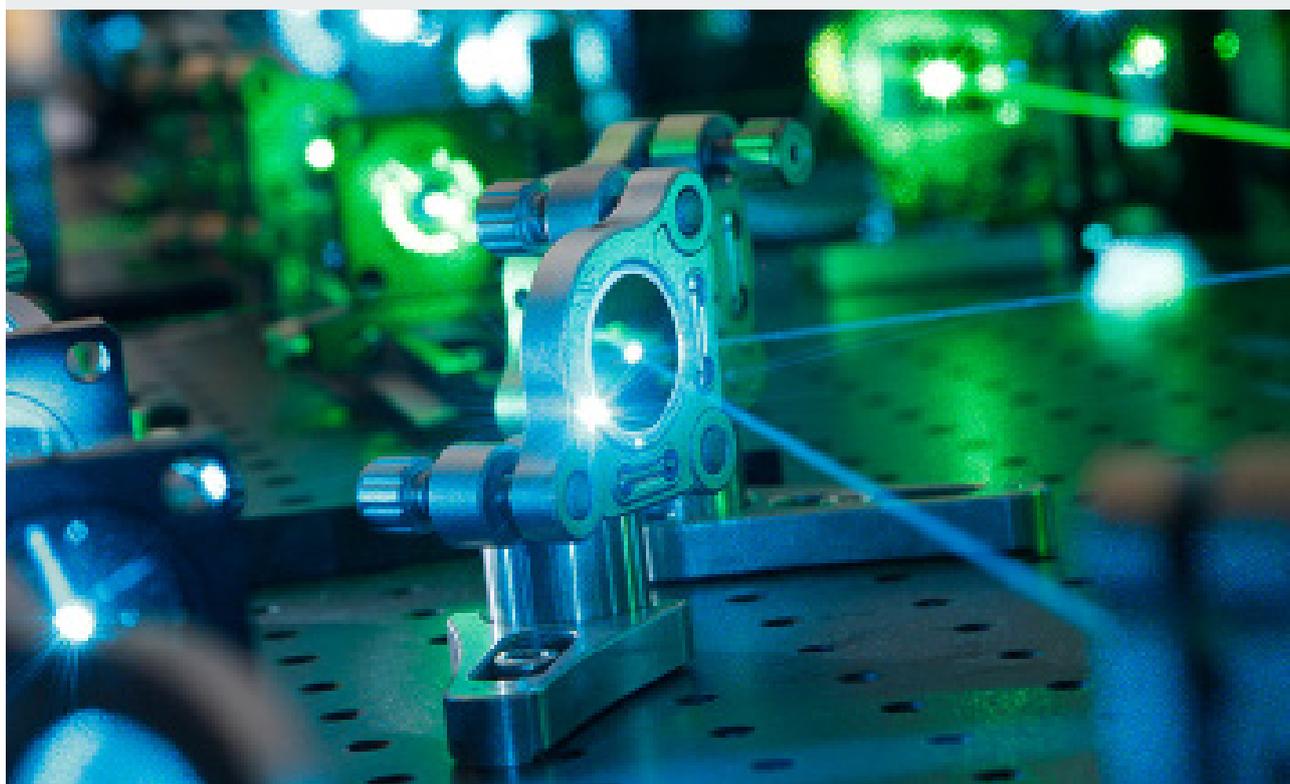
Yanzeng Li

Dr. Parul Jain

Aishwarya Nair

Dr. René Siegmund

Ayiben Nuerbahati



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

Integrative Bildgebungsplattform mit nanoskaliger Auflösung für die Bakteriologie

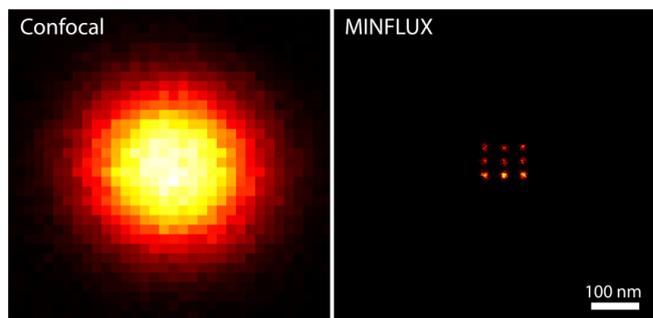
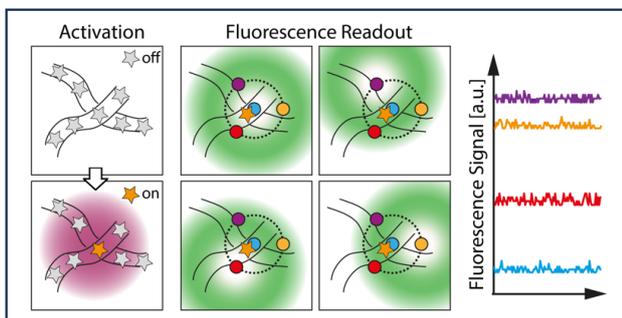
Die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie hat die Art und Weise, wie biologische Proben untersucht und analysiert werden, revolutioniert, da sie eine Detailgenauigkeit ermöglicht, die mit herkömmlicher Lichtmikroskopie bislang unerreichbar war. Eine der neuesten Methoden in diesem Bereich ist die MINFLUX-Nanoskopie, die eine außergewöhnliche Präzision bei der Lokalisierung fluoreszierender Marker bis hinunter in den Bereich von 1 bis 3 nm bietet. Damit wird das ultimative Ziel der biomedizinischen Bildgebung verwirklicht: die dreidimensionale Darstellung aus dem Inneren von Zellen auf der Längenskala von einzelnen funktionellen Einheiten biologischer Makromoleküle.

Die Methode basiert auf dem Prinzip, das detektierte Fluoreszenzsignal eines einzelnen Markers zu minimieren, um dessen genaue Position zu bestimmen. Dazu wird die Probe in iterativer Weise mit einem ringförmigen Anregungsfokus schrittweise abgetastet. Die Höhe des Fluoreszenzsignals hängt vom Abstand zwischen Fluorophor und Intensitätsnullstelle des Fokus ab und erreicht ihr Minimum, wenn beide exakt übereinstimmen.

Integrative imaging platform with nanoscale resolution for bacteriology

Super-resolution fluorescence microscopy has revolutionized the way biological samples are studied and analyzed by enabling a level of detail that was previously beyond the reach of conventional light microscopy. One of the latest methods in this field is MINFLUX nanoscopy, which offers exceptional precision in localizing fluorescent markers down to 1 to 3 nm, thereby achieving the ultimate goal of biomedical imaging: the three-dimensional visualization of the interior of biological cells at the length scale of individual functional units of biological macromolecules.

The method relies on minimizing the detected fluorescence signal from a single marker to precisely determine its location. To achieve this, the sample is scanned iteratively using a ring-shaped excitation focus. The intensity of the fluorescence signal depends on the distance between the fluorophore and the zero-intensity point of the focus, reaching a minimum when the two align precisely.



Links: Prinzip der MINFLUX-Nanoskopie. Ein einzelnes Molekül wird zunächst zufällig in einen fluoreszenzfähigen Zustand geschaltet. Anschließend wird ein ringförmiger Anregungsfokus iterativ um das aktivierte Molekül herum positioniert. Die Molekülposition lässt sich aus den Veränderungen des Fluoreszenzsignals berechnen, da diese vom Abstand zwischen der Intensitätsnullstelle des Fokus und der Molekülposition abhängen. Rechts: Vergleich von konfokaler und MINFLUX-Aufnahme einer Teststruktur, der die um ca. zwei Größenordnungen bessere MINFLUX-Auflösung demonstriert.

Left: Concept of MINFLUX nanoscopy. An individual molecule is first switched to its fluorescent state. A ring-shaped excitation focus is then iteratively positioned around the activated molecule. The molecule's location can be determined by analyzing the changes in fluorescence signal, which depend on the distance of the zero-intensity point of the focus and the molecule location. Right: Comparison of confocal and MINFLUX image of a test structure, illustrating the approximately two orders of magnitude improvement in resolution achieved with MINFLUX.

Optische Nanoskopie

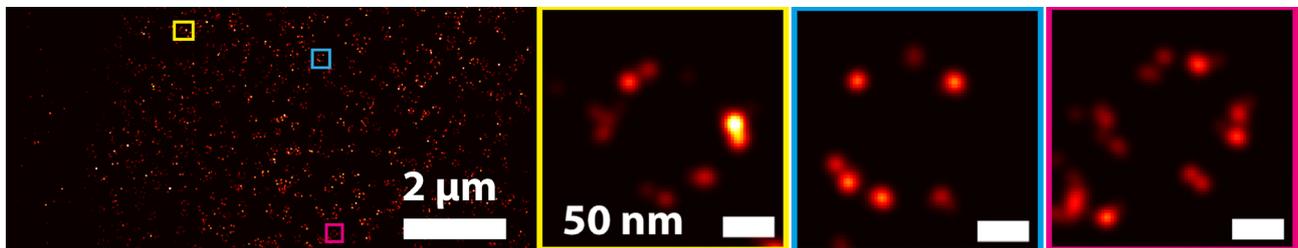
Optical Nanoscopy

Im Rahmen des EU-geförderten Projekts NanoVIB arbeiten wir in enger Zusammenarbeit mit Partnern aus Schweden, der Schweiz und Deutschland an der methodischen Weiterentwicklung der MINFLUX-Nanoskopie. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer innovativen Bildgebungsplattform, die modernste Verfahren der Fluoreszenzmikroskopie wie MINFLUX, Zwei-Photonen-Anregung (TPE) und TPE-Transient-State-Imaging miteinander kombiniert. Zudem wird eine Analyse der chemischen Eigenschaften der Probe auf Basis stimulierter Raman-Streuung integriert. Auf diese Weise wird die Korrelation von MINFLUX-Daten mit morphologischen, biochemischen und metabolischen Informationen ermöglicht, wodurch nanometergenaue MINFLUX-Proteinlokalisationen in den zellulären Kontext eingeordnet werden können.

Diese fortschrittliche Bildgebungsplattform soll dazu dienen, die molekularen Mechanismen von Pneumokokken-Erkrankungen zu erforschen – schweren Infektionen, die weltweit eine hohe Morbidität und Mortalität verursachen. Wir sind überzeugt, dass unser integrativer Ansatz einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung neuer, effektiverer Behandlungsmöglichkeiten für bakterielle Infektionen leisten kann und damit dazu beiträgt, schwere Krankheitsverläufe künftig besser zu verhindern.

As part of the EU-funded NanoVIB project, we are collaborating closely with partners from Sweden, Switzerland, and Germany to further develop the methodology of MINFLUX nanoscopy. The project's goal is to develop an innovative imaging platform that integrates state-of-the-art fluorescence microscopy techniques, including MINFLUX, two-photon excitation (TPE), and transient-state imaging under TPE conditions. In addition, the platform will incorporate an analysis of the chemical properties of the sample based on stimulated Raman scattering. This approach will enable the correlation of MINFLUX data with morphological, biochemical, and metabolic information, allowing for the contextualization of nanometer-precise MINFLUX protein localizations within the cellular environment.

This advanced imaging platform is designed to investigate the molecular mechanisms of pneumococcal diseases – severe infections responsible for high morbidity and mortality worldwide. We are confident that our integrative approach will contribute meaningfully to the development of more effective treatments for bacterial infections, ultimately helping to mitigate severe disease outcomes.



MINFLUX-Aufnahme von Kernporen in fixierten U2-OS-Zellen. Zur Bildgebung wurde die DNA-PAINT-Methode unter Verwendung des Farbstoffs Atto655 eingesetzt. Die Kernporen, die sich in der Kernhülle befinden, ermöglichen den Transport von Material in und aus dem Zellkern. Das Übersichtsbild links zeigt etwa ein Drittel eines Zellkerns. Rechts sind Vergrößerungen der im Übersichtsbild farblich markierten Bereiche zu sehen.

MINFLUX image of nuclear pores in fixed U2-OS cells. The DNA-PAINT method was used for imaging with the dye Atto655. The nuclear pores, located in the nuclear envelope, facilitate the transport of material into and out of the nucleus. The overview image on the left shows approximately one-third of a cell nucleus. On the right are magnified views of the areas marked in color in the overview image.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

COMET – schnelle Driftkorrektur für die Nanoskopie

Die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie ermöglicht Einblicke in die feinsten Details biologischer Proben bis in den Nanometerbereich. Was für die herkömmliche Fotografie gilt, trifft auch auf die Mikroskopie zu: Um ein scharfes Bild aufzunehmen, muss das Objekt während der Aufnahme stillstehen. Kleine Bewegungen, die bei der Durchführung von Mikroskopieexperimenten unvermeidlich sind, führen zu unscharfen Bildern, und mit dem Aufkommen immer leistungsfähigerer Mikroskopietechniken müssen neue Strategien entwickelt werden, um die Auswirkungen der Probenbewegung zu korrigieren. Die STORM- und MINIFLUX-Mikroskopie, auch bekannt als Single Molecule Localization Microscopy (SMLM), sind besonders davon betroffen, da diese auf lange Aufnahmezeiten angewiesen sind, während derer sich die Probe bewegen kann. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wurden Computeralgorithmen entwickelt, die in der Lage sind, die Drift zu bestimmen und die daraus resultierende Unschärfe im Bild zu korrigieren. Bisher etablierte, auf Kreuzkorrelation basierende Driftkorrekturverfahren für SMLM haben sich als robust erwiesen, beruhen jedoch auf einer groben zeitlichen Unterteilung und können daher nur eine sich zeitlich langsam ändernde Probedrift korrigieren.

Wir entwickeln einen neuen Ansatz zur Driftkorrektur in der SMLM, der die Daten optimal nutzt, um die Probedrift mit deutlich höherer zeitlicher Auflösung und hoher Präzision zu ermitteln. Unsere Methode mit der Bezeichnung „Cost-Optimized Maximal Overlap Drift Estimation“ (COMET) basiert auf folgendem Postulat: der zeitabhängige Driftvektor, der die Moleküllokalisationen im Datensatz maximal überlappt, ist genau derjenige, der der wahren experimentellen Drift entspricht. Ein solcher Vektor kann durch numerische Optimierung einer mathematischen Kostenfunktion berechnet werden, die den Grad der räumlichen Überlagerung der Molekülkoordinaten misst.

COMET – fast drift correction for nanoscopy

Super-resolution fluorescence microscopy reveals the finest details of biological specimens at nanometer scales. However, what is true for everyday photography is also true for microscopy: in order to capture a sharp image, the subject must remain still during image acquisition. Small motions that unavoidably occur while performing microscopy experiments result in blurred images, and with the advent of ever more powerful microscopy techniques, new strategies must be developed to mitigate the effects of sample motion.

STORM and MINIFLUX microscopy, also known as Single Molecule Localization Microscopy (SMLM), are especially sensitive because the imaging process requires a long period of time, during which sample drift may occur. To counter this effect, computer algorithms have been developed that are capable of estimating drift and correcting the resulting blur in the image. Previously established cross-correlation-based drift correction methods for SMLM have proven to be robust, but they rely on coarse temporal segmentation and thus can only correct for sample drift that changes slowly over time.

We are developing a new approach to drift correction in SMLM, which makes optimal use of the data in order to estimate sample drift with much finer time resolution and at great precision. Our method, called "Cost-Optimized Maximal Overlap Drift Estimation" (COMET), is based on a postulate: the unique time-varying drift vector that maximally aligns the molecular localizations in the dataset is the true experimental drift. Such a vector can be determined by numerically optimizing a mathematical cost function that quantifies the degree of spatial overlap of the molecule coordinates.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Mit diesem Ansatz konnten wir zeigen, dass die zeitliche Auflösung der Driftschätzung mit COMET im Vergleich zu anderen Methoden um bis zu das 50-fache verbessert werden kann. Dies führt direkt zu einer verbesserten Bildauflösung, da die Unschärfefeffekte der Probenbewegung vollständig eliminiert werden.

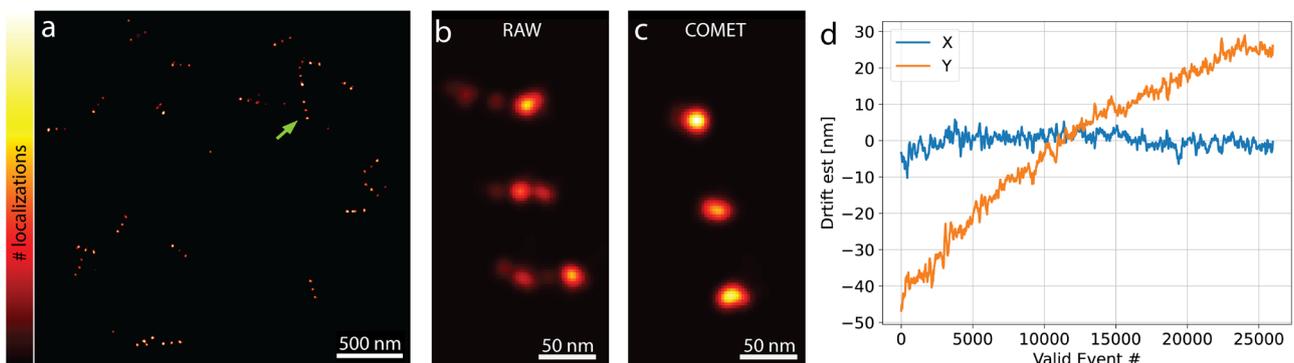
Als praktisches Beispiel haben wir nanoskopische „DNA-Lineale“ mit einem kommerziellen MINFLUX-Mikroskop gemessen. Das MINFLUX-Bild zeigt die drei markierten Punkte der fluoreszierenden Nanolineale deutlich. Allerdings ist das Bild aufgrund der Probenbewegung während der Aufnahme unscharf. Nach Anwendung des COMET-Algorithmus ist die Drift beseitigt und die Punkte erscheinen scharf, was eine präzise quantitative Analyse des Bildes ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil der COMET-Methode ist, dass sie mit einer 100-fach kürzeren Berechnungszeit deutlich schneller als herkömmliche Driftkorrekturmethode ist. Dies spart Stunden an Datenverarbeitungszeit und ermöglicht einen deutlich höheren Bilddurchsatz für SMLM. COMET, jetzt ein Open-Source-Online-Tool, kann unmittelbar auf alle bestehenden SMLM-Datensätze angewendet werden, um schärfere, driftfreie Bilder zu erhalten.

With this approach, we were able to show that the time resolution of the drift estimate was improved by up to a factor of 50 using COMET, compared to other methods. This directly results in improved image resolution, because the blurring effects of sample drift are eliminated.

As a practical example, we measured nanoscopic DNA nanorulers on a commercial MINFLUX microscope. The original MINFLUX image shows the three dots of the fluorescent nanorulers clearly, but the image is blurred due to sample motion which occurred during the recording. After passing the data through the COMET algorithm, however, the drift is eliminated and the dots appear sharp, enabling precise quantitative analysis of the image.

Finally, a second benefit of the COMET method is that it is much faster than existing drift correction methods, with a computation time up to 100 times shorter than the current state-of-the-art methods. This saves hours of data processing time and allows higher image throughput for SMLM. COMET, now an open-source online tool, can be directly applied to all existing SMLM datasets, which can now be reprocessed to obtain sharper, drift-free images.



COMET-Anwendungsbeispiel. a) Ausschnitt der gerenderten Darstellung von MINFLUX-Messdaten einer Probe mit DNA-Nanolinealen (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 einer Serie von Lokalisationen eines einzelnen Moleküls entspricht.

COMET application example. a) Cropped region of a rendered MINFLUX dataset, recorded on a sample containing DNA nanorulers (3x80 nm, GATTAQUANT). The MINFLUX data was 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 a series of localizations on a single molecule.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Probenschonende Aberrationskorrektur für STED-Bildgebung in herausfordernden Proben

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

Für viele biomedizinische Fragestellungen ist es erforderlich, biologische Zellen in ihrer nativen Umgebung zu untersuchen – etwa in minimalinvasiv präparierten Gewebeschnitten oder in Modellorganismen. Dies stellt die Nanoskopie im Allgemeinen und die STED-Mikroskopie im Besonderen vor Herausforderungen, da die optischen Eigenschaften der Probe nicht für die Bildgebung optimiert sind.

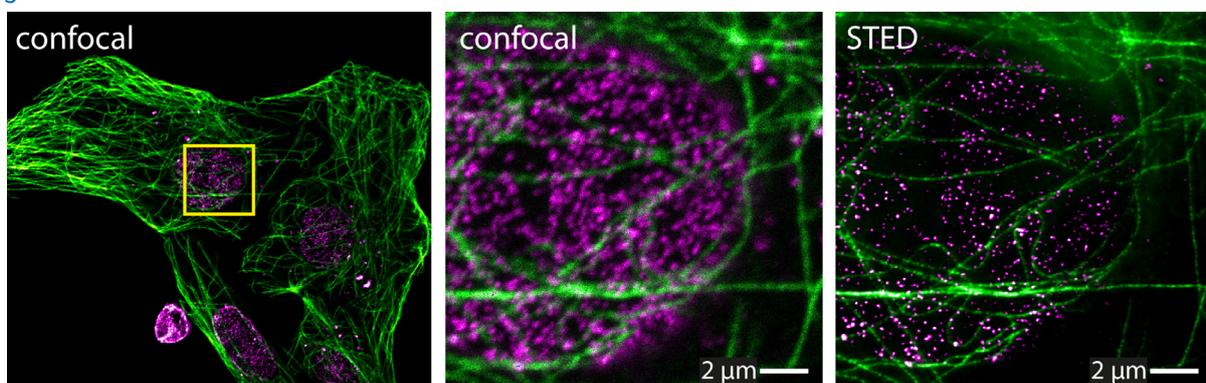
Probeninduzierte Aberrationen, also Verzerrungen der Wellenfront, können die Fokussierung des Lichts in der Probe erheblich beeinträchtigen, was die Bildqualität signifikant verschlechtern und den Auflösungsgewinn zunichtemachen kann. Adaptive Optiken stellen hierfür eine Lösung dar, da sie Wellenfronten dynamisch modifizieren können. Eine Herausforderung besteht in der Wahl der geeigneten Wellenfrontmodifikation, die die Bildqualität bestmöglich wiederherstellt.

Sample-friendly aberration correction for STED imaging in challenging samples

STED microscopy has become an indispensable tool in the life sciences, as its typically tenfold improved optical resolution allows for the visualization of details that are hidden from conventional fluorescence microscopes. As a result, it has found successful applications across a wide range of fields, including cell biology, immunology, and cancer research.

For many biomedical questions, it is essential to study biological cells in their native environment, such as in tissue sections or model organisms prepared with minimally invasive methods. This presents challenges for nanoscopy in general, and STED microscopy in particular, since the optical properties of the sample are not optimized for imaging.

Sample-induced aberrations, or distortions of the wavefront, can severely impair light focusing within the sample, significantly degrading image quality and potentially nullifying the resolution gain. Adaptive optics offer a solution, as they enable dynamic modifications of wavefronts. A challenge lies in selecting the appropriate wavefront modification that best restores image quality.



Konfokales Übersichtsbild (links) von fluoreszenzmarkierten biologischen Zellen (grün: Mikrotubulinetzwerk, magenta: Kernporen) sowie konfokales (Mitte) und STED-Bild (rechts) des im Übersichtsbild markierten gelben Bereichs.
Confocal overview image (left) of fluorescently labeled biological cells (green: 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

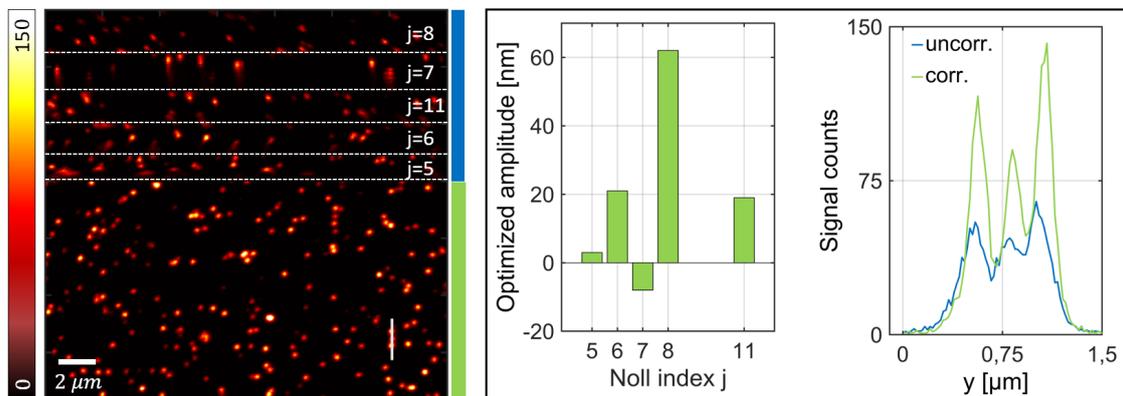
Optical Nanoscopy

Da eine direkte Messung der aberrierten Wellenfront in der Probe nicht praktikabel ist, wird üblicherweise eine Maßzahl aus dem detektierten Fluoreszenzsignal abgeleitet. Werden dafür Bildeigenschaften wie Helligkeit und Schärfe verwendet, sind wiederholte Bildaufnahmen erforderlich. Dies verlangsamt den Prozess, führt zu verstärktem Photobleichen und reduzierter Bildhelligkeit, was wiederum die Aberrationskorrektur verfälschen kann.

Wir analysieren stattdessen den Fluoreszenz-Photonenstrom und nutzen dabei die Tatsache, dass die beobachtete Fluoreszenzlebensdauer von der lokalen STED-Intensität abhängt: Ist der STED-Fokus aberriert, sinkt dessen Maximalintensität, was die Fluoreszenzabklingkurve beeinflusst. Wird der Zeitpunkt der Fluoreszenzemission mit einer Auflösung im Bereich von wenigen zehn Pikosekunden ausgewertet, so erhält man eine Metrik, für die im Prinzip die Analyse des Signals in einem einzelnen Bildpixel ausreicht. Diese photonenstrombasierte Metrik ermöglicht somit eine schnelle und ortsabhängige Aberrationskorrektur, die während der STED-Bilderfassung durchgeführt werden kann und das begrenzte Fluoreszenzphotonenbudget effizient nutzt.

Since directly measuring the aberrated wavefront within the sample is impractical, a quantitative metric is typically derived from the detected fluorescence signal. When image properties such as brightness and sharpness are used for this purpose, repeated image acquisitions are necessary. This slows down the process, leads to increased photobleaching and reduced image brightness, which in turn may compromise the aberration correction.

Instead of relying on such an image metric, we analyze the fluorescence photon stream, taking advantage of the fact that the observed fluorescence lifetime is dependent on the local STED intensity: When the STED focus is aberrated, its peak intensity decreases, which in turn affects the fluorescence decay curve. By analyzing the timing of fluorescence emission with a resolution on the order of tens of picoseconds, a metric can be obtained that, in principle, only requires analyzing the signal from a single image pixel. This photon stream-based metric thus enables rapid and location-specific aberration correction that can be performed during STED image acquisition, thereby enabling efficient use of the limited fluorescence photon budget.



Aberrationskorrektur während einer STED-Messung unter Verwendung von fünf Aberrationsmoden. Die horizontalen, gestrichelten Linien markieren den für die Korrektur jeweils einer Mode verwendeten Bildbereich (blauer Balken). Das restliche STED-Bild weist die optimierte Bildqualität auf (grüner Balken). Rechts: Optimierte Amplituden der Aberrationsmoden nach Korrektur und Linienprofil entlang der vertikalen weißen Linie im Vergleich zum entsprechenden Linienprofil der nichtkorrigierten STED-Aufnahme (nicht gezeigt).

Aberration correction during a STED measurement, using five aberration modes. The horizontal dashed lines indicate the image regions used for the correction of each mode (blue bar). The rest of the STED image shows optimized image quality (green bar).

Right: Optimized amplitudes of aberration modes after correction, along with the line profile across the vertical white line, compared to the corresponding line profile of the uncorrected STED image (not shown).

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Adaptive Probenrasterung für schnellere und probenschonendere STED-Mikroskopie

Für die Beobachtung schneller dynamischer Prozesse in biologischen Zellen bieten rasterbasierte Nanoskopiemethoden – wie die STED-Mikroskopie – inhärente Vorteile im Vergleich zu weitfeldbasierten Techniken: Da die Aufnahmezeit beim pixelweisen Abrastern der Probe mit der Größe des Bildfelds skaliert, kann die Bildgebung durch eine Verkleinerung des Bildfelds erheblich beschleunigt werden. Dieser Zusammenhang bedeutet allerdings auch, dass die Bildgebung von ausgedehnten Probenbereichen langsamer wird und die in die Probe eingebrachte Lichtdosis steigt.

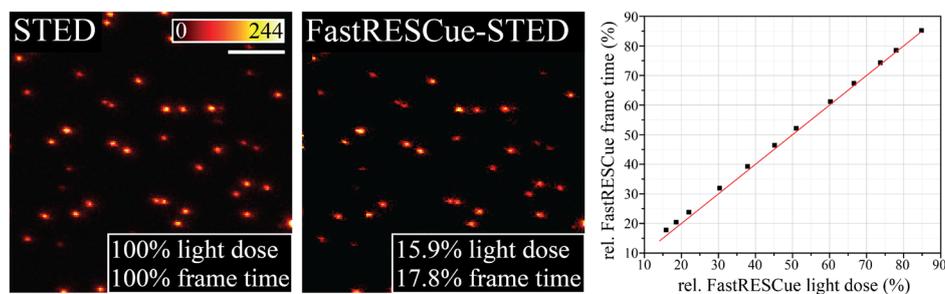
Biologische Strukturen sind typischerweise räumlich inhomogen, weshalb meist nur Teilbereiche der Probe von Interesse sind. Eine Beschränkung der Rasterung auf diese relevanten Bereiche könnte sowohl die Bildgebung beschleunigen als auch die Lichtdosis verringern. Dieser Ansatz ist jedoch technisch herausfordernd, da zur Rasterung üblicherweise galvanometrische Scanner eingesetzt werden, die zu träge sind, um adaptive Rastermuster zu realisieren. Bestehende adaptive Techniken können daher zwar die Lichtdosis reduzieren, indem beispielsweise mit RESCue-STED die Laser unter geeigneten Bedingungen während der Bildaufnahme abgeschaltet werden, verkürzen jedoch nicht die Aufnahmezeit und verbessern damit auch nicht die zeitliche Auflösung.

Adaptive sample-scanning for faster and sample-friendly STED microscopy

To observe fast dynamic processes in biological cells, scanning-based nanoscopy methods – such as STED microscopy – offer inherent advantages over wide-field-based techniques: since the acquisition time scales with the size of the field-of-view when scanning the sample pixel by pixel, imaging can be significantly accelerated by reducing the field-of-view. However, this relationship also means that imaging larger sample regions becomes slower and the light dose applied to the sample increases.

Biological structures are typically spatially inhomogeneous, which is why usually only subregions of the sample are of interest. Restricting the scanning to these relevant areas could both accelerate imaging and reduce the light dose. However, this approach is technically challenging, as galvanometric scanners, which are commonly used for scanning the sample, are too inert to enable adaptive scanning patterns.

Although existing adaptive techniques can reduce the light dose, such as by turning off the lasers under appropriate conditions during image acquisition with RESCue-STED, they do not shorten the acquisition time and, therefore, do not improve temporal resolution.



STED-Bild (links) von fluoreszierenden Mikrosphären und entsprechendes FastRESCue-STED-Bild (Mitte), aufgenommen mit deutlich reduzierter Lichtdosis und Aufnahmezeit. (Maßstab: 1 μm). Rechts: Aufnahmezeit als Funktion der Lichtdosis für FastRESCue-Messungen bei verschiedenen RESCue-Parametern, relativ zur STED-Messung.

STED image (left) of fluorescent microspheres and the corresponding FastRESCue-STED (center), acquired with significantly reduced light dose and acquisition time. Right: Acquisition time as a function of light dose for FastRESCue measurements at different RESCue parameters, relative to the STED measurement.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Um diese Einschränkung zu überwinden, haben wir ein modifiziertes Scansystem entwickelt, das einen galvanometrischen Scanner mit elektrooptischen Deflektoren kombiniert. Dadurch wird eine geringe Latenzzeit bei gleichzeitig großem Bildfeld realisiert, sodass jede Position im Bildfeld sofort adressiert werden kann und sich anspruchsvolle Rastermuster umsetzen lassen.

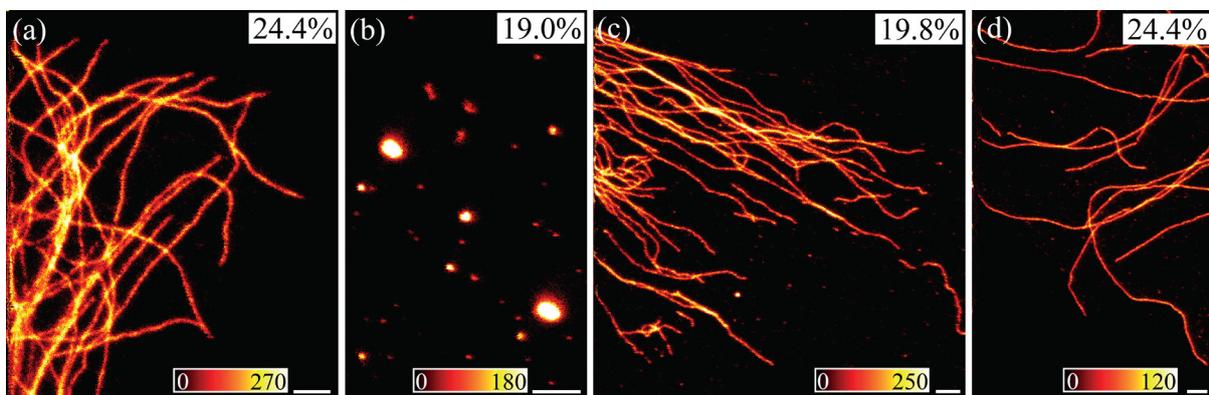
Wir haben dieses Scansystem exemplarisch auf RESCue-STED angewendet und anstatt die Laser auszuschalten, direkt die nächste Rasterposition angesteuert. Unter Verwendung dieses Ansatzes, den wir als FastRESCue bezeichnen, konnten wir nicht nur den Lichtdosisbeitrag, sondern auch die Aufnahmezeit um mindestens einen Faktor 5 reduzieren. Da der erreichbare Gewinn von der Dichte der abgebildeten Strukturen und dem angestrebten Signal-Rausch-Verhältnis abhängt, zeigte sich für wesentliche Teile eines Beispielbilds sogar eine Reduktion beider Parameter um einen Faktor 10.

Das kombinierte Scansystem eröffnet dank der präzisen und schnellen Adressierbarkeit von Rasterpositionen weitere Anwendungen, wie etwa das Verfolgen von Partikeln oder Filamentverläufen in Echtzeit, und trägt damit zur Umsetzung innovativer Anwendungen in der dynamischen Bildgebung bei.

To address this limitation, we developed a modified scan system that combines a galvanometric scanner with electro-optical deflectors. This system achieves low latency while maintaining a large field-of-view, allowing each position in the field-of-view to be addressed instantaneously and enabling the use of complex scan patterns.

We applied this scan system to RESCue-STED as an example application, and instead of turning off the lasers, we directly moved to the next scan position. Using this approach, which we refer to as FastRESCue-STED, we were able to not only reduce the light dose but also the acquisition time by a factor of five at least. Since the achievable gain depends on the density of the imaged structures and the desired signal-to-noise ratio, for significant parts of an example image, we even observed a reduction in both parameters by a factor of 10.

The combined scan system opens up new applications, such as tracking particles or filament dynamics in real-time, thanks to its precise and rapid addressing of scan positions, thus contributing to the development of innovative applications in dynamic imaging.



FastRESCue-STED-Bildgebung verschiedener zellulärer Strukturen: (a) Tubulin in Vero-Zellen, (b) Peroxisomen (PMP70) in Vero-Zellen, (c) Vimentin in Fibroblasten und (d) Tubulin in Fibroblasten (Maßstab 1 μm). Die Prozentwerte in der oberen rechten Ecke geben die jeweilige FastRESCue-Aufnahmezeit im Vergleich zur STED-Bildgebung an.

FastRESCue-STED imaging of various cellular structures (a) tubulin in Vero cells, (b) peroxisomes (PMP70) in Vero cells, (c) vimentin in fibroblasts and (d) tubulin in fibroblasts (scale bar 1 μm). The percentage values in the upper right corner denote the respective FastRESCue frame time relative to STED imaging.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Verbesserte Biolumineszenz für die Mikroskopie von lebenden Zellen

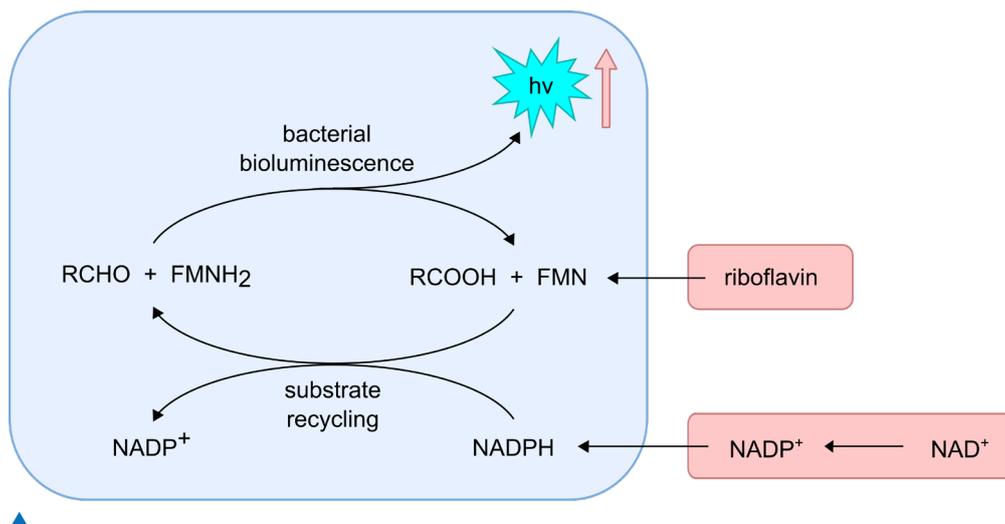
Zur Bildgebung lebender Zellen kann Biolumineszenz verwendet werden. Bei diesem Prozess wird Licht von der Zelle selbst produziert, sodass während der Bildaufnahme keine externe Beleuchtung der Probe erforderlich ist. Dies bietet den Vorteil, dass die Zellen auch über lange Zeiträume hinweg ohne den negativen Einfluss von Phototoxizität, Photobleichen der Marker oder anderen lichtinduzierten Effekten beobachtet werden können.

Die Erzeugung des Biolumineszenzlichts erfolgt durch eine chemische Reaktion, bei der ein Substrat (das Luciferin) von einem Enzym (der Luciferase) umgesetzt wird. Während die Luciferase von den Zellen hergestellt wird, wird das Luciferin bei der Bildgebung in der Regel von außen zugegeben. Dies erhöht den Aufwand bei der Probenvorbereitung und erschwert außerdem die Quantifizierung des Signals bei Langzeitmessungen, da das Luciferin während der Biolumineszenzreaktion verbraucht wird und seine Konzentration dadurch mit der Zeit abnimmt.

Improved bioluminescence for microscopy of living cells

Bioluminescence can be used to image living cells. During the bioluminescence process, light is produced by the cell itself, eliminating the need for external illumination of the sample during image acquisition. This offers the advantage that the cells can be observed over long periods of time without the negative influence of phototoxicity, photobleaching of the markers, or other light-induced effects.

The bioluminescent light is generated by a chemical reaction in which a substrate (the luciferin) is converted by an enzyme (the luciferase). While the luciferase is produced by the cells, the luciferin is typically added externally during imaging. This increases the effort involved in sample preparation and also makes it more difficult to quantify the signal in long-term measurements, as the luciferin is consumed during the bioluminescence reaction, which leads to a gradual decrease in its concentration over time.



Beim bakteriellen Biolumineszenzsystem wird in der Zelle (blau markiert) Licht durch die Oxidation von einem langkettigen Aldehyd (RCHO) und reduziertem FMN (FMNH₂) erzeugt. Die Regenerierung der beiden Substrate erfordert NADPH, dessen zelluläre Konzentration durch eine vermehrte Produktion von NADP⁺ aus NAD⁺ gesteigert werden kann, was eine erhöhte Biolumineszenz bewirkt. In analoger Weise kann eine Verbesserung der Helligkeit durch eine verstärkte Synthese von FMN aus dem Vorläufer Riboflavin erzielt werden. In the bacterial bioluminescence system, light is generated in the cell (marked in blue) by the oxidation of a long-chain aldehyde (RCHO) and reduced FMN (FMNH₂). The regeneration of the two substrates requires NADPH, the cellular concentration of which can be increased by enhanced production of NADP⁺ from NAD⁺, resulting in increased bioluminescence. Similarly, an improvement in brightness can be achieved by increasing the synthesis of FMN from the precursor riboflavin.

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Dieses Problem kann durch den Einsatz des bakteriellen Biolumineszenzsystems umgangen werden, da das Luciferin mit diesem System von der Zelle selbst durch zusätzliche Enzyme hergestellt werden kann. Die Lichtausbeute dieses Prozesses ist vergleichsweise gering, was die erreichbare räumlich-zeitliche Auflösung und den Bildkontrast begrenzt.

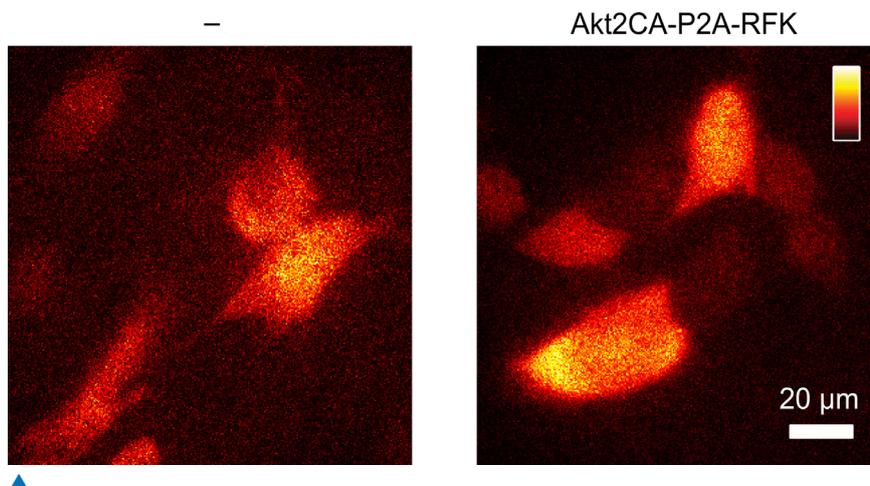
Wir konnten zeigen, dass die Lichtemission von Säugerzellen durch die Expression von zwei weiteren Enzymen - der Riboflavin-Kinase (RFK) und einer Variante der Proteinkinase B (Akt2CA) - gesteigert werden kann. Diese Enzyme bewirken eine vermehrte Produktion von zwei zellulären Molekülen (NADPH bzw. FMN), die am Biolumineszenzprozess beteiligt sind.

Die erhöhte Helligkeit ermöglicht bei gegebener Aufnahmezeit einen verbesserten Bildkontrast (siehe Abbildung unten). Alternativ dazu kann die gesteigerte Lichtemission genutzt werden, um die Aufnahmezeit zu verkürzen, sodass sich auch schneller ablaufende Veränderungen in der Zelle beobachten lassen. Diese Forschungsergebnisse helfen, die bisherigen Einschränkungen der Biolumineszenzmikroskopie zu überwinden und neue Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen.

This problem can be circumvented by using the bacterial bioluminescence system, in which the luciferin can be synthesized by the cell itself using additional enzymes. The light yield of this process is comparatively low, which limits the achievable spatio-temporal resolution and image contrast.

We were able to show that the light emission of mammalian cells can be improved by the expression of two additional enzymes, riboflavin kinase (RFK) and a variant of protein kinase B (Akt2CA). These cause an increased production of two cellular molecules (NADPH and FMN, respectively), both of which participate in the bioluminescence process.

The increased brightness enables improved image contrast for a given exposure time (see figure below). Alternatively, the higher light emission can be used to shorten the exposure time so that more rapid changes in the cell can be observed. These findings help overcome the previous limitations of bioluminescence microscopy and open up new applications.



▲ Biolumineszenzbilder lebender HeLa-Zellen, die das bakterielle Biolumineszenzsystem enthalten. Für die Aufnahme des rechten Bildes wurden zwei zusätzliche Enzyme (Akt2CA und RFK) in die Zellen eingebracht, welche die Lichtemission steigern und so bei gleicher Aufnahmezeit den Bildkontrast verbessern.

▲ Bioluminescence images of living HeLa cells containing the bacterial bioluminescence system. For acquisition of the image on the right, two additional enzymes (Akt2CA and RFK) were introduced into the cells, which increase the light emission and thus improve the image contrast for the same recording time.

Optische Nanoskopie Optical Nanoscopy

Fortgeschrittene Bildgebungsstrategien zur Untersuchung biologischer Prozesse

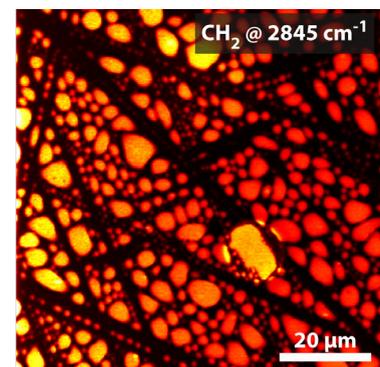
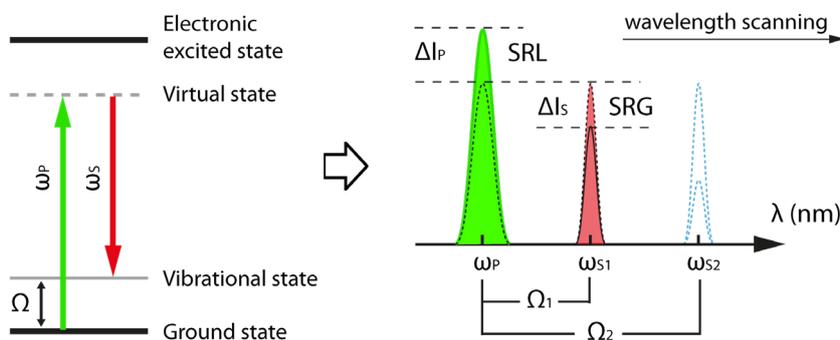
Die Analyse der biochemischen und strukturellen Eigenschaften biologischer Zellen ist entscheidend für das Verständnis zellulärer Prozesse, einschließlich morphologischer Veränderungen und metabolischer Vorgänge. Eine geeignete Kontrastmethode hierfür ist die sogenannte SRS-Mikroskopie, die den Effekt der stimulierten Ramanstreuung (SRS) nutzt und daher im Gegensatz zu fluoreszenzmikroskopischen Methoden ohne Marker auskommt.

Das Prinzip der SRS-Mikroskopie ist wie folgt: Zwei räumlich und zeitlich überlagerte, gepulste Laserstrahlen unterschiedlicher optischer Frequenz werden in die Probe fokussiert. Der Pumpstrahl (mit Frequenz ω_p) regt ein Molekül in der Probe aus dem elektronischen Grundzustand in ein virtuelles Niveau an, und der Stokes-Strahl (mit Frequenz ω_s) überführt dieses Molekül durch stimulierte Emission zurück in den Grundzustand, jedoch in ein höheres Vibrationsniveau. Die Energiedifferenz zwischen Pump- und Stokesphoton entspricht dabei dem Energieniveau dieses Vibrationszustands, dem Schwingungsmoden bestimmter Molekülararten zugeordnet werden können.

Advanced imaging strategies for studying biological processes

The analysis of the biochemical and structural properties of biological cells is essential for understanding cellular processes, including morphological changes and metabolic activities. A suitable contrast method for this is the so-called SRS microscopy, which leverages the effect of stimulated Raman scattering (SRS) and, in contrast to fluorescence microscopy methods, does not require markers.

The principle of SRS microscopy is as follows: two spatially and temporally overlapping, pulsed laser beams of different optical frequencies are focused into the sample. The pump beam (with frequency ω_p) excites a molecule in the sample from its electronic ground state to a virtual state, and the Stokes beam (with frequency ω_s) induces stimulated emission to return the molecule to the ground state, but to a higher vibrational state. The energy difference between the pump and Stokes photons corresponds to the energy level of the vibrational state, which can be associated with the vibrational modes of specific types of molecules.



Prinzip der SRS-Mikroskopie. Links: Ein Molekül wird mit Hilfe des Pumpstrahls (grün) aus dem elektronischen Grundzustand in ein virtuelles Niveau überführt. Der Stokesstrahl (rot) zwingt es mittels stimulierter Emission eines Photons zurück in den Grundzustand. Mitte: Als Messsignal dient der Intensitätsgewinn des Stokesstrahls (stimulierter Raman gain, SRG) oder der Intensitätsverlust des Pumpstrahls (stimulierter Raman loss, SRL). Rechts: SRS-Bild einer Wasser-Öl-Immersion.
Principle of SRS microscopy. Left: A molecule in its electronic ground state is elevated to a virtual level with the aid of the pump beam (green). The Stokes beam (red) forces the molecule back to the ground state through stimulated emission of a photon. Center: The measured signal is the intensity gain of the Stokes beam (Stimulated Raman Gain, SRG) or the intensity loss of the pump beam (Stimulated Raman Loss, SRL). Right: SRS signal of a water-oil immersion.

Optische Nanoskopie

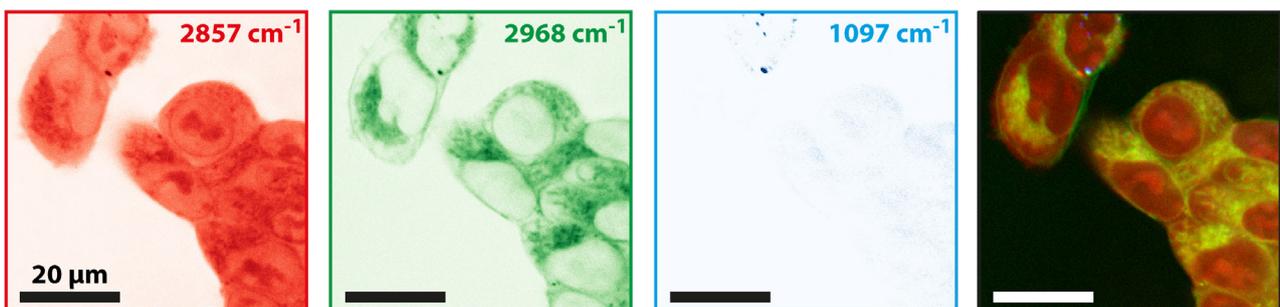
Optical Nanoscopy

Durch Variation der optischen Frequenz des Pumpstrahls lassen sich verschiedene Vibrationszustände untersuchen und so die spektroskopischen Fingerabdrücke unterschiedlicher Moleküle und Molekülbindungen in der Probe orts aufgelöst darstellen.

Im Rahmen des EU-Projekts NanoVIB kombinieren wir die SRS-Bildgebung mit der komplementären, fluoreszenzbasierten MINFLUX-Nanoskopie. In enger Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern entwickeln wir speziell angepasste und optimierte Färbe-, Beleuchtungs- und Bildgebungsstrategien. Diese Kombination molekulspektroskopischer und hochauflösender fluoreszenzbasierter Bildgebung eröffnet tiefere Einblicke in biologische Prozesse. So lässt sich beispielsweise der Einfluss der chemischen Umgebung auf die Anordnung von Proteinen in Zellen, Bakterien und Viren untersuchen. Die gewonnenen Erkenntnisse können maßgeblich zum Verständnis der Mechanismen beitragen, durch die Bakterien menschliche Zellen infizieren, und die Grundlage für die zukünftige Entwicklung krankheitsspezifischer Medikamente und Impfstoffe schaffen.

By varying the optical frequency of the pump beam, different vibrational states can be explored, enabling spatially resolved spectroscopic fingerprints of different molecules and molecular bonds within the sample.

As part of the EU project NanoVIB, we combine SRS imaging with the complementary, fluorescence-based MINFLUX nanoscopy. In close collaboration with our project partners, we are developing specifically tailored and optimized labeling, illumination, and imaging strategies. This combination of molecular spectroscopy and superresolution fluorescence-based imaging provides deeper insights into biological processes. For example, it enables the study of how the chemical environment influences the organization of proteins in cells, bacteria, and viruses. The insights gained could significantly advance our understanding of the mechanisms by which bacteria infect human cells, providing a foundation for the future development of diseasespecific drugs and vaccines.



▲ Hyperspektrale stimulierte Raman-Mikroskopie an lebenden HEK-Zellen. Durch Anpassung der optischen Frequenz des Pumplasers werden verschiedene Molekülschwingungen in der Probe untersucht, was die Erstellung einer chemischen Karte der Probe ermöglicht. Die Abbildung zeigt SRS-Bilder, für die drei charakteristischen 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. By tuning the optical frequency of the pump laser, different molecular vibrations in the sample are examined, enabling the creation of a chemical map of the sample. 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 over-layer of the single images (right) reveals the spatial distribution of the molecules, highlighting their relative arrangement within the sample.

Optische Nanoskopie Optical Nanoscopy

Nanoskopie an opaken Proben unter Verwendung von photochromen Dünnschichten

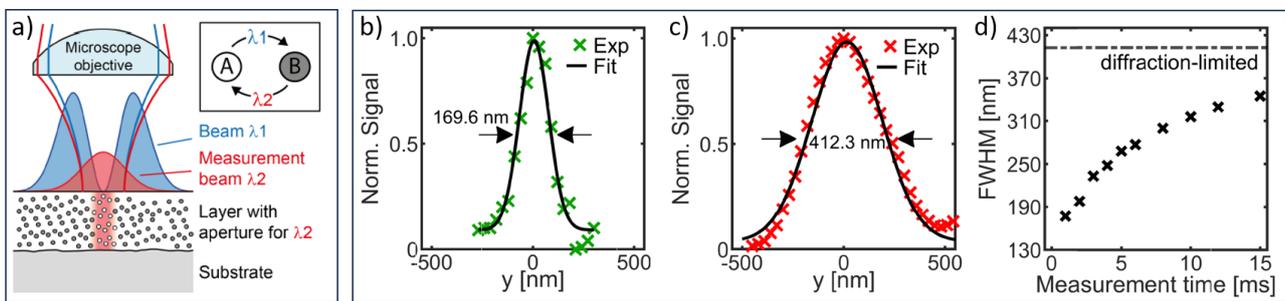
Die Eigenschaften von Verbundwerkstoffen werden maßgeblich durch ihre strukturellen Merkmale bestimmt, deren Strukturgrößen von mehreren Mikrometern bis hin zu wenigen Nanometern variieren können. Aufgrund der Beugungsgrenze reicht das Auflösungsvermögen konventioneller optischer Mikroskope für die Oberflächenanalyse solcher Materialien nicht aus. Die optische Reflexionsnanoskopie bietet einen vielversprechenden und innovativen Ansatz, um räumlich hochaufgelöst Informationen über die Probe zu gewinnen, ohne auf aufwändigere und kostspieligere Methoden wie die Rasterelektronenmikroskopie zurückgreifen zu müssen.

Die Reflexionsnanoskopie nutzt die Eigenschaft photochromer Moleküle, ihre Absorptionseigenschaften unter Bestrahlung reversibel zu verändern, und funktioniert wie folgt: Zunächst wird die zu untersuchende Oberfläche mit einer dünnen photochromen Schicht versehen, die für einen Messlaserstrahl transparent ist. Mit einem ringförmigen Laserfokus einer anderen Wellenlänge wird die Schicht dann am Rand des Rings absorbierend geschaltet, sodass im Zentrum eine enge, transparente Nanoapertur für das Messlicht entsteht.

Nanoscopy of opaque samples by means of photochromic thin films

The properties of composite materials are largely determined by their structural features, which can range in size from several micrometers to just a few nanometers. Due to the diffraction limit, the resolution of conventional optical microscopes is insufficient for the surface analysis of such materials. Optical reflection nanoscopy provides a promising and innovative approach to acquiring high-resolution spatial information from samples, without relying on more complex and expensive microscopy techniques such as scanning electron microscopy.

Reflection nanoscopy takes advantage of the property of photochromic molecules to reversibly change their absorption characteristics under irradiation, and it works as follows: First, the surface to be studied is coated with a thin photochromic layer that is transparent to the measurement laser beam. Then, a ring-shaped laser focus of a different wavelength switches the layer at the ring's edge to an absorbing state, so that a narrow, transparent nanoaperture for the measurement light forms at the ring center.



Reflexionsnanoskopie: In einer photochromen Schicht wird eine Nanoapertur für Messlicht der Wellenlänge λ_2 (rot) mit Licht der Wellenlänge λ_1 (blau) erzeugt (a). Unter Verwendung solcher Nanoaperturen weist ein Linienscan über ein Goldnanopartikel eine Breite von ca. 170 nm auf (b). Im Vergleich zum Linienscan ohne Nanoaperturen (c) stellt dies eine 2,4-fache Verbesserung der Auflösung dar.

(d) Zeitlicher Verlauf der Auflösung während des Löschvorgangs der Nanoapertur. Der erste Datenpunkt entspricht dem Liniensprofil in (b). Reflection nanoscopy: In a photochromic layer, a nanoaperture for measurement light at wavelength λ_2 (red) is generated using light at wavelength λ_1 (blue) (a). Using such nanoapertures, a line scan over a gold nanoparticle shows a width of approximately 170 nm (b). In comparison to the line scan without nanoapertures (c), this represents a 2.4-fold resolution improvement. (d) Temporal evolution of the resolution during the deletion process of the nanoaperture. The first data point corresponds to the line profile in (b).

Optische Nanoskopie

Optical Nanoscopy

Wenn die Oberfläche durch diese Nanoapertur mit Messlicht beleuchtet und das von der Probenoberfläche zurückreflektierte Signal detektiert wird, lassen sich räumlich hochaufgelöste Informationen über diesen räumlich eingegengten Bereich der Probenoberfläche gewinnen. Um die optischen Eigenschaften der Oberfläche über ein ausgedehntes Bildfeld zu analysieren, wird die Nanoapertur gelöscht und an anderer Stelle neu erzeugt.

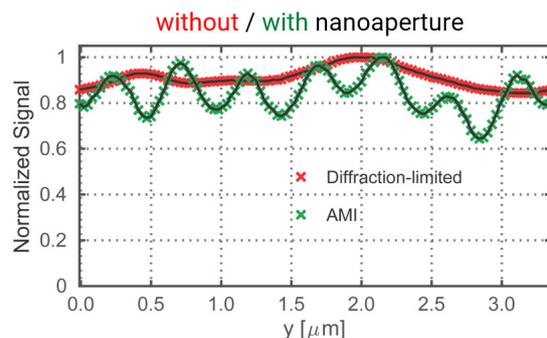
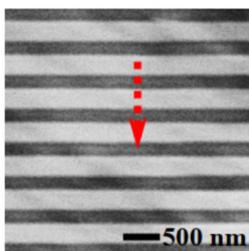
In Zusammenarbeit mit unseren Partnern der TU Clausthal und dem MPINAT konnten wir experimentell nachweisen, dass die Nanoapertur die Breite der effektiven Punktbildfunktion in einer Richtung um den Faktor 2,4 im Vergleich zum Beugungslimit reduzierte. Diese Verbesserung ermöglichte es uns, benachbarte Linien eines Reflexionsgitters, die aufgrund des Linienabstands von nur 500 nm beugungslimitiert nicht unterscheidbar sind, mithilfe der Nanoapertur klar voneinander zu trennen. Auf Basis dieses ersten experimentellen Nachweises der Reflexionsnanoskopie arbeiten wir derzeit eng mit unseren Partnern in einem von der DFG geförderten interdisziplinären Verbund an verbesserten photochromen Materialien und speziell angepassten Messprotokollen. Unser Ziel ist es, die Reflexionsnanoskopie zu einem leistungsstarken Werkzeug für die nanoskalige Untersuchung der Oberflächen nichttransparenter Materialien mit einer Auflösung im Bereich von wenigen zehn Nanometern weiterzuentwickeln.

When the surface is illuminated through this nanoaperture with measurement light, and the signal reflected from the sample surface is detected, high-resolution, spatial information from this confined region of the surface can be obtained. To analyze the optical properties of the surface across a larger field of view, the nanoaperture is erased and recreated at a different location.

In collaboration with our partners at TU Clausthal and MPINAT, we experimentally demonstrated that the nanoaperture reduces the width of the effective point spread function in one direction by a factor of 2.4 compared to the diffraction limit. This improvement allowed us to clearly distinguish the 500-nm spaced lines of a reflection grating using the nanoaperture, whereas the lines were unresolvable without it due to the diffraction limit.

Building on this first experimental demonstration of reflection nanoscopy, we are currently working closely with our partners in an interdisciplinary consortium funded by the DFG to develop improved photochromic materials and tailored measurement protocols. Our goal is to further advance reflection nanoscopy into a powerful tool for the nanoscale investigation of the surfaces of non-transparent materials, aiming for a resolution on the order of a few tens of nanometers.

Overview (AFM)



◀ Reflexionsnanoskopie an einem Linien- gitter (mit 500 nm Linienabstand). Links: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme des Liniengitters. Rechts: Vergleich der Linienprofile, die ohne (rot) und mit (grün) Nanoapertur gemessen wurden. Reflection nanoscopy of a line grating (with a 500 nm line spacing). Left: Atomic force microscopy image of the line grating. Right: Comparison of the line profiles measured without (red) and with (green) the nanoaperture.

Berichte aus der Abteilung Departmental Reports



Dr. Peter Simon
Abteilungsleiter

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

Dr. Jürgen Ihlemann
Ansprechpartner für
Nanostrukturtechnologie

T +49 551/5035-44
F +49 551/5035-99
M juergen.ihlemann@ifnano.de



MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Dr. Jörg Meinertz

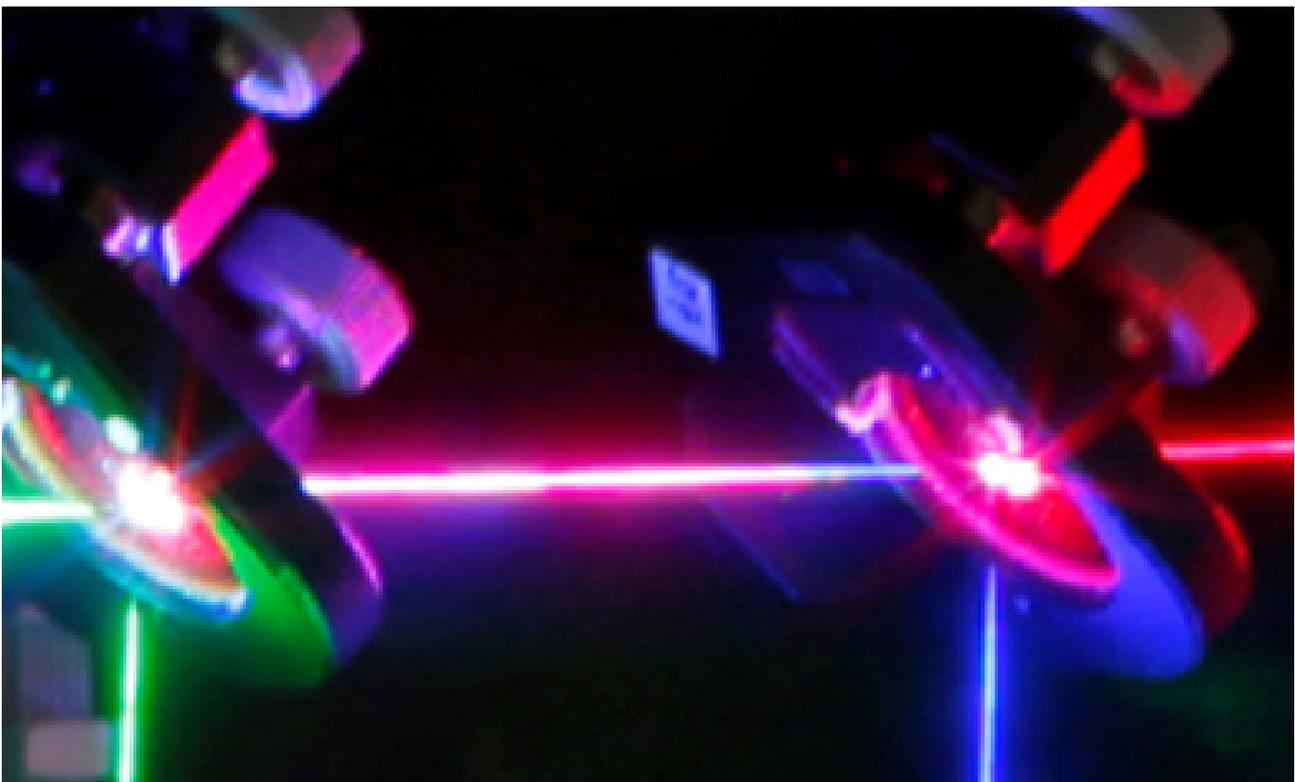
Nastaran Bakhtiari

Dr. Lukas Janos Richter

Andreas Röben

Jan-Hendrik Klein-Wiele

Hendrik Wrigge



Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Die Modifikation von Materialien durch Laserbestrahlung ermöglicht die Schaffung spezieller Strukturen sowohl an der Oberfläche als auch im Inneren transparenter Werkstoffe. Dies eröffnet zahlreiche neue Funktionalitäten und macht das berührungslose Verfahren besonders geeignet für verschiedene optische und medizintechnische Anwendungen sowie für den Bereich der Mikrofluidik und Tribologie. Durch den Einsatz von kurzen und insbesondere ultrakurzen Laserpulsen kann die Auflösung der Strukturen verbessert werden, während unerwünschte Wärmebeeinflussungen der behandelten Materialien vermieden werden. Angepasste Bestrahlungsstrategien, die Maskenprojektion, scannende Verfahren oder interferenzbasierte Strahlmanipulation kombinieren, ermöglichen es, sub- μm -Präzision bei der Bearbeitung zu erreichen.

Für die Verbesserung der Qualität und Effizienz bestehender Anwendungen sowie zur Erschließung neuer Einsatzgebiete ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung der laserbasierten Techniken von entscheidender Bedeutung. Im Fokus steht hierbei der Einsatz leistungsstarker kurzer und ultrakurzer Pulse zur Herstellung periodischer Nanostrukturen auf technischen Oberflächen.

Aktuelle Themen sind die zeitaufgelöste Messung der Reflektivität von Metallen und Halbleitern, die Entwicklung von Methoden fälschungssicheren Markierung von Oberflächen und die Entwicklung einer neuen Implementierung von gestreckten Hohlfasern. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Erzeugung und Anordnung von plasmonischen Nanopartikeln und Silizium-Nanokristallen. Darüber hinaus werden die laserbasierte Herstellung optischer Komponenten mittels subtraktiver oder additiver Verfahren und die Formgebung und Formkorrektur von Glassubstraten für optische Anwendungen untersucht.

The modification of materials through laser irradiation facilitates the creation of unique structures both on the surface and within transparent materials. This advancement introduces a wide range of new functionalities and renders the non-contact process especially suitable for various applications in optical and medical technology, as well as in microfluidics and tribology.

Utilizing short and particularly ultrashort laser pulses enhances the resolution of these structures while preventing unwanted thermal effects on the treated materials. Innovative irradiation strategies that integrate mask projection, scanning techniques, or interference-based beam manipulation enable the achievement of sub- μm processing precision.

To enhance the quality and efficiency of existing applications and to explore new areas of use, the continuous development of laser-based technologies is essential. The emphasis is on employing powerful short and ultrashort pulses for the production of periodic nanostructures on technical surfaces.

Current topics are the time-resolved measurement of the reflectivity of metals and semiconductors, the development of methods for counterfeit-proof marking of surfaces and the development of a new implementation of stretched hollow fibres. Further work is concerned with the generation and arrangement of plasmonic nanoparticles and silicon nanocrystals. In addition, the laser-based production of optical components by subtractive or additive processes and the shaping and shape correction of glass substrates for optical applications are being investigated.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

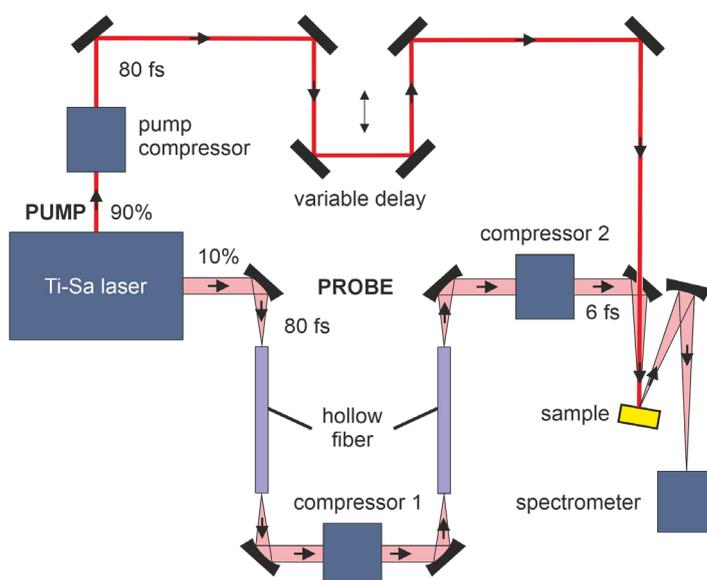
Pump-Probe-Aufbau zur breitbandigen, zeitaufgelösten Messung der Reflektivität von Metallen und Halbleitern

In den vergangenen Jahren wurde in unserer Abteilung mit starkem Fokus die Realisierung und Optimierung eines Pump-Probe-Aufbaus zur breitbandigen, zeitaufgelösten Messung der Reflektivitätsänderung während und nach der Anregung eines Probenmaterials durch einen ultrakurzen Laserpuls vorangetrieben. Dieser hat ein Entwicklungsstadium erreicht, in dem reproduzierbare, rauscharme Ergebnisse mit hoher Zeitauflösung teilautomatisiert aufgenommen und ausgewertet werden können.

Der Aufbau misst mit einer Zeitauflösung von ~ 10 fs bei einer hohen spektralen Bandbreite im sichtbaren und nahinfraroten Bereich (600 nm - 900 nm). Für die Anregung wird ein ultrakurzer Puls (~ 80 fs) bei der Wellenlänge von 780 nm verwendet, welcher mit variablen Fluenzen von bis zu 600 mJ/cm^2 die Probenoberfläche beleuchtet. Der bestrahlte Bereich wird in kleinen Zeitschritten vor, während und nach der Anregung durch einen zweiten, sehr viel kürzeren (< 10 fs) Puls abgetastet. Dieser wird mit Hilfe eines kaskadierten Hohl-faser-kompressors erzeugt (Abb. 1).

Broadband pump-probe setup for time resolved reflectivity measurement on metals and semiconductors

In recent years, our department has invested great effort in the development and optimisation of a pump-probe setup for broadband, time-resolved measurement of the reflectivity changes during and after excitation of a sample material by an ultrashort laser pulse. At the present stage of development reproducible, low-noise and high-resolution results can be recorded and analysed semi-automatically. The setup performs measurements with a temporal resolution of 10 fs at a high spectral bandwidth in the visible and near-infrared range (600 nm-900 nm). An ultrashort pulse (~ 80 fs) at a wavelength of 780 nm is used for excitation, illuminating the sample surface with variable fluences of up to 600 mJ/cm^2 . The irradiated area is sampled in small time steps before, during and after the excitation by a second, much shorter (< 10 fs) pulse. This is generated using a cascaded hollow fibre post-compressor setup (fig. 1). The pulses reflected by the sample surface are measured at different delay times between the pump and probe pulses.



◀ Abb. 1: Pump-Probe-Aufbau zur breitbandigen, zeitaufgelösten Messung der Reflektivität laserangeregter Materialien
Fig. 1: Pump-probe setup for broadband, time-resolved measurement of the reflectivity of laser-excited materials

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Die von der Probenoberfläche reflektierten Anteile dieses Pulses werden zu verschiedenen Verzögerungen zwischen anregendem und abtastendem Puls gemessen. Durch die so gewonnenen Daten können dann Rückschlüsse auf das transiente Verhalten der Probe während und kurz nach der Anregung gezogen werden.

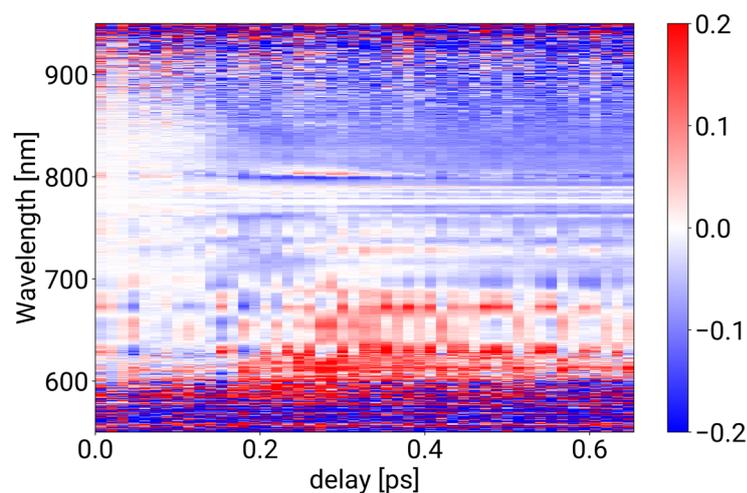
Zusätzlich ermöglicht der Aufbau eine genaue Bestimmung des zeitlichen Überlapps von anregendem und abtastendem Puls. Dies ermöglicht zum einen die genaue zeitliche Einordnung der sich in der Reflektivitätsänderung äußernden Probenantwort. Zum anderen können dadurch Messungen unterschiedlicher Messtage verglichen und untereinander gemittelt werden. Eine hohe Statistik über viele Einzelmessungen führt zu einem deutlich reduzierten Rauschen der Ergebnisdaten.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft das transiente Reflektivitätsverhalten einer LSMO Probe (Lanthan-Strontium-Manganit, ein Material, das in Brennstoffzellen Anwendung findet). Die gezeigte Farbkarte zeigt farblich kodiert die gemessene relative Reflektivitätsänderung der Probenoberfläche zu unterschiedlichen Zeitpunkten für die verschiedenen untersuchten Wellenlängen.

The data obtained in this way can then be used to draw conclusions about the transient behaviour of the sample during and shortly after the excitation.

In addition, the setup enables precise determination of the temporal overlap between the exciting and probing pulses. On the one hand, this enables the exact temporal assignment of the sample response which is expressed in the reflectivity change. On the other hand, measurements from different measurement days can be compared and averaged with each other. A high level of statistics over many individual measurements leads to a significant reduction in noise in the resulting data.

Figure 2 shows an example of the transient reflectivity behaviour of a LSOM sample (Lanthanum strontium manganite, a material used in fuel cells). The colour map shows the measured relative reflectivity change of the sample surface at different delay times over a range of different wavelengths.



▲
Abb. 2: Zeitaufgelöste Pump-Probe-Messung von Lanthan-Strontium-Manganit. Die Farbkodierung zeigt die relative Änderung des Reflexionsvermögens an. Die Probe wurde bei 780 nm angeregt. Der analysierbare Wellenlängenbereich reicht von 600 nm bis 900 nm.
Fig. 2: Time resolved pump-probe measurement of Lanthanum strontium manganite. The color coding indicates the relative change in reflectivity. The sample was excited at 780 nm. The analyzable wavelength range is from 600 nm to 900 nm.

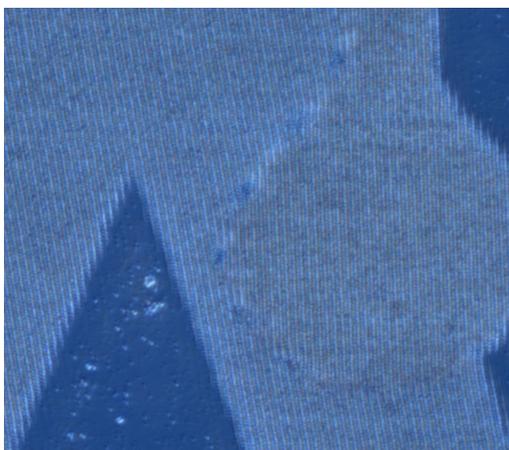
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Fälschungssichere Markierung von Oberflächen mit komplexen Motiven

Plagiate verursachen der Wirtschaft jährlich Schäden in Milliardenhöhe. Nahezu alle Branchen sind von Produktpiraterie betroffen: Markenprodukte, Ersatzteile für Autos und Maschinen, Bauteile aller Art, Medikamente etc. In den meisten Fällen sind Original und Fälschung optisch nicht zu unterscheiden, da auch die Fälscher immer bessere Techniken einsetzen. Für die Unternehmen bedeutet dies Umsatz- und Gewinneinbußen, was letztlich auch Arbeitsplätze gefährdet. Durch die meist minderwertige Qualität der Plagiate geht oft das vorhandene Vertrauen in die jeweilige Marke verloren, was langfristig den größten Schaden für die Unternehmen darstellt.

Um Plagiaten entgegenzuwirken, gibt es auf dem Markt mittlerweile vielfältige Ansätze zum Fälschungsschutz. So haben sich beispielsweise holografische Siegel in vielen Branchen etabliert. Allerdings lassen sie sich nicht auf empfindlichen oder stark beanspruchten Oberflächen anbringen. Damit bleiben ihnen wichtige hochpreisige Märkte verschlossen. Abhilfe schafft hier eine in unserem Institut entwickelte laserbasierte Beschriftungstechnologie, die es ermöglicht, diffraktive Markierungen auf der Oberfläche der meisten technischen Materialien, insbesondere auf Metallen, zu erzeugen.



Counterfeit-proof marking of surfaces with complex motifs

Counterfeiting causes billions of euros in damage to the economy every year. Almost all industries are affected by product piracy: Branded products, spare parts for cars and machines, components of all kinds, medicines, etc. In most cases, the original and the counterfeit are visually indistinguishable, as counterfeiters are also using ever better technology. For companies, this means a loss of sales and profits, which ultimately also puts jobs at risk. Due to the generally inferior quality of counterfeit products, the existing trust in the respective brand is often lost, which represents the greatest damage for companies in the long term.

In order to counteract counterfeiting, there are now a variety of approaches on the market. For example, holographic seals have become established in many industries. However, they cannot be applied to sensitive or highly stressed surfaces. This means that important high-priced markets remain closed to them. A laser-based marking technology developed at our institute provides a remedy here, facilitating diffractive markings on the surface of most technical materials, especially metals. In order to create sophisticated visual effects, complex images are to be generated that allow different partial motifs to shimmer in color depending on the viewing angle. This effect is known from holographic seals (also on banknotes). However, their master plate is typically produced using complex lithographic processes. The challenge is to achieve comparable results with a compact laser marking system, whereby the motifs created directly on material surfaces should remain changeable so that individualized features can be written quickly, flexibly and in high quality.

◀ Abb. 1: Detailaufnahme eines Bildausschnittes mit diffraktiven Strukturen (Gitterlinien). Das mikrometergenaue Aneinanderpassen verschiedener Bildbereiche mit unterschiedlichen Ausrichtungen der Gitterlinien ist deutlich zu erkennen.
Fig. 1: Close-up of an image section with diffractive structures (grating lines). The micrometer-precise matching of different image areas with different orientation of the grating lines is clearly visible.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Um anspruchsvolle visuelle Effekte zu erzielen, sollen komplexe Bilder erzeugt werden, die je nach Betrachtungswinkel unterschiedliche Teilmotive farblich schillern lassen. Dieser Effekt ist von holografischen Siegeln (auch auf Banknoten) bekannt. Deren Musterplatte wird jedoch typischerweise mit aufwendigen lithographischen Verfahren hergestellt.

Die Herausforderung besteht darin, vergleichbare Ergebnisse mit einer kompakten Laserbeschriftungsanlage zu erzielen, wobei die direkt auf Materialoberflächen erzeugten Motive veränderbar bleiben sollen, so dass individualisierte Merkmale schnell, flexibel und in hoher Qualität geschrieben werden können.

Dazu werden zunächst hochauflösende Motive grafisch entworfen. Anschließend werden bestimmte Komponenten ausgewählt und in verschiedene Layer sortiert. Mit einem angepassten Skript in der Beschriftungsroutine werden dann die verschiedenen Layer mit unterschiedlichen Ausrichtungen der Gitterlinien beaufschlagt, mit denen die jeweiligen Teilmotive gefüllt werden. Dadurch werden unterschiedliche Beugungseffekte für die betroffenen Bildteile erzeugt.

Durch eine sorgfältige Optimierung der Schreibvorrichtung hinsichtlich der mechanischen Stabilität der Komponenten, der Präzision des Stitchings und der Anpassung der Ansteuerung ist es gelungen, eine lückenlose und mikrometeregenaue Ausrichtung der verschiedenen Bildbereiche mit unterschiedlichen Gitterorientierungen zu erreichen (Abb. 1). Der Erfolg dieser Entwicklung ist in Abb. 2 dokumentiert. Sie zeigt beispielhaft ein komplexes Bild, in dem verschiedene Teile aus unterschiedlichen Beobachtungswinkeln aufleuchten. Die Nahaufnahmen sollen die räumliche Auflösung des Verfahrens verdeutlichen.

Abb. 2: Komplexes Bild, in dem verschiedene Teile unterschiedliche Gitterausrichtungen der dahinterliegenden diffraktiven Strukturen aufweisen. Die Nahaufnahmen verdeutlichen die räumliche Auflösung des Verfahrens.

Fig. 2: Complex image in which different parts exhibit different grating orientations of the underlying diffractive structures. The close-ups illustrate the spatial resolution of the technique.

For this purpose, high-resolution motifs are first designed graphically. Specific components are then selected and sorted into different layers. A customized script in the labeling routine is then used to apply different grating line orientations to the various layers, which are then used to fill the respective sub-motifs. This creates different diffraction effects for the various parts of the image.

By carefully optimizing the engraving system with regard to the mechanical stability of the components, the precision of the stitching and the adaptation of the control, it has been possible to achieve a seamless and micrometer-precise alignment of the various image areas with different grating orientations (Fig. 1). The success of this development is documented in Fig. 2. It shows an example of a complex image in which different parts light up from different observation angles. The close-ups are intended to illustrate the spatial resolution of the method.



Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Gasgefüllte Hohlfasern zur Pulskompression im fs-Bereich

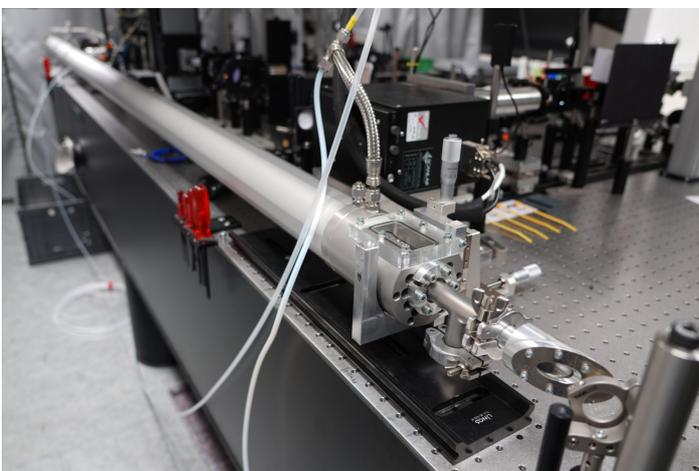
Zuverlässige Quellen für Lichtpulse mit hoher Energie und wenigen optischen Zyklen sind in der Wissenschaft auf ultrakurzen Zeitskalen von großer Bedeutung. Derzeit gibt es zwei Methoden zur Erzeugung solcher Pulse: Nachkomprimierung kurzer Laserpulse und optisch-parametrisch-gechirpte Pulsverstärkung (OPCPA). [1]

Unsere Abteilung hat sich in diesem Feld auf die Nachkomprimierung mittels gestreckter flexibler Hohlfasern spezialisiert. Kommerzielle Standartsysteme im Ultrakurzpulsbereich haben Ausgangspulslängen von einigen ps bis hin zu wenigen 100 fs. Zur zeitlichen Verkürzung dieser muss die spektrale Bandbreite der Pulse erhöht werden. Dies geschieht bei allen Nachkompressionsansätzen mit Hilfe nichtlinearer Wechselwirkungsprozesse. Bei unserem Ansatz handelt es sich dabei um die Selbstphasenmodulation (SPM), bei welchem durch nicht-lineare Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium (in unserem Ansatz einem Edelgas) neue Spektralanteile im Puls entstehen. Die Stärke dieser spektralen Verbreiterung skaliert mit der Intensität des Pulses, sowie der Wechselwirkungslänge.

Gas-filled hollow fibers for pulse compression in the fs range

Modern ultrafast science requires reliable sources of light pulses with high energy and few optical cycles. There are currently two methods for generating such pulses: post-compression of short laser pulses and optically parametrically chirped pulse amplification (OPCPA). [1]

In this field, our department has specialized in post-compression using stretched flexible hollow fibers. Commercial systems in the ultrashort pulse range have output pulse lengths of a few ps down to a few 100 fs. To further shorten these pulses, their spectral bandwidth must be increased. This is done in all post-compression systems with the aid of non-linear interaction processes. In our approach, this involves self-phase modulation (SPM), in which new spectral components are created through non-linear interaction of the pulse with a medium (in our case, a noble gas). The amount of the spectral broadening scales with the intensity of the pulse and the interaction length.



◀ Abb. 1: Typischer Aufbau eines einsatzbereiten 3 m Hohlfasersystems mit angeschlossenem Gashandling. Im unteren rechten Bereich ist der finale Spiegel zur Einkopplung in die Faser zu sehen. Dahinter beginnt der durch das Eingangsfenster abgeschlossene, mit Edelgas gefüllte Raum, in welchem der fokussierte Strahl in die Faser eingekoppelt wird.

Fig. 1: Typical setup of a ready-to-use 3 m HCF system with connected gas handling. The final mirror for coupling into the fiber can be seen in the lower right-hand area. Behind it is the space filled with noble gas, closed off by the entrance window, in which the focused beam is coupled into the fiber.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Die technische Realisierung einer solchen Verbreiterung geschieht durch Einkopplung des initialen Pulses in eine Gasgefüllte Hohlaser. Aufgrund der damit verbundenen besonderen Wellenleitungseigenschaften muss die Hohlaser extrem gerade sein und koaxial zum Eingangsstrahl verlaufen um hohe Verluste zu vermeiden. Der in unserer Abteilung entwickelte Ansatz ist dazu eine flexible Hohlaser zwischen zwei festen Punkten zu spannen (Abb. 1). Die maximale Krümmung der Faser ist dabei nur von der Spannkraft und dem spezifischen Gewicht abhängig, sodass sich mit dünnwandigen Fasern hervorragende Ergebnisse erzielen lassen, bei denen Transmissionen nah am theoretischen Maximum erreicht werden. Der verbreiterte Puls lässt sich dann mithilfe einer Kompressoreinheit auf <10 fs komprimieren. Der aktuelle Fokus in unserer Abteilung im Hinblick auf diese Technologie liegt bei der Entwicklung eines Fasermoduls für sehr hohe Durchschnittleistungen. Entwicklungserfolge in diesem Gebiet wurden in der Vergangenheit durch erfolgreich getestete Schutzelemente vor dem Fasereingang sowie der Einrichtung einer aktiven Kühlung des Systems erreicht (Abb. 2). Hiermit lassen sich Systeme bis 100 W Durchschnittsleistung bedienen. Innerhalb des ZIM-Projektes PURPLE wurde eine Modifizierung des Systems entwickelt und erprobt, welche bei deutlich höheren Leistungen einsetzbar sein soll.

[1] (Nagy, T., Simon, P., & Veisz, L. (2021). High-energy few-cycle pulses: post-compression techniques. *Advances in Physics: X*, 6(1), 1845795.)

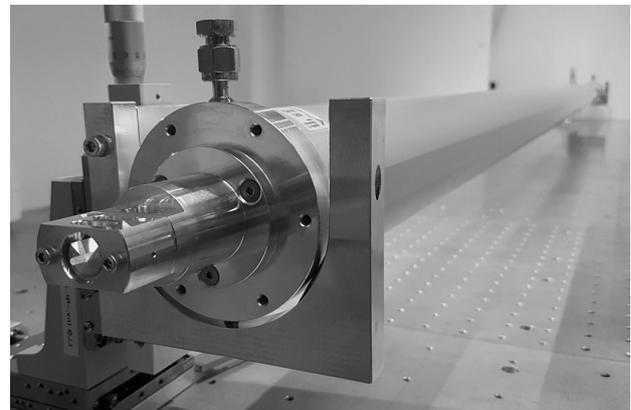
Abb. 2: Exemplarische Darstellung der Frontseite eines Hohlfaseraufbaus. Zentral zu sehen ist das vorgeschaltete Schutzelement, welches einen zuverlässigen Einsatz der Hohlaser bei höheren Leistungen ermöglicht.

Fig. 2: Front view of a hollow fiber assembly. The protective element, which enables reliable use of the hollow fiber at higher outputs, can be seen in the front.

The technical realization of such a spectral broadening is achieved by launching the initial pulse into a gas-filled hollow fiber. Due to the special waveguiding properties, the hollow fiber must be extremely straight and coaxial to the input beam in order to avoid high losses. The approach developed in our department is to stretch a flexible hollow fiber between two fixed points (Fig. 1). The maximum curvature of the fiber is only dependent on the tension force and the specific weight, so that excellent results can be achieved with thin-walled fibers, with transmissions close to the theoretical maximum. The broadened pulse can then be compressed to <10 fs using a compression stage.

Our current focus is placed on the development of a fiber module for very high average powers. Development successes in this area have been achieved in the past by successfully testing protective elements in front of the fiber input and setting up active cooling of the system (Fig. 2). This allows systems with an average power of up to 100 W to be operated. Within the ZIM project PURPLE, a modification of the system has been developed and tested for use at significantly higher power levels.

[1] (Nagy, T., Simon, P., & Veisz, L. (2021). High-energy few-cycle pulses: post-compression techniques. *Advances in Physics: X*, 6(1), 1845795.)



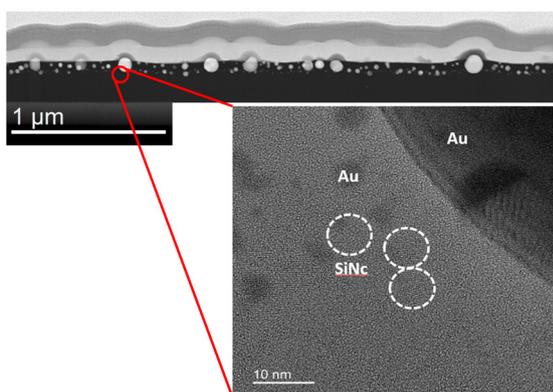
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Verstärkung der Photolumineszenz von Silizium-Nanokristallen durch plasmonische Wechselwirkung mit Gold-Nanopartikeln

Silizium ist das zentrale Material in der Mikroelektronik, doch seine direkte Anwendung in der Photonik bleibt eine Herausforderung. Aufgrund der indirekten Bandlücke eignet sich Silizium zunächst nicht als Lichtemitter. Die optischen Eigenschaften von Silizium ändern sich jedoch bei einer Reduktion auf Nanometergröße signifikant. Silizium-Nanokristalle (SiNC) ermöglichen beispielsweise eine Lichtemission, die für zukünftige photonische Anwendungen relevant ist.

In den vergangenen Jahren haben wir verschiedene Methoden entwickelt, um die Photolumineszenz (PL) von SiNC zu steigern (s. Jahresberichte 2020, 2023). Ein vielversprechender Ansatz ist die Kopplung von metallischen Nanopartikeln an die SiNC, um durch die plasmonischen Effekte eine Verstärkung der Lichtemission zu erzielen. Durch eine laserbasierte Methode lassen sich Gold-Nanopartikel (AuNp) in eine Siliziumsuboxid-Schicht (SiO_x) implantieren, welche Silizium-Nanokristalle enthält. Dadurch befinden sich die AuNp in unmittelbarer Nähe zu den SiNC, was neue Möglichkeiten zur Verstärkung der Photolumineszenz eröffnet. In Abbildung 1 ist die Oberfläche einer Siliziumsuboxidschicht zu sehen, in welche AuNp implantiert wurden. Die hügelartige Struktur ist auf nur teilweise implantierte Nanopartikel zurückzuführen.



Enhancement of Silicon Nanocrystal Photoluminescence via Plasmonic Interaction with Gold Nanoparticles

Silicon is the cornerstone material of microelectronics, yet its direct application in photonics remains challenging. Due to its indirect bandgap, silicon is not inherently suited as a light emitter. However, its optical properties change significantly when reduced to nanoscale dimensions. Silicon nanocrystals (SiNC) enable light emission, making them relevant for future photonic applications.

In recent years, we have developed various methods to enhance the photoluminescence (PL) of SiNC (see annual reports 2020, 2023). A promising approach is coupling metallic nanoparticles to the SiNC to boost light emission through plasmonic effects. Using a laser-based method, gold nanoparticles (AuNp) can be implanted into a silicon suboxide layer (SiO_x) containing silicon nanocrystals. This implantation places the AuNp in close proximity to the SiNC, creating new opportunities for enhancing photoluminescence.

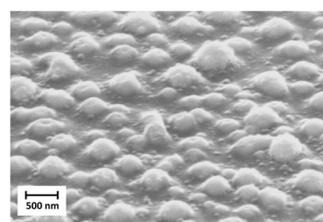


Abb. 1: Rasterelektronenaufnahme einer Siliziumsuboxidoberfläche mit teilweise implantierten Gold Nanopartikeln.
Fig. 1: Scanning electron microscopy image of a silicon suboxide surface with partially implanted gold nanoparticles.

Abb. 2: Transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Aufnahmen eines Querschnitts einer Siliziumsuboxid-Probe mit implantierten Gold-Nanopartikeln. Die Gold-Nanopartikel erscheinen als helle Kugeln im oberen Bild und sind in der Vergrößerung rechts mit „Au“ beschriftet. Die Silizium-Nanokristalle (SiNC) befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den Gold-Nanopartikeln sowie weiter darunter. Im vergrößerten Detailbild sind einige SiNC, die sich in der Nähe eines Gold-Nanopartikels befinden, speziell markiert. (Aufnahme U. Ross)

Fig. 2: Transmission electron microscopy (TEM) images of a cross-section of a silicon suboxide sample with implanted gold nanoparticles. Gold nanoparticles appear as bright spheres in the upper image, labeled as "Au" in the magnified view. Silicon nanocrystals (SiNC) are located near the gold nanoparticles and further below. In the magnified detail, several SiNC near a gold nanoparticle are specifically highlighted. (Image by U. Ross)

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

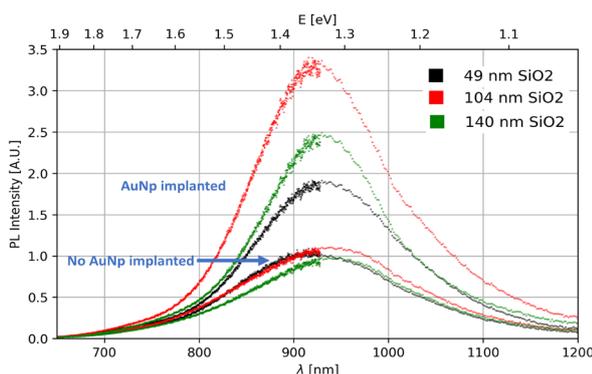
In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Seibt des IV. Physikalischen Instituts der Universität Göttingen wurden transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Untersuchungen der räumlichen Anordnung von SiNC und AuNp durchgeführt. Im Querschnitt in Abbildung 2 (TEM-Aufnahme) ist sichtbar, dass die AuNp in der SiO_x -Matrix eingebettet sind und sich direkt in der Nähe der SiNC befinden. Diese räumliche Nähe ermöglicht eine starke plasmonische Kopplung zwischen den Goldpartikeln und den Silizium-Nanokristallen.

Wie durch PL-Messungen in Abbildung 3 gezeigt steigt die Lichtemission der SiNC durch die Anwesenheit der AuNp erheblich. Die AuNp fungieren als "Antennen", die die Effizienz von Ein- und Auskoppelung des Lichts steigern und damit die Lumineszenzintensität der SiNC erhöhen. Der Verstärkungsfaktor ist dabei abhängig von der Größe und Anordnung der Goldpartikel sowie von dem Abstand zwischen den SiNC und den AuNp, der hier über die Erzeugung einer Oxidschicht variiert wurde. In der aktuellen Konfiguration konnte eine mehr als dreifache Verstärkung der Photolumineszenz beobachtet werden.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die laserbasierte Implantation von Goldpartikeln in SiNC-haltigen Oxidschichten eine vielversprechende Methode darstellt, um die Effizienz der Lichtemission von Silizium-Nanokristallen weiter zu steigern. Die Kopplung zwischen den SiNC und AuNp könnte zukünftig zur Entwicklung effizienterer photonischer Bauelemente führen und den Weg für Silizium als aktivem Emittor in der Photonik ebnen.

Figure 1 shows the surface of a silicon suboxide layer with implanted AuNp. The hill-like structure is due to partially implanted nanoparticles. In collaboration with the Seibt group at the IV. Physical Institute, University of Göttingen, transmission electron microscopy (TEM) studies were conducted to investigate the spatial arrangement of SiNC and AuNp. In the cross-section image in Figure 2 (TEM), it is evident that the AuNp are embedded within the SiO_x matrix and located in close proximity to the SiNC. This spatial arrangement enables strong plasmonic coupling between the gold particles and the silicon nanocrystals.

As shown by the PL measurements in Figure 3, the SiNC light emission increases substantially in the presence of AuNp. The AuNp act as "antennas," improving the efficiency of light in-coupling and out-coupling, thereby increasing the luminescence intensity of the SiNC. The amplification factor depends on the size and arrangement of the gold particles and the distance between the SiNC and AuNp, which was varied here by generating an oxide layer. In the current configuration, a more than threefold enhancement of photoluminescence was observed. These results demonstrate that laser-based implantation of gold nanoparticles into SiNC-containing oxide layers is a promising method for further improving the light emission efficiency of silicon nanocrystals. The coupling between SiNC and AuNp could pave the way for the development of more efficient photonic components, advancing silicon as an active emitter in photonics.



◀ Abb. 3: Photolumineszenzspektren der Silizium-Nanokristalle mit und ohne den Einfluss der implantierten Gold Nanopartikel (AuNp). Es ist eine deutliche Steigerung des Photolumineszenzsignals durch die AuNp sichtbar. Die Steigerung hängt von der angegebenen Oxiddicke an der Oberfläche ab.

Fig. 3: Photoluminescence spectra of silicon nanocrystals with and without the influence of implanted gold nanoparticles (AuNp). A significant enhancement of the photoluminescence signal due to the AuNp is evident. The enhancement depends on the oxide thickness at the surface.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Schwarze Lasermarkierung auf Glas durch Mikrostrukturierung und Phasenseparation

Wir nutzen die Bestrahlung mit einem UV-Laser, um eine tiefschwarze Markierung auf Titanoxid-haltigem Glas zu erzeugen – ein schneller und einfacher Prozess, der ohne Lithographie oder mehrschrittige Verfahren und ohne Zugabe von Fremdmaterial auskommt. Letzterer Punkt ist besonders für Anwendungen in der Medizintechnik oder Pharmazie entscheidend.

Unter bestimmten Bestrahlungsbedingungen bildet sich eine Mikrostruktur auf der Glasoberfläche, die eine Lichtstreuung bewirkt. Zusätzlich findet eine Phasenseparation statt, bei der sich titanreiche und siliziumreiche Bereiche an der Oberfläche bilden. Durch die Laserbestrahlung wird das Titanoxid zudem teilweise zu TiO_x ($x < 2$) reduziert, was die Absorption des Glases erhöht und zu einer intensiven Schwarztönung der Oberfläche führt. Die Markierung ist bei Raumtemperatur beständig. Bei hohen Temperaturen lässt sich die Reduktion des Titanoxids umkehren, sodass die Absorption stark abnimmt. In Abbildung 1 ist eine schwarze Markierung gezeigt. Durch langes Heizen im Ofen bei 500 °C bleibt lediglich der Streueffekt der Mikrostruktur erhalten.

Durch eine schräge Halterung der Probe während der Laserbestrahlung lässt sich die Ausrichtung der Mikrostruktur gezielt beeinflussen.

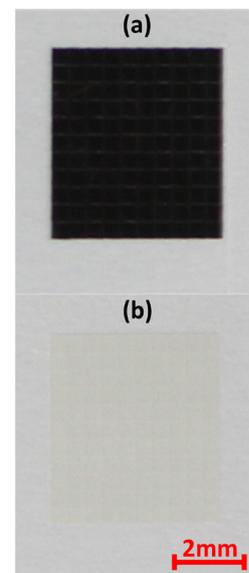
Abb. 1: Schwarze Markierung auf einer N-SF11-Glasoberfläche durch Laserbestrahlung (a). In Bildausschnitt (b) wurde die Probe 144 Stunden lang in Luft bei 500 °C geheizt. Hierdurch lässt sich die Sauerstoffreduktion des Titanoxids umkehren, sodass die Absorption abnimmt. Es ist ein deutlicher Rückgang der Schwärzung sichtbar. Die Laserparameter sind: 200 Pulse, 300 mJ/cm², $\lambda = 193$ nm.

Fig. 1: Black marking on an N-SF11 glass surface created by laser irradiation (a). In section (b), the sample was heated in air for 144 hours at 500 °C. This reverses the oxygen reduction of titanium oxide, resulting in decreased absorption. A significant reduction in blackness is visible. Laser parameters: 200 pulses, 300 mJ/cm², $\lambda = 193$ nm.

Black Laser Marking on Glass via Micro Structuring and Phase Separation

We utilize UV laser irradiation to create a deep black marking on titanium oxide-containing glass – a fast and straightforward process that requires no lithography, multistep procedures, or the addition of foreign materials. The latter is particularly critical for applications in medical technology or pharmaceuticals.

Under specific irradiation conditions, microstructures form on the glass surface, causing light scattering. Additionally, phase separation occurs, resulting in titanium-rich and silicon-rich regions on the surface. The laser irradiation partially reduces titanium oxide to TiO_x ($x < 2$), increasing the absorption of the glass and producing an intense black coloration on the surface. The marking remains stable at room temperature. At high temperatures, the reduction of titanium oxide can be reversed, significantly reducing absorption. Figure 1 shows an example of a black marking. After prolonged heating at 500 °C in an oven, only the scattering effect of the microstructure persists.



Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Die Mikrostrukturen orientieren sich dabei bevorzugt quer zur Kipprichtung, anstatt zufällig verteilt zu sein. Dies ist in Abbildung 2 durch Rasterelektronen-Mikroskop- (REM) Aufnahmen dargestellt.

Wählt man statt einer flächig homogenen eine strukturierte Laserbestrahlung, so kann man Phasenseparation und Mikrostrukturbildung auf die bestrahlten Bereiche eingrenzen. In Abbildung 3 ist die Oberfläche eines titanoxidhaltigen Glases vom Typ N-SF11 gezeigt, welche in Form eines Linienmusters mit dem Laser bestrahlt wurde: In den so erzeugten Gräben bildet titanreiches Material „Brücken“ zwischen den nicht bestrahlten Stegen. Auf den Stegen findet sich siliziumreiches Material. Somit ist eine räumlich gesteuerte Phasenseparation des Materials möglich.

Die Entwicklung dieser Laser-Markierungsmethode zeigt, dass eine schnelle, einfache und effektive Glasoberflächenmodifikation ohne Zusatzmaterial möglich ist und bietet vielseitige Optionen für Anwendungen in Bereichen, die hohe Farb- und mechanische Beständigkeit erfordern.

Using an angled sample holder during laser irradiation allows controlled alignment of the microstructure. The microstructures preferentially orient perpendicular to the tilt direction rather than being randomly distributed. This is illustrated in Figure 2 using scanning electron microscope (SEM) images. When structured laser irradiation is employed instead of uniform irradiation, phase separation and microstructure formation can be confined to the irradiated areas. Figure 3 shows the surface of a titanium oxide-containing glass (type N-SF11) irradiated with the laser in a line pattern. In the resulting trenches, titanium-rich material forms "bridges" between the non-irradiated ridges, while silicon-rich material is found on the ridges. This enables spatially controlled phase separation of the material.

The development of this laser marking method demonstrates that a fast, simple, and effective modification of glass surfaces is possible without the need for additional materials. It offers versatile options for applications requiring high color and mechanical durability.

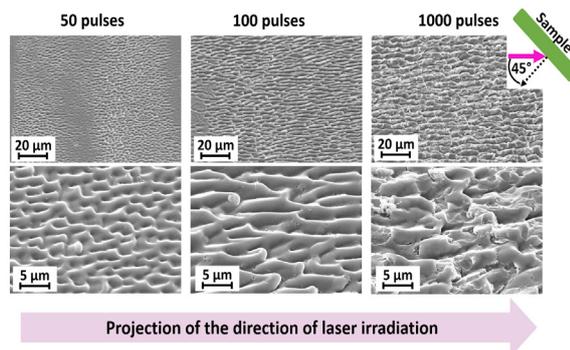


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Glasoberfläche nach Laserbestrahlung unter einem 45°-Winkel zur Oberfläche (wie in der Skizze oben rechts angedeutet). Es ist eine Ausrichtung der Struktur ersichtlich.
Fig. 2: Scanning electron microscopy images of the glass surface after laser irradiation at a 45° angle to the surface (as indicated in the sketch at the top right). The orientation of the structure is evident.

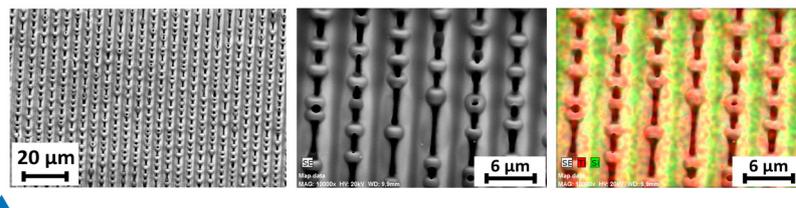


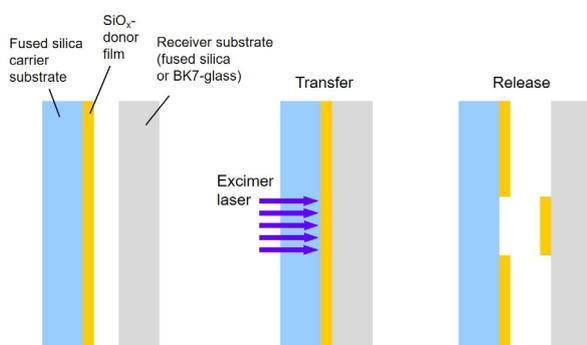
Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen nach der Laserstrukturierung mit einem Linienmuster (vertikal ausgerichtete Linien). Es kommt zu einer Brückenbildung zwischen verbleibenden Stegen, besonders in der Detailaufnahme in der Mitte erkennbar. Im rechten Bild ist die Phasenseparation des Materials durch Falschfarbendarstellung (EDX-Mapping) deutlich gemacht. Die titanreiche Phase, besonders auf den Brücken, ist in rot dargestellt. Die siliziumreiche Phase auf den Stegen ist grün dargestellt.
Fig. 3: Scanning electron microscopy images after laser patterning with a line pattern (vertically aligned lines). Bridge formation between the remaining ridges is visible, particularly in the detailed center image. The right image highlights the material's phase separation through false-color representation (EDX mapping): the titanium-rich phase, especially on the bridges, is shown in red, while the silicon-rich phase on the ridges is shown in green.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Drucken von Glas auf Glas

Die additive Fertigung von Glasprodukten wird vielfach erforscht. Die meisten Verfahren haben den Nachteil, dass der Aufbau von Glasstrukturen mit geschmolzenem Glas erfolgt, das dann zwar in einer 3D-Form erstarrt, aber prozessbedingt nicht mit einer Präzision und Oberflächenqualität wie es für die Fertigung optischer Komponenten erforderlich wäre. Wir verfolgen einen Ansatz, bei dem festes Glas auf ein festes Substrat gedruckt wird. Das Verfahren basiert auf dem so genannten laserinduzierten Vorwärtstransfer (LIFT), bei dem das Aufbaumaterial („Donor“) von einem transparenten Trägersubstrat („Carrier“) auf ein Empfängersubstrat („Receiver“) transferiert wird, indem der Donor vom Carrier durch einen rückseitigen Laserpuls gelöst und auf dem in unmittelbarer Nähe befindlichen Receiver deponiert wird (Abb. 1). Verwendet man als Donormaterial einen (festen) Glasfilm, so können aus diesem mit räumlich entsprechend geformten Laserpulsen „Glasbausteine“ ausgestanzt und auf dem Receiver abgesetzt werden. Eine besondere Herausforderung stellt die Sicherstellung der Haftung dieser Bausteine auf dem Receiver dar, insbesondere, wenn dieser auch aus Glas besteht.



◀ 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.

Abb.2: Gedruckte Phasenmasken auf BK7-Glas: Links: 700 nm SiO_x , Rechts: 500 nm SiO_x . Laserparameter: Wellenlänge 248 nm, 1 Puls pro Linie, 1,3 J/cm² bzw. 1,1 J/cm².
Fig.2: Printed phase masks on BK7 glass: Left: 700 nm SiO_x , Right: 500 nm SiO_x . Laser parameters: wavelength 248 nm, 1 pulse per line, 1.3 J/cm² and 1.1 J/cm², resp.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Als Donor-Glas verwenden wir substöchiometrisches Siliziumoxid (SiO_x , $x < 2$). Dieses kann sehr gut in Form von dünnen Filmen auf transparente Quarzglas-Carrier aufgedampft werden und hat eine hinreichende UV-Absorption, um den LIFT-Prozess mit einem UV-Excimerlaser durchzuführen. Für einen formerhaltenden Transfer sind ein enger Kontakt zwischen Donor und Receiver und eine auf Dicke und Absorptionskoeffizient des Donors abgestimmte Laserfluenz erforderlich.

Beispielsweise kann auf diese Weise eine binäre Phasenmaske additiv gefertigt werden. Durch Projektion eines Spalts wird jeweils ein Laserpuls mit einem linienförmigen Strahlquerschnitt appliziert und das gewünschte Phasengittermuster Linie für Linie aufgebaut (Abb. 2). Die Strukturhöhe und somit der Phasenhub sind durch die Filmdicke vordefiniert. Da das SiO_x im sichtbaren Spektralbereich transparent ist, kann die Phasenmaske ohne weitere Prozessierung direkt im Sichtbaren eingesetzt werden. Abb. 3 zeigt die Wirkung der Auftrennung eines HeNe-Laserstrahls in seine Beugungsordnungen. Bei angepasster Dicke (hier ca. 500 nm) erreicht man wie gewünscht hohe Beugungseffizienz in den \pm ersten Beugungsordnungen und eine Minimierung der Intensität in der nullten Ordnung.

Für Anwendungen im UV muss ein Receiver aus Quarzglas verwendet werden. Das deponierte SiO_x -Material kann dann durch einen Hochtemperaturprozess zu SiO_2 oxidiert werden, um hohe Transparenz im UV zu gewährleisten.

For the donor glass material, we use sub-stoichiometric silicon oxide (SiO_x , where $x < 2$). This material can be effectively deposited as thin films onto transparent fused silica carriers and exhibits sufficient UV absorption to perform the LIFT process using a UV excimer laser. Achieving a precise transfer requires maintaining close contact between the donor and receiver substrates, as well as carefully matching the laser fluence to the thickness and absorption coefficient of the donor material.

For instance, a binary phase mask can be fabricated additively using this method. In this application, a slit projection creates a laser pulse with a line-shaped beam profile, enabling the desired phase grating pattern to be built line by line (Fig. 2). The structure height, and thus the phase shift is predefined by the film thickness. Since SiO_x is transparent in the visible spectrum, the phase mask can be used directly in visible light without further processing. Figure 3 shows the effect of splitting a HeNe laser beam into its diffraction orders. By selecting an appropriate thickness (approximately 500 nm in this case), the desired high diffraction efficiency in the ± 1 st orders is achieved, while minimizing intensity in the 0th order.

For UV applications, a receiver made of fused silica must be used. The deposited SiO_x material can then be oxidized to SiO_2 through a high-temperature process to ensure high transparency in the UV range.

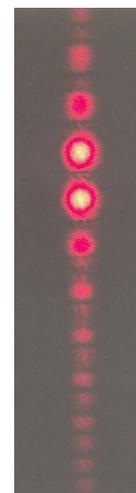
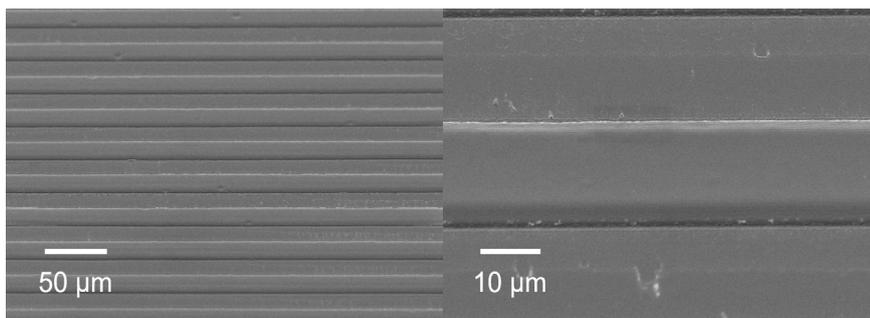


Abb.3: Beugungsmuster eines HeNe-Laserstrahls erzeugt durch eine gedruckte binäre Phasenmaske.

Fig.3: Diffraction pattern of a HeNe laser beam created by a printed binary phase mask.

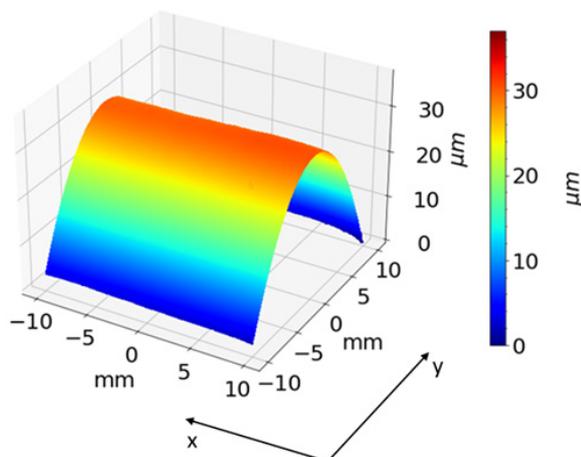
Kurze Pulse / Nanostrukturen

Short Pulses / Nanostructures

Erzeugung anisotroper mechanischer Spannungen zur Formung optischer Bauteile

Die Herstellung eines Spiegels besteht im Allgemeinen aus dem Aufbringen einer vorderseitigen reflektierenden Funktionsschicht auf ein geeignetes Substrat, z.B. aus Borosilikatglas. Aufgrund der meist unvermeidbaren Schichtspannung kommt es oft zu einer unerwünschten Verformung. Besonders kritisch ist dies, wenn dünne Substrate verwendet werden, da die induzierte Krümmung mit dem Quadrat des Kehrwerts der Substratdicke zunimmt. Ein gängiges Verfahren zur Kompensation dieser Schichtspannungen ist das Aufbringen einer rückseitigen Kompensationsschicht, was aber oft nicht zielführend ist.

Im Jahresbericht 2023 haben wir berichtet, wie es durch laserbasierte Linienstrukturierung von Glasoberflächen möglich ist, makroskopisch eine zylindrische Verformung des Substrates zu induzieren, siehe Abb. 1. Hierfür wurde ein ein ArF-Excimer-Laser ($\lambda = 193 \text{ nm}$) verwendet. Bei geeigneter Wahl der oberflächlich aufgetragenen Linienstruktur ist es dementsprechend möglich einen uniaxialen Spannungszustand zu erzeugen, der nur in einer Raumrichtung wirksam ist. Es gilt in diesem Fall für die Krümmungen: $k_y \neq 0$ und $k_x = 0$.



Generation of Anisotropic Mechanical Stresses for Shaping Optical Components

The production of a mirror generally involves applying a reflective functional coating to the front side of a suitable substrate, such as borosilicate glass. Due to the typically unavoidable film stress, undesired deformation often occurs. This issue is particularly critical when thin substrates are used, as the induced curvature increases with the square of the reciprocal of the substrate thickness. A common method for compensating these film stresses is the application of a compensating layer on the back side, which is often not effective.

In the annual report 2023, we described how laser-based line structuring of glass surfaces can be used to macroscopically induce cylindrical deformation of the substrate (see Fig. 1). For this purpose, an ArF excimer laser ($\lambda = 193 \text{ nm}$) was used. By appropriately selecting the line structure applied to the surface, it is possible to generate a uniaxial stress state that is effective only in one direction in space. In this case, the curvatures are given by: $k_y \neq 0$ and $k_x = 0$.

◀ Abb. 1: Zylindrische Verformung eines Glassubstrats durch uniaxialen Spannungseintrag. Für die Krümmungen senkrecht und parallel zu den Linien gilt $k_x = 0$ und $k_y \neq 0$. Dargestellt ist die Oberfläche der Vorderseite nach rückseitiger Laserstrukturierung mit in y-Richtung orientierten Linien.

Fig. 1: Cylindrical deformation of a glass substrate due to uniaxial stress generation. For the curvatures applies $k_x = 0$ perpendicular to the lines and $k_y \neq 0$ parallel to the lines. The surface of the front side after backside laser structuring with lines oriented in the y-direction is shown.

Kurze Pulse / Nanostrukturen

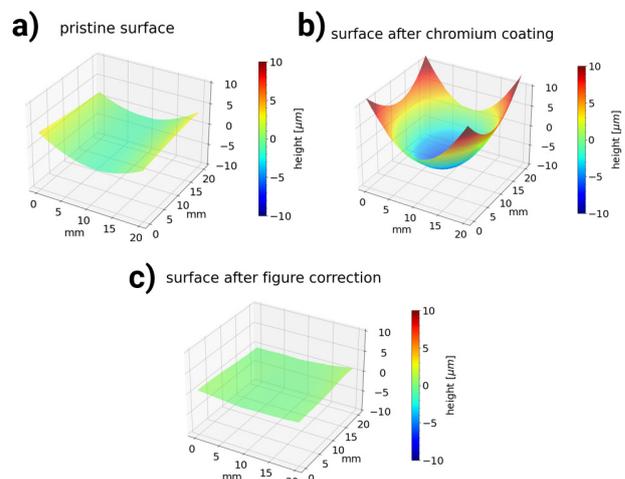
Short Pulses / Nanostructures

Wir haben diesen Umstand nun ausgenutzt, um eine absolute Formkorrektur eines Spiegels zu realisieren. Homogene Schichten induzieren einen equibiaxialen Spannungszustand: $k_y = k_x \neq 0$. Hierbei sind die Krümmungen in den Raumrichtungen identisch. Dies hat zur Folge, dass eine rückseitige Kompensationsschicht nur den Einfluss der funktionellen vorderseitigen Schicht kompensieren kann. Unser Verfahren ermöglicht es hingegen darüber hinaus auch Unebenheiten des unbehandelten Substrats zu korrigieren, die z.B. durch den Fertigungsprozess bedingt sind. Hierfür haben wir einen Demonstrator gefertigt. In Abb. 2a) ist die Oberfläche der Vorderseite eines unbehandelten, wie vom Werk ausgelieferten dünnen Glassubstrats dargestellt. Diese Vorderseite wurde anschließend mit einer zugspannungsbehafteten Chromschicht beschichtet, was zu der in Abb. 2b) gezeigten Verformung führt. Anschließend wurde anhand dieses Oberflächenprofils ein Bestrahlungsmuster berechnet, und die Rückseite des Substrats demgemäß bestrahlt. Die formkorrigierte Oberfläche ist in Abb. 2c) dargestellt. Um die Qualität des Verfahrens quantitativ zu ermitteln, wurde sowohl für das unbehandelte als auch für das formkorrigierte Substrat das quadratische Mittel (RMS) der Oberflächendeformation sowie die Peak-Valley (PV)-Deformation berechnet. Im Vergleich zum unbehandelten Glas wurde der RMS-Wert um einen Faktor 4 auf $0.3 \mu\text{m}$ reduziert, sowie die PV-Deformation um einen Faktor 3 auf ca. $1.6 \mu\text{m}$.

We have now utilized this principle to achieve absolute figure correction of a mirror. Homogeneous coatings induce an equibiaxial stress state: $k_y = k_x \neq 0$. Here, the curvatures in the spatial directions are identical. As a result, a compensating layer on the back side can only compensate for the influence of the functional coating on the front side. In contrast, our method also allows for the correction of irregularities in the untreated substrate, which may arise during the manufacturing process. For this purpose, we fabricated a demonstrator. Figure 2a shows the surface of the front side of an untreated thin glass substrate as delivered from the manufacturer. This front side was subsequently coated with a chromium layer exhibiting tensile stress, resulting in the deformation shown in Fig. 2b. Based on this surface profile, an irradiation pattern was calculated, and the back side of the substrate was irradiated accordingly. The figure-corrected surface is shown in Fig. 2c. To quantitatively assess the quality of the method, the root mean square (RMS) surface deformation and the peak-to-valley (PV) deformation were calculated for both the untreated and the figure-corrected substrate. Compared to the untreated glass, the RMS surface deformation was reduced by a factor of 4 to $0.3 \mu\text{m}$, and the PV deformation was reduced by a factor of 3 to approximately $1.6 \mu\text{m}$.

Abb. 2: Vorderseitige Oberflächen des Glassubstrates:

- a) Unbehandeltes Glas wie vom Werk geliefert
 - b) nach vorderseitiger Beschichtung mit zugspannungsbehafteter Chrom-Schicht (Funktionsschicht)
 - c) nach rückseitiger Laserstrukturierung.
- Fig. 2: Front surfaces of the glass substrate:
- a) untreated glass as delivered from the factory
 - b) after front-side coating with a tension-stressed chromium layer (functional layer)
 - c) after laser structuring on the back side.



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. Klaus Mann
Ansprechpartner für
Photothermie und
Strahlcharakterisierung

T +49 551/5035-41
F +49 551/5035-99
M klaus.mann@ifnano.de



MITARBEITENDE / STAFF MEMBERS

Dr. Bernd Schäfer

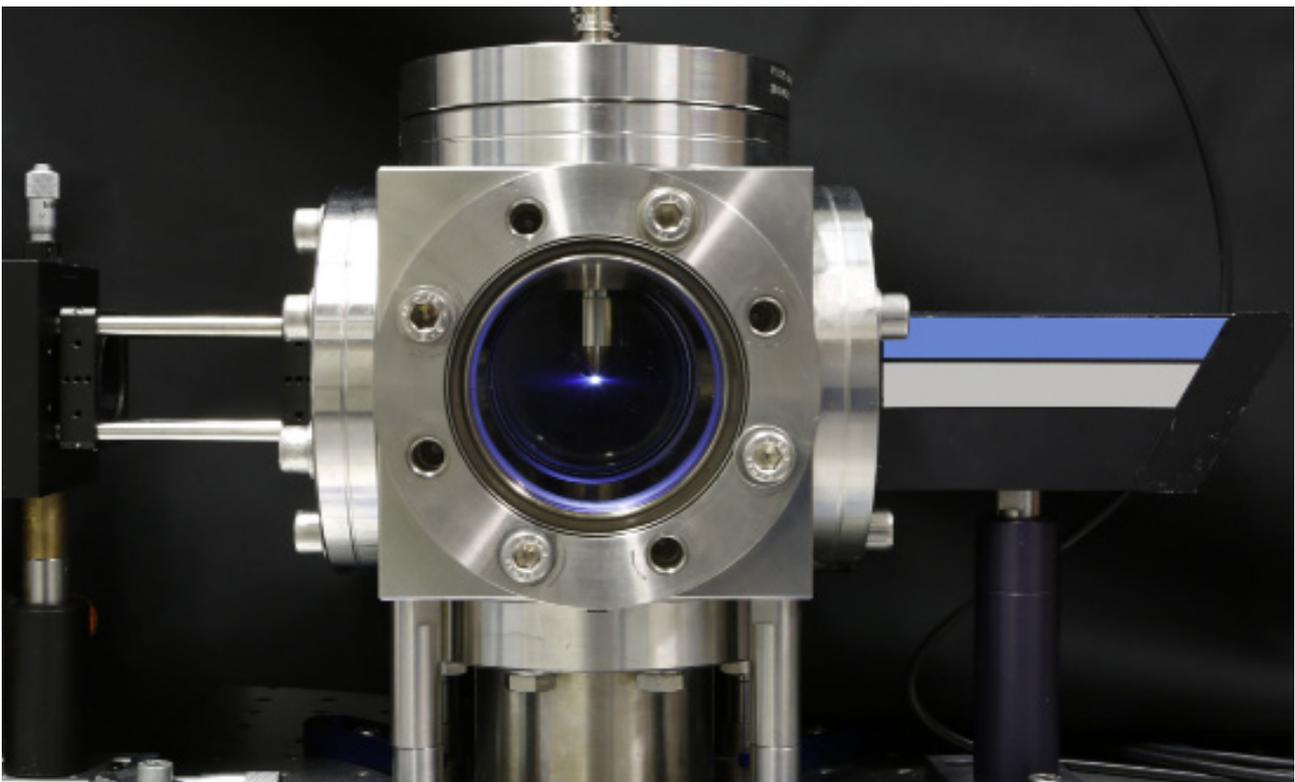
Anja Ahrens

Maik Lübbecke

Dr. Lars Sölter

Jonathan Holburg

Meike Schellhorn



Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Die Abteilung "Optik / Kurze Wellenlängen" des Instituts für Nanophotonik beschäftigt sich mit der Propagation von Laserstrahlung, der Laser-induzierten Plasma-Wechselwirkung/Strahlung sowie auch mit der Charakterisierung von Hochleistungsoptiken zur Strahlführung. Die Schwerpunkte auf Analyse und Anpassung von Abstrahlverhalten von Lasern, auf den für die Halbleiter-Lithografie relevanten tiefen UV-Wellenlängen, aber auch auf der Erzeugung und Nutzung von Photonenquellen mit hoher Konversionseffizienz im Röntgenbereich für Spektroskopie und Bildgebung bis 70 keV.

Es werden Messapparaturen zur Bewertung der Qualität und der Strahlungsstabilität optischer Komponenten betrieben. Damit lassen sich u.a. deren Absorption, thermische Linseneffekte, Zerstörungsschwellen und damit das Langzeit-Degradationsverhalten präzise ermitteln. Zusätzlich werden auch die Propagations- und Kohärenzeigenschaften von Laserstrahlung mit hochauflösenden Wellenfrontsensoren vermessen. Die Weiterentwicklung kompakter Quellen für EUV-, weiche und harte Röntgenstrahlung ermöglicht diverse messtechnische und analytische Anwendungen (Absorptions-spektroskopie zur chemischen Analytik (NEXAFS), Reflektometrie, Röntgenmikroskopie und hochauflösende 3D-Bildgebung mit hoher Penetrationstiefe). Die Fokussierung der kurzwelligen Strahlung mit geeigneten Optiken gestattet zudem Stabilitätstests auch an EUV-optischen Materialien und Sensoren etwa bei Wellenlängen um 13,5 nm oder kürzeren Wellenlängen. Unter Beibehalt der bisherigen Ausrichtung der Abteilung werden weitere Forschungsschwerpunkte im Bereich Laser-Target Plasma-Wechselwirkung, zeitaufgelöste Röntgenspektroskopie, Erzeugung und Charakterisierung ultra-kurzer Pulse jenseits der Femtosekunde sowie hochauflösende Röntgenbildgebung gesetzt und ausgebaut.

The "Optics / Short Wavelengths" department of the Institut für Nanophotonik deals with the propagation of laser radiation, laser-induced plasma interaction and radiation as well as the characterization of high-performance optics Beam guidance. The focus is therefore on analyzing and adapting the radiation behavior of lasers, on the deep UV wavelengths relevant for semiconductor lithography, but also on the generation and use of photon sources in the soft, tender, and hard X-ray range for spectroscopy and imaging. Photon energies from 1 eV to 70 keV shall be generated efficiently utilizing laser-driven plasma X-ray sources.

Various measuring devices for assessment of the efficiency and stability of heavily loaded optical components are operated. This allows, among others, at-wavelength determination of laser-induced damage thresholds, thermal lensing, as well as monitoring of absorption and degradation behavior. In addition, the propagation and the coherence properties of laser radiation are precisely characterized with the help of specially designed Hartmann-Shack wavefront sensors.

Furthermore, compact EUV / XUV / X-ray sources for metrological and analytical applications are being developed (optics testing, reflectometry, NEXAFS for chemical analysis, "water window" microscopy, and hard X-ray 3D-imaging with greater penetration depth). Stability tests of EUV optics and sensors at 13.5 nm are accomplished by focusing the short wavelength radiation with the help of appropriate optical elements. While maintaining the previous direction of the department, further research focuses in the area of physics of laser-target plasma-interaction, time-resolved X-ray spectroscopy, generation, and characterization of ultra-short pulses beyond the femtosecond, as well as expanding high-resolution X-ray imaging into the ultra-short timescale regime.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Charakterisierung von Laseroptiken

Ziel der über 20-jährigen Aktivitäten zur Optik-Charakterisierung ist es, durch ein tieferes Verständnis der Wechselwirkungsmechanismen zwischen intensiver Laserstrahlung und optischen Materialien eine Optimierung der Herstellungs- und Beschichtungsverfahren zu ermöglichen. Während dabei früher aufgrund akuter Materialprobleme die Messung der makroskopischen Zerstörschwelle (engl. LIDT-Messungen, siehe Abb. 1) im Vordergrund stand, ist jetzt die Degradation optischer Materialien bei den für die Halbleiter-Lithografie relevanten DUV-Wellenlängen (z. B. durch Farbzentrenbildung oder nichtlineare Effekte) von großer Bedeutung. Zusätzlich spielt angesichts stetig steigender mittlerer Laserleistungen die Deformation der Wellenfront aufgrund thermischer Effekte in den Optiken eine immer größere Rolle.

Laser optics characterization

The aim of the activities on optics characterization carried on for about 20 years now is to provide a deeper understanding of the basic mechanisms of interaction between intense laser radiation and optical materials, in order to optimize the manufacturing and coating processes. While in earlier times major focus had to be put on measuring of short-term damage thresholds (LIDT tests, see Fig. 1), now the degradation of UV optical materials e.g. by color center formation or non-linear effects is of great importance, especially for the semiconductor lithography wavelengths 248 and 193 nm. In addition, due to steadily increasing laser powers, the thermally induced wavefront deformation in laser optics has become an issue of increasing relevance.

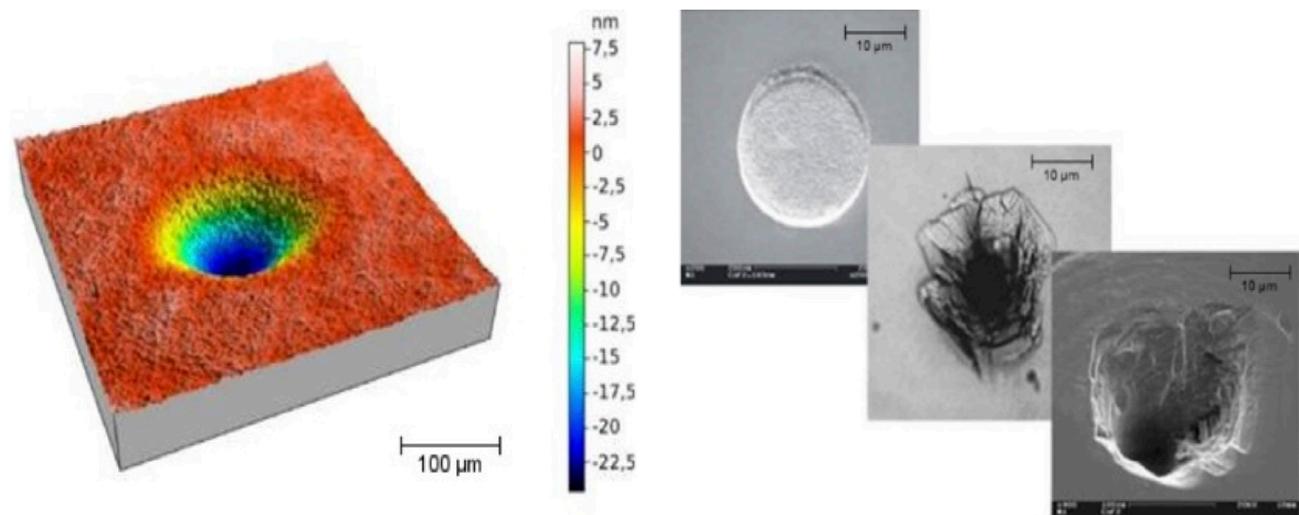


Abbildung 1: (links) Kompaktierung einer Quarz-Probe durch ArF-Excimerlaser-Bestrahlung (108 Pulse, Weißlicht-Interferogramm) und (rechts) morphologische Schädigungen optischer Komponenten bei der LIDT-Bestimmung
 Fig. 1: (Left) Compaction of a quartz sample under ArF excimer laser irradiation (108 pulses, white light interferogram) and (right) morphological damages of optical components after LIDT testing.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Als Schlüsselparameter für die Stabilität optischer Materialien ist die Absorption anzusehen: Die im Volumen und vor allem an der Oberfläche bzw. der Beschichtung von Optiken absorbierte Laserstrahlung führt zu einer inhomogenen Temperaturverteilung, die infolge thermischer Ausdehnung sowie Brechungsindexgradienten und inneren Spannungen im Material mit dem Auftreten einer "thermischen Linse" verbunden ist. Dieser unerwünschte Effekt lässt sich zur quantitativen Bestimmung der Absorption optischer Materialien nutzen. Hierzu wurde ein auf Wellenfrontmessungen mit einem hochempfindlichen Hartmann-Shack-Sensor basierendes photothermisches Messsystem entwickelt und in den letzten Jahren zur Absorptionsmessung bei zahlreichen relevanten Laser-Wellenlängen im NIR, VIS- und UV-Bereich eingesetzt (siehe Abb. 2). Der experimentelle Aufbau wurde zuletzt um ein Probenpositioniersystem erweitert, sodass die Absorption nun auch ortsaufgelöst erfasst werden kann (siehe Konturdarstellungen).

Key parameter for the stability of optical materials is the absorption: The absorbed laser radiation in the bulk and especially on the surface or coating of optics leads to an inhomogeneous temperature distribution which is, due to thermal expansion, refractive index gradients and internal stresses in the material, associated with the occurrence of a "thermal lens". This undesirable effect can, however, be employed for a quantitative determination of the absorption of optical materials. For this purpose, a photothermal measuring system based on wavefront measurements with a high-sensitive Hartmann-Shack sensor was developed and applied in recent years for absorption measurements at several relevant laser wavelengths in the NIR, Vis and UV range (see Fig 2). Recently, the experimental setup was extended by a sample positioning system which allows the measurement of spatially resolved absorption (see contour plots).

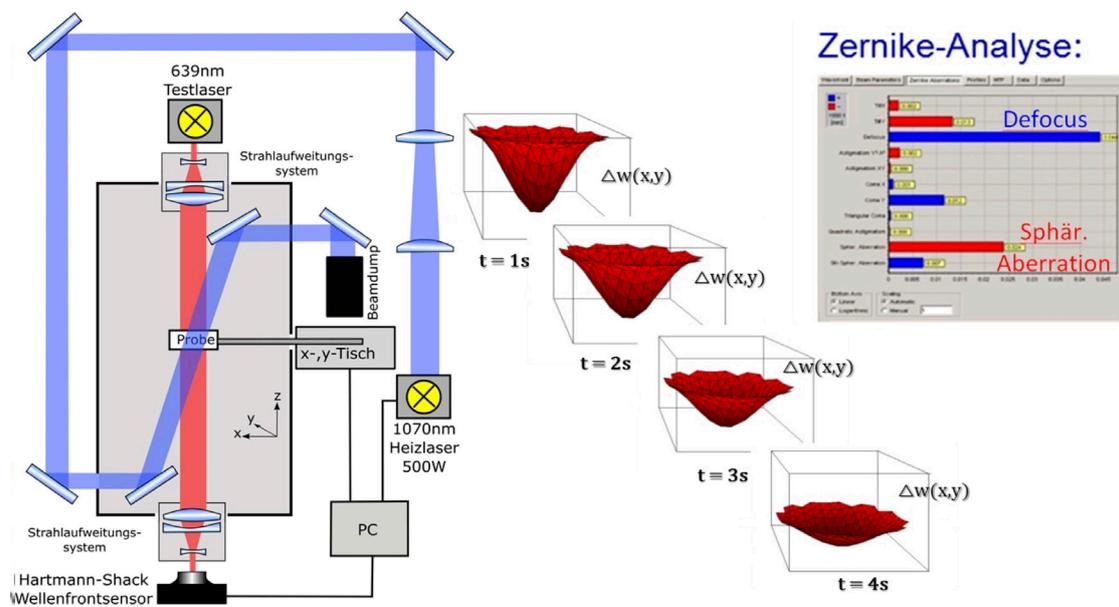


Abbildung 2: Aufbau des photothermischen Messsystems zur quantitativen Auswertung des 'Focus shift'-Effekts und der induzierten Aberrationen.

Fig. 2: Setup of the photothermal measuring system for quantitative evaluation of the focus shift effect and the induced aberrations.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

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. 3). 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.

X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS)

Based on a compact soft X-ray source, a high-resolution table-top system for X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS = Near Edge X-ray Absorption Fine Structure) was developed for the wavelength range of $\lambda = 1\text{--}5\text{ nm}$ (see Fig. 1). A broadband emitting laser-induced krypton plasma is used as a beam source. Thin samples can be measured in transmission and investigated element-specifically at different absorption edges (e.g. C, N, O, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu). The fine structure at the absorption edges contains information about bonding states of the absorbing sample and can therefore be used for chemical analysis.

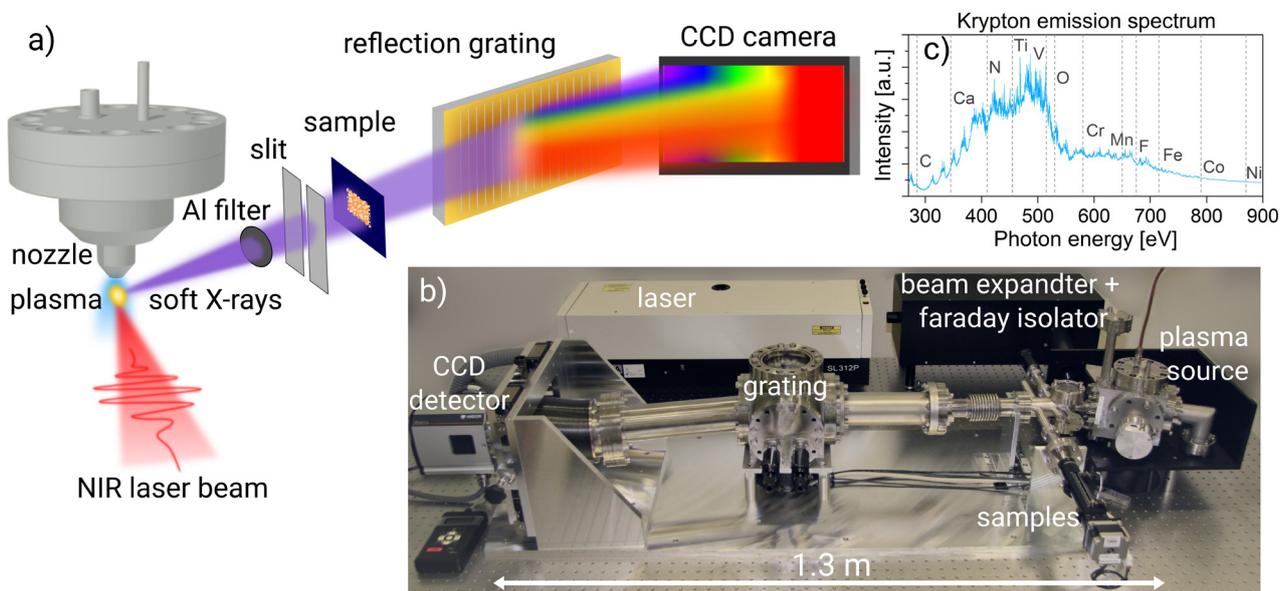


Abb. 3: (a) Schematisches Prinzip des Röntgenabsorptionsspektrometers und (b) Foto des kompakten Laborsystems. (c) zeigt das erzeugte Krypton Emissionsspektrum mit ausgewählten Absorptionskanten in diesem Spektralbereich.

Fig. 3: (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.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Die Proben können dabei entweder im Vakuum oder an einer eigens für das kompakte Spektrometer entwickelten Helium-Probenkammer unter Atmosphärendruck untersucht werden. Im Rahmen des DFG-Projekts NEXAFS konnte die Brillanz der Röntgenquelle deutlich verbessert werden, sodass qualitativ hochwertige Spektren in wenigen Minuten erzeugt werden können. Zudem wurde die Auflösung des Spektrometers um einen Faktor 3 gesteigert, sodass nun mit dem kompakten Laborsystem Spektren in vergleichbarer Qualität zu Messungen am Synchrotron durchgeführt werden können (siehe Abb. 4).

The samples can be analysed either in vacuum or at atmospheric pressure on a specially developed helium sample chamber for the compact spectrometer. Within the DFG NEXAFS project, the brilliance of the X-ray source was significantly improved so that high-quality spectra can be generated in a few minutes. In addition, the resolution of this spectrometer was increased by a factor of more than 3, so that spectral investigations of comparable quality to measurements at the synchrotron can now be performed with our compact table-top setup (see Fig. 2).

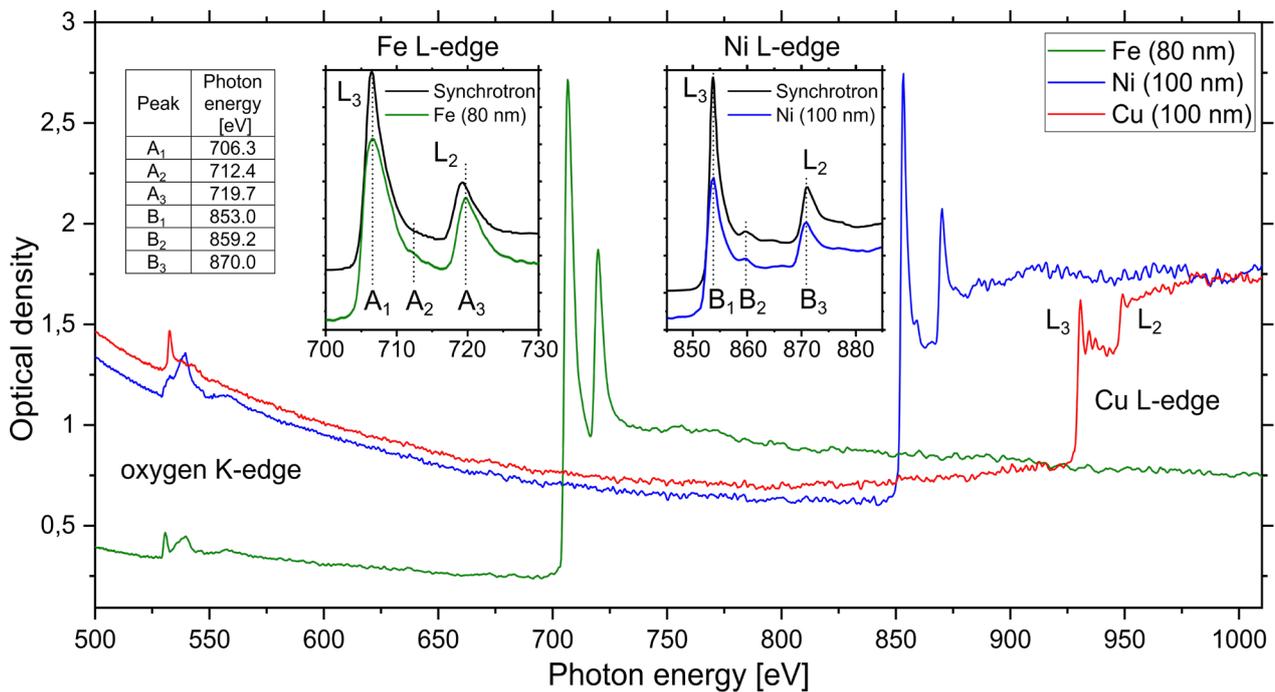


Abb. 4: Röntgenabsorptionsspektren für dünne Fe-, Ni- und Cu-Schichten auf Si₃N₄-Membranen, untersucht an ihren L-Absorptionskanten und an der Sauerstoff-K-Kante (akkumuliert über 750 Pulse). Zum Vergleich sind Messungen am Synchrotron dargestellt, welche die Gesamtelektronenausbeute von Eisen und Nickel zeigen. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen.

Fig. 4: 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.

Optik / Kurze Wellenlängen Optics / Short Wavelengths

Kompakte laserproduzierte Plasmaquelle zur hochauflösenden Spektroskopie im weichen und mittleren Röntgenbereich mittels Flachstrahl-Probenzuführung (KOPAS)

Im BMBF-geförderten "KOPAS" Projekt soll eine laser-gestützte Plasmaquelle für die Spektroskopie im weichen und mittleren Röntgenbereich entwickelt werden. Die Neuentwicklung eines Lasers und Targets wird Strahlung höherer Energie erzeugen. 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. Die hierbei vorhandenen Erfahrungen und gewonnenen Erkenntnisse aus der Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS) F&E der vergangenen Jahre in der Abteilung bilden eine wertvolle Grundlage zur erfolgreichen Umsetzung des Vorhabens in den nächsten 2 ½ Jahren.

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. Das Gerät soll die genaue Vermessung der Röntgenabsorptionskanten im Energiebereich von < 1 keV bis ca. 3 keV und somit eine erschwingliche und kompakte Analytik für viele wichtige chemische Elemente (u.a. C, Ca, N, O, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, S) ermöglichen, welche von großem Interesse in Bereichen der Biologie, Medizin, Geologie und der Entwicklung neuer funktionaler Materialien ist.

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

The BMBF-funded "KOPAS" project aims to develop a laser-based plasma source for spectroscopy in the soft and tender X-ray energy regime. The new development of a laser and target will produce higher energy radiation. The enhanced spectrometer aims to achieve a resolution and sensitivity that is qualitatively comparable to synchrotron measurements. In addition, a novel method will be researched to examine liquid or substances dissolved in liquid in a vacuum. The experience and knowledge gained from X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS) R&D over the past few years in the department form a valuable basis for the successful implementation of the project in the next 2 ½ years.

At the end of the project, a table-top system consisting of a radiation source, spectrometer and optional liquid jet for continuous sample delivery should be available as a very compact unit for the first time in the world. The device is intended to accurately measure the X-ray absorption edges in the energy range from < 1 keV to approx. 3 keV and thus provide affordable and compact analysis for many important chemical elements (including C, Ca, N, O, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, S), which is of great interest in the areas of biology, medicine, geology and the development of new functional materials.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths



Abb. 5: Kompakter Laboraufbau zur hochauflösenden Röntgenabsorptionsspektroskopie, Bild: Institut für Nanophotonik Göttingen e.V. & Advanced Microfluidic Systems GmbH.
 Fig. 5: Compact laboratory setup for high-resolution X-ray absorption spectroscopy. Image: Institute for Nanophotonics Göttingen e.V. & Advanced Microfluidic Systems GmbH.

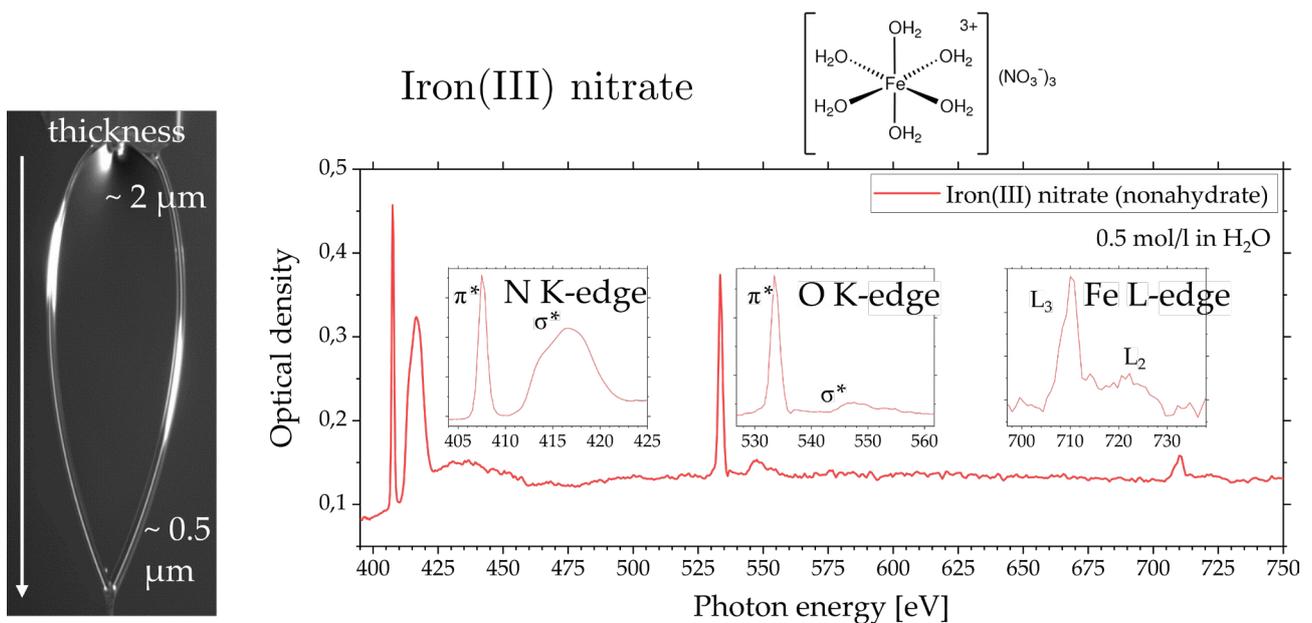


Abb. 6: Links ist eine dünne Flüssigkeitslamelle abgebildet, die zur Bereitstellung flüssiger Proben im Vakuum verwendet wird. Rechts ist ein an dieser Lamelle gemessenes Spektrum von in Wasser gelöstem Eisen(III)-Nitrat dargestellt, das die verschiedenen Absorptionskanten zeigt.
 Fig. 6: A thin liquid 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 different absorption edges.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / Short Wavelengths

Automatisierte Justage von FEL-Fokussieroptiken mit Hilfe von „machine-learning“-Algorithmen (FELFocus)

Innerhalb des im Oktober 2022 begonnenen BMBF-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 Freien 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. 7) 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.

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

Within the BMBF project "FELFocus" which started in October 2022, a measuring and control system for the automated adjustment of Kirkpatrick-Baez (KB) optics on the FEL beam from FLASH II shall be developed. The system is intended for the improvement of the "in-focus" beam quality. Furthermore, the time and personnel required for the adjustment shall be significantly reduced.

The basic idea of the approach (see Fig. 7) is to calculate the current beam parameters for a given set of actuator positions using a Hartmann wavefront sensor, and to use them as input to a self-learning algorithm in order to solve the inverse problem.

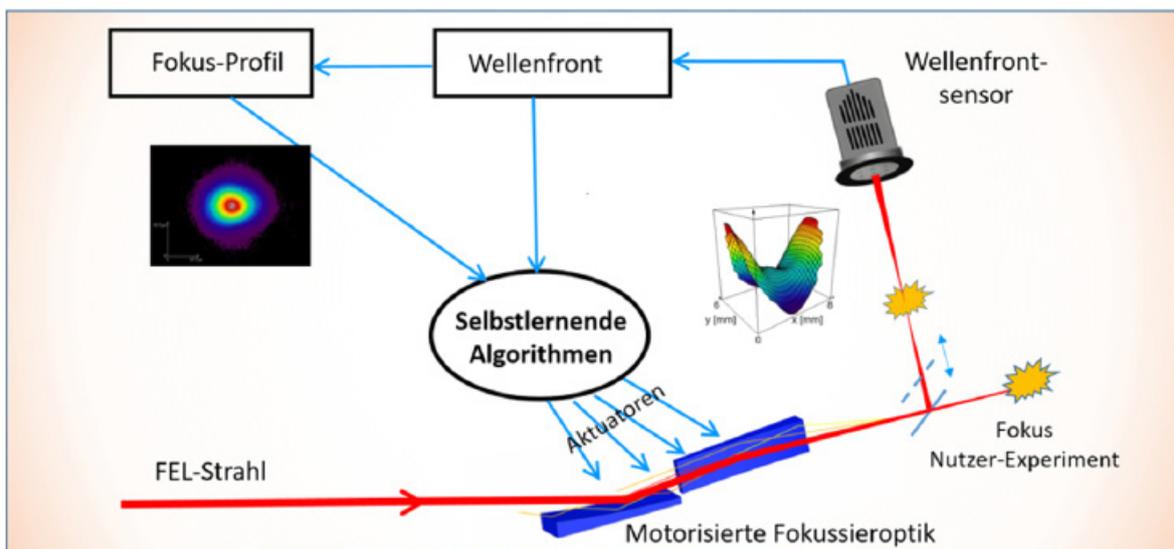


Abb. 7: Prinzip der automatisierten Justage von FEL-Fokussieroptiken am Beispiel der Kirkpatrick-Baez-Spiegelanordnung an FL24 / FLASH 2 mit 14 Aktuatoren. Ein beweglicher Planspiegel im FEL-Strahlengang ermöglicht die Aufnahme und Rekonstruktion von Wellenfront und Strahlprofil mit einem Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor. 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. 7: Planned procedure for the automated adjustment of FEL focusing optics, illustrated for the Kirkpatrick-Baez mirror system of FL24 / FLASH 2 (14 actuators). By means of a plane mirror to be moved into the FEL beam path, its wave front can be registered by a Hartmann Shack wave-front 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.

Optik / Kurze Wellenlängen

Optics / 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. Ferner sollen Messungen zum Test und zur Qualifizierung des Systems durchgeführt werden. Nach erfolgreicher Validierung sind zusätzlich Vorarbeiten zum Transfer des Systems an weitere Beamlines (z.B. European XFEL) bzw. Adaption an andere Optiken (Ellipsoid-Spiegel, adaptive Systeme) geplant.

The main challenge lies in the large number of coupled degrees of freedom (up to 14 for a KB optics) and the non-linear relationship between mirror position and beam parameters. As part of the Ifnano sub-project, a suitable EUV wavefront sensor with a large detector area is to be developed. In addition, work is planned to specify an optimal parameter space as well as the physical/optical modeling of the KB system and the programming of the interface to the hardware on FLASH. Furthermore, from the second half of the project, measurements are to be carried out to test and qualify the system. After successful validation, additional preliminary effort is planned for transferring the system to other beamlines (e.g. European XFEL) or adapting it to other optics (ellipsoid mirrors, adaptive systems).

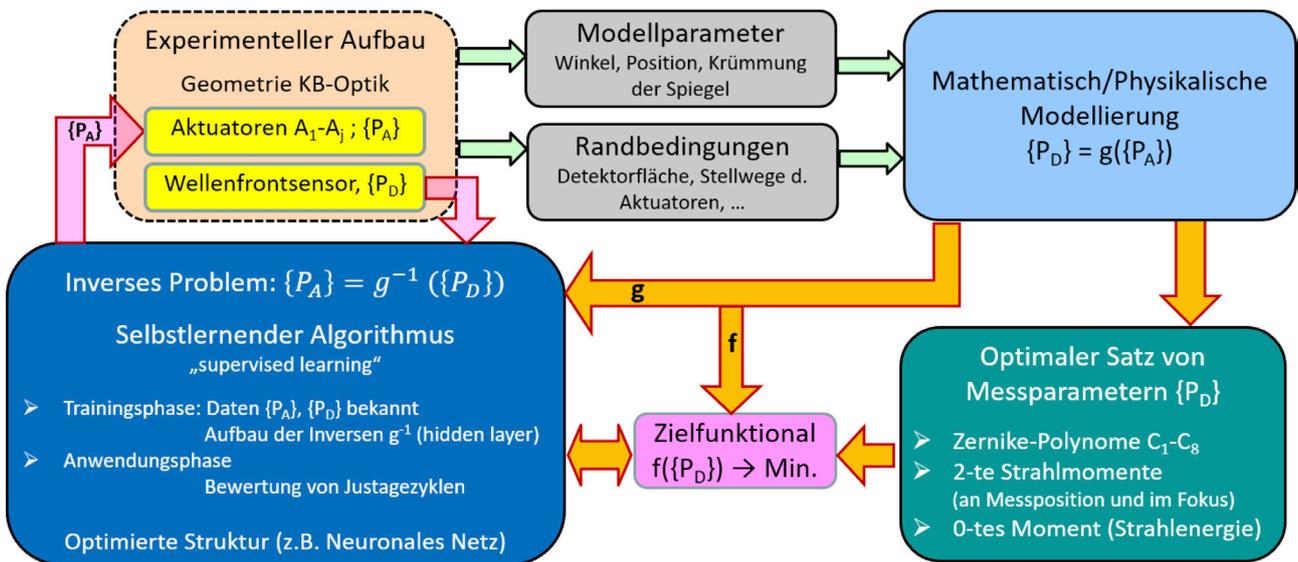


Abb. 8: Blockdiagramm der Teilsysteme und Abhängigkeiten innerhalb der Lösungsstrategie zur optimalen und automatisierten Justage der FEL- Fokussieroptik. Ausgehend von der experimentellen Anordnung und einer Modellierung des optischen Systems (Vorwärtsrichtung) soll ein optimaler Satz von Strahlparametern sowie ein Zielfunktional bestimmt und als Input eines selbstlernenden Algorithmus zur Lösung des inversen Problems verwendet werden.

Fig. 8: Block diagram of the subsystems 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 functional target shall be determined in order to serve as input information to the "self-learning" algorithm for solution of the inverse problem.

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

Dr. Georgios Ctistis

Junsung Kim

Stefan Scholz

Mohammed Dagher

Christian Niklas

Pascal Schröder

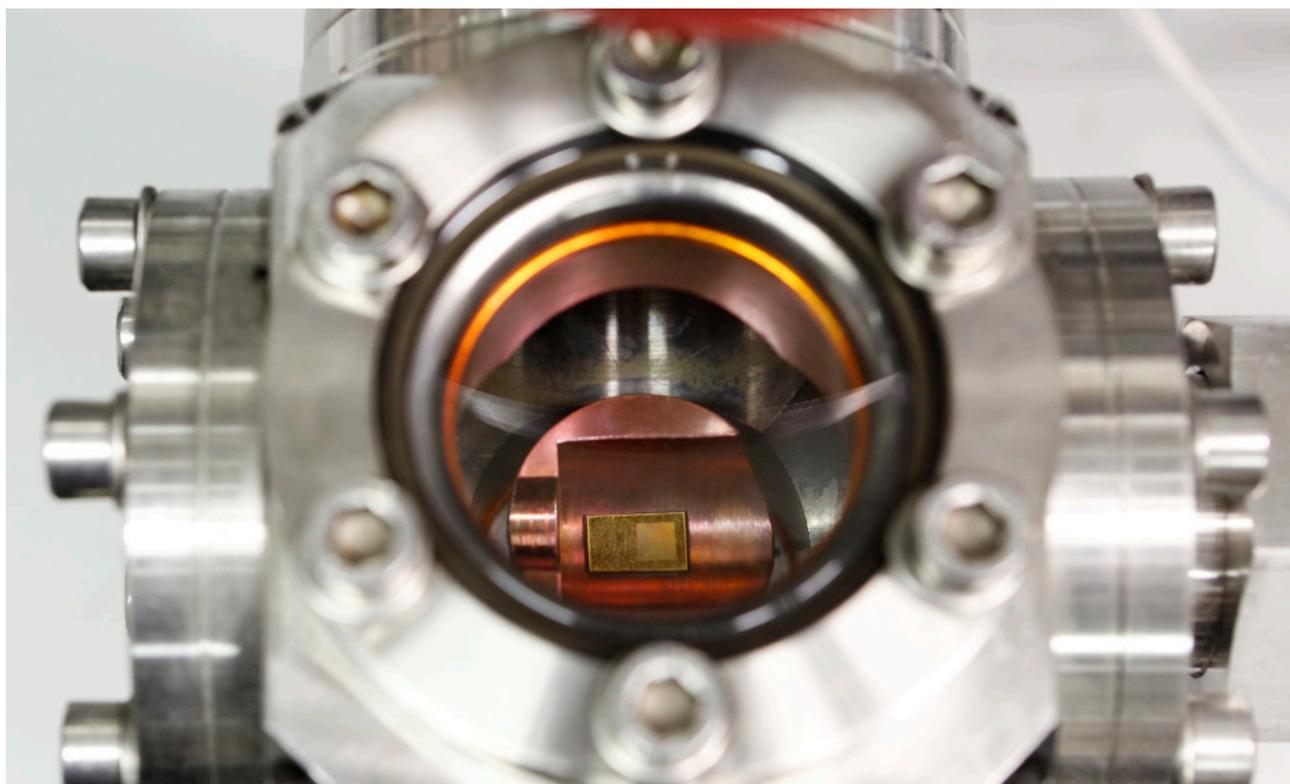
Dr. Jan Geweke

Fabian Merker-Müller

Florian Wieduwilt

Dr. Christoph Lenth

Felix Müller



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 ein Detektionsverfahren entwickelt, mit dem auf Basis der Ionenmobilitätsspektrometrie sicher Senfgas im Sediment von Ost- und Nordsee nachgewiesen werden kann. Im Bereich der Prozessanalytik werden unterschiedliche optische Verfahren in der Kautschukproduktion angewandt, von der Qualitätskontrolle der Ausgangsstoffe bis nach der Extrusion. Mittels Datenfusion und Digitalisierung soll die Produktion optimiert und so die Reproduzierbarkeit der Produktqualität erhöht werden.

Schließlich 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. 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 analysis, a detection method is being developed that enables the reliable identification of mustard gas in sediments from the Baltic and North Seas using ion-mobility spectrometry. In process analytics, various optical techniques are applied in rubber production, from raw material quality control to post-extrusion. Through data fusion and digitalization, production is to be optimized, enhancing the reproducibility of product quality.

Finally, 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.

Automated data analysis methods based on artificial intelligence are being developed for all these different analytical techniques.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Eine neue Analysenmethode für Munitionsaltlasten im Meer

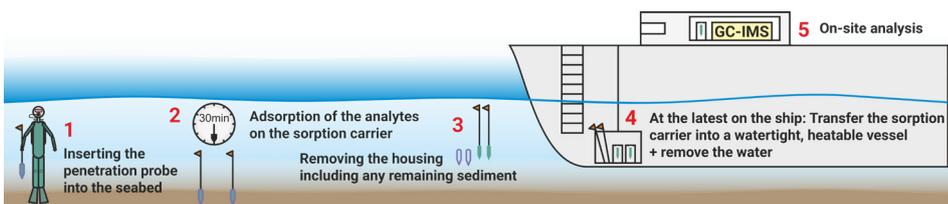
Selbst 75 Jahre nach Ende des Zweiten Weltkriegs liegen noch immer große Mengen an Munitionsaltlasten in der deutschen Nord- und Ostsee. Darunter befinden sich mindestens 212.000 Tonnen chemische Kampfmittel, häufig Substanzen wie Bis(2-chlorethyl)sulfid (bekannt als Senfgas). Durch fortschreitende Korrosion der metallischen Hüllen steigt die Gefahr, dass diese Stoffe in die Umwelt freigesetzt werden. Diese Altlasten stellen somit eine dauerhafte Gefahr für die Umwelt und für Menschen dar, die in der Fischerei oder der maritimen Infrastruktur arbeiten.

Wir präsentieren hier eine neuartige Extraktionstechnik für die Probennahme, die das Gefahrenpotential dieser Kampfstoffe berücksichtigt. Insbesondere wird das Aufwirbeln von Sediment an die Meeresoberfläche und damit die Freisetzung und Aktivierung des luftgetragenen Kampfstoffs Bis(2-chlorethyl)sulfid vermieden. Stattdessen wird Bis(2-chlorethyl)sulfid direkt im Sediment an einem beschichteten Metallzylinder, dem sogenannten

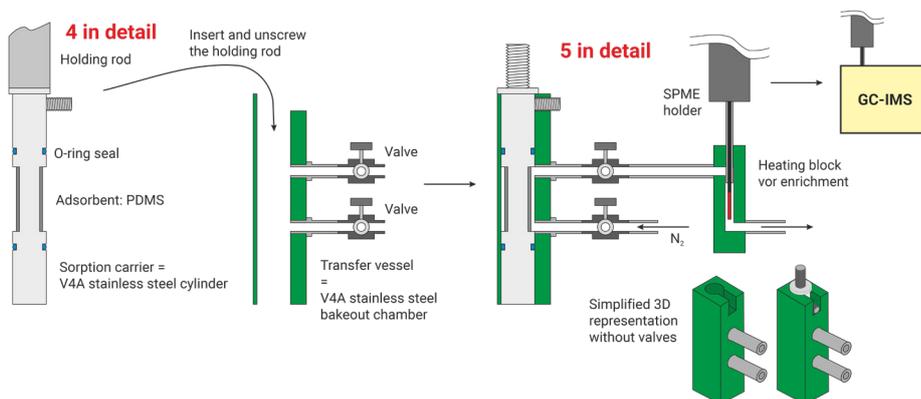
A New Analytical Method for Ammunition Contaminants in the Sea

Even 75 years after the end of World War II, large amounts of ammunition contaminants still lie in the German North and Baltic Seas. Among them are at least 212,000 tons of chemical weapons, often substances such as bis(2-chloroethyl)sulfide (commonly known as mustard gas). Due to the ongoing corrosion of the metal casings, the risk of these substances being released into the environment increases. These remnants therefore pose a persistent threat to the environment and to people working in the fishing or maritime infrastructure industries.

We present here a novel extraction technique for sampling that takes into account the hazardous potential of these warfare agents. In particular, the stirring up of sediment to the sea surface and, thus, the release and activation of airborne bis(2-chloroethyl)sulfide is avoided. Instead, bis(2-chloroethyl)sulfide is adsorbed directly from the sediment onto a coated metal cylinder, the so-called sorption carrier. The analysis is carried out by transferring the compound to a fiber for solid-phase microextraction (SPME),



Visualisierung der Vorgehensweise für eine sichere Beprobung von Senfgas in Meeresböden. Visualization of the procedure for safe sampling of mustard gas in seabeds.



Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Sorptionsträger, adsorbiert. Die Analyse erfolgt durch die Umlagerung auf eine Faser für die sogenannte Festphasenmikroextraktion (SPME), die dann gaschromatographisch analysiert wird. Hierfür wird ein Gaschromatograph mit einem Ionenmobilitätsspektrometrie(IMS)-basierten Detektor verwendet, der sich insbesondere für Vor-Ort-Analysen eignet.

Analysenkonzept:

1. Eine Penetrationssonde wird in den Meeresboden gesteckt.
2. An der Spitze der Sonde werden Bis(2-chlorethyl)sulfid und dessen Abbauprodukte an einem beschichteten Sorptionsträger adsorbiert.
3. Sedimentreste werden schon unter Wasser entfernt.
4. Der Sorptionsträger wird in einen gasdichten Behälter überführt.
5. Um eine gaschromatographische Analyse vor Ort durchzuführen, wird die Testprobe im Behälter erhitzt, und der entstehende Dampf wird mittels SPME beprobt.

Hierfür wurde eine spezielle computergesteuerte Umlagerungstechnologie entwickelt. Die Eignung der Methode zur sicheren Detektion von Senfgas wurde anhand künstlich hergestellter Proben nachgewiesen. Dazu wurde Sediment mit Bis (2-chlorethyl)sulfid versetzt und analysiert. Es konnten Nachweisgrenzen von 4 µg/kg in Trockenmasse für sandiges Sediment und 7 µg/kg für Sediment mit hohem organischen Anteil erreicht werden. Die Konzentrationen in Schiffswracks sind teilweise um Größenordnungen höher. Die Methode ist auch auf andere relevante Stoffe skalierbar, wie zum Beispiel den Umweltschadstoff Chlorbenzol oder Abbauprodukte von Bis(2-chlorethyl)sulfid.

Ausschnitte von IMS-Chromatogrammen mit dem Signal von Bis (2-chlorethyl)sulfid (Senfgas) und den Ionenmobilitätsspektrum im Signalmaximum generiert mit Proben aus sandigem Sediment von der Kieler Förde.

Sections of IMS chromatograms with the signal of bis (2-chloroethyl)sulfide (mustard gas) and the ion mobility spectrum at the signal maximum generated from samples of sandy sediment from the Kiel Fjord.

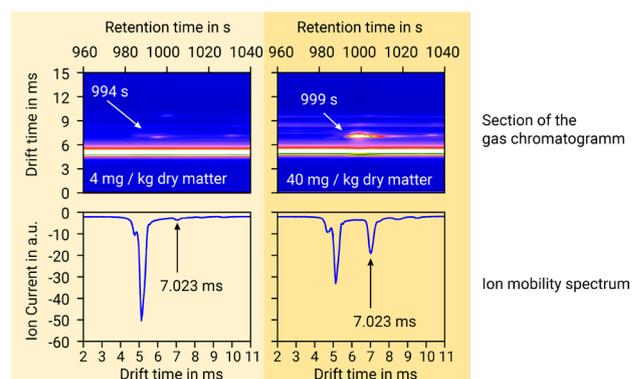
which is then analyzed via gas chromatography.

A gas chromatograph equipped with an ion mobility spectrometry (IMS)-based detector is used, which is particularly suitable for on-site analysis.

Analysis Concept:

1. A penetration probe is inserted into the seabed.
2. At the tip of the probe, bis(2-chloroethyl)sulfide and its degradation products are adsorbed onto a coated sorption carrier.
3. Sediment residues are removed underwater.
4. The sorption carrier is transferred into a gas-tight container.
5. For on-site gas chromatographic analysis, the test sample in the container is heated, and the resulting vapor is sampled using SPME.

A special computer-controlled transfer technology had to be developed for this process. The suitability of the method for the safe detection of mustard gas was demonstrated using artificially prepared samples. Sediment spiked with bis(2-chloroethyl)sulfide was analyzed, and detection limits of 4 µg/kg in dry matter for sandy sediment and 7 µg/kg for sediment with a high organic content were achieved. Concentrations in shipwrecks are often orders of magnitude higher. The method is also scalable to other relevant substances, such as the environmental pollutant chlorobenzene or degradation products of bis(2-chloroethyl)sulfide.



Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Digitalisierung der Qualitätskontrolle von Rohkautschuk

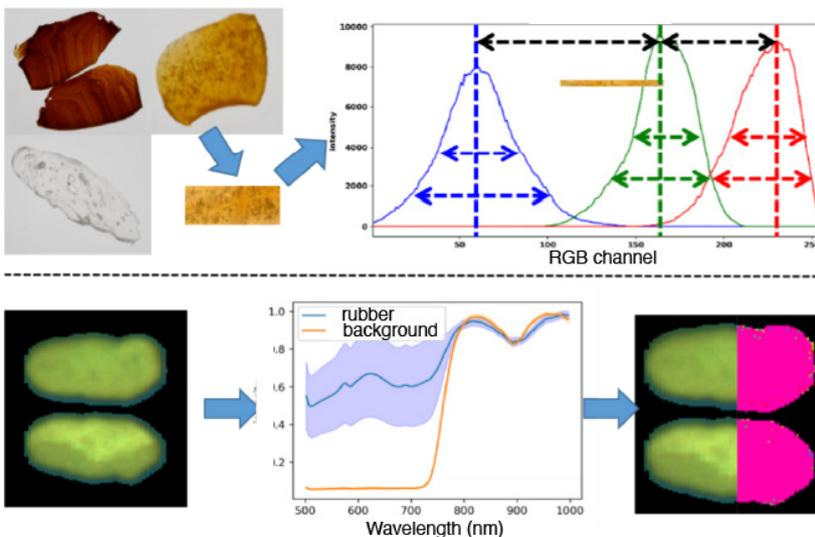
Da die Qualität von Gummiprodukten maßgeblich von den Rohstoffeigenschaften und den Prozessparametern abhängt, bietet sich dieser Bereich optimal für den Einsatz von maschinellem Lernen an. Die Verknüpfung von Daten aus verschiedenen spektroskopischen und photometrischen Methoden ermöglicht Vorhersagen zur Produktqualität mithilfe eines „digitalen Zwillings“. Ziel des Projekts ist es, durch die Anpassung der Prozessparameter an die spezifischen Eigenschaften der Rohstoffe eine zuverlässige Qualitätssicherung zu gewährleisten. Dieses Vorhaben ist Bestandteil der Plattform MaterialDigital, die für die Digitalisierung von Materialien in Deutschland eine wichtige strategische Rolle spielt.

Am IFNANO werden verschiedene sensorische Verfahren zur Charakterisierung der Rohstoffe angewendet und miteinander kombiniert. Zunächst werden standardisierte Proben der Rohstoffe entnommen, die anschließend mittels Fotometrie, Raman- und Infrarotspektroskopie (ATR-FTIR) untersucht werden. Alle erfassten Daten werden vorverarbeitet und anschließend durch Datenreduktion und Chemometrie

Digitizing the quality control of raw rubber

Since the quality of rubber products depends largely on the raw material properties and the process parameters, this area is ideal for the use of machine learning. The linking of data from various spectroscopic and photometric methods enables predictions of product quality using a "digital twin". The aim of the project is to ensure reliable quality assurance by adapting the process parameters to the specific properties of the raw materials. This project is part of the MaterialDigital platform, which plays an important strategic role in the digitalization of materials in Germany.

At IFNANO, various sensory methods are used to characterize the raw materials and combine them with each other. First, standardized samples of the raw materials are taken, which are then examined using photometry, Raman and infrared spectroscopy (ATR-FTIR). All recorded data are preprocessed and then evaluated using data reduction and chemometrics.



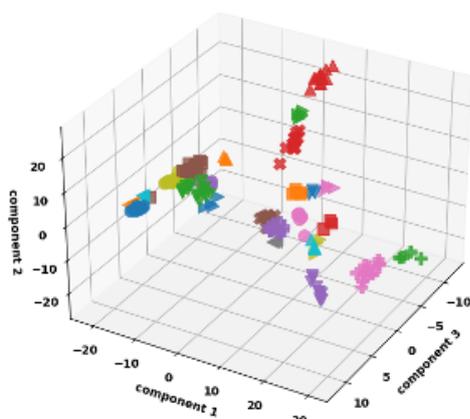
Vergleich zwischen regulärer Fotometrie (oben) und hyperspektraler Bildgebung (unten). Bei der Fotometrie werden die Bilddaten auf Merkmale für die Chemometrie reduziert, bei der hyperspektralen Bildgebung werden die Spektren für jeden Bildpixel mit einer KI einem Kautschuk zugeordnet. Comparison between regular photometry (top) and hyperspectral imaging (bottom). In photometry, the image data is reduced to features for chemometrics, while in hyperspectral imaging the spectra for each image pixel are assigned to a rubber using AI.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

ausgewertet. Die daraus entwickelten chemometrischen Modelle sind bereits in der Lage, 46 verschiedene Kautschuktypen erfolgreich zu identifizieren. Im nächsten Schritt erfolgt eine Fusion der Sensordaten aller Methoden. Die Ergebnisse werden in einer Datenbank zusammengeführt und dem Algorithmus des „digitalen Zwillinges“ zur Verfügung gestellt. Ergänzend wird im Rahmen des Projekts auch hyperspektrale Bildgebung eingesetzt. Im Gegensatz zur herkömmlichen Fotometrie ermöglicht die hyperspektrale Bildgebung eine detaillierte spektrale Analyse jedes einzelnen Bildpixels, wodurch die Datendichte um den Faktor 30 erhöht wird. Aus diesen Daten wurde ein neuronales Netzwerk pixelbasiert trainiert, um die Kautschuke auf den Bildern eindeutig zu identifizieren.

Der Kooperationspartner Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e.V. liefert zusätzliche makroskopische Sensordaten wie Mooney-Viskosität, Zugfestigkeit und Schmelzpunkt des Endprodukts. Zudem werden Prozessparameter wie Temperatur und Druck während der Verarbeitung erfasst. Sämtliche Sensordaten durchlaufen eine Datenreduktion und werden anschließend mit den Produkteigenschaften korreliert, um ein neuronales Netz zur aktiven Steuerung des Produktionsprozesses zu trainieren.

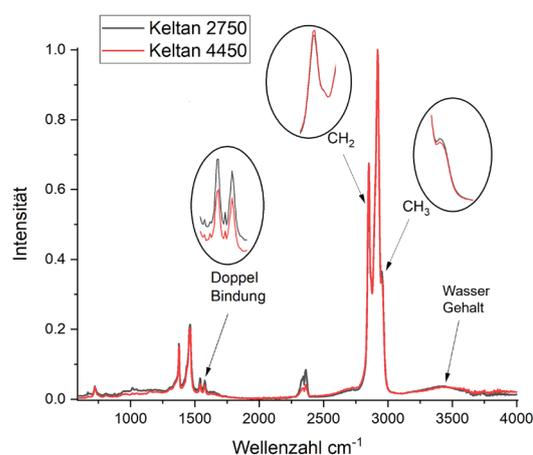


3D-Ansicht des resultierenden chemometrischen Modells zur Identifikation von Kautschuken.
3D view of the resulting chemometric model for the identification of rubbers.

The chemometric models developed from this are already able to successfully identify 46 different types of rubber. The next step is to merge the sensor data from all methods. The results are brought together in a database and made available to the "digital twin" algorithm.

In addition, hyperspectral imaging is also used as part of the project. In contrast to conventional photometry, hyperspectral imaging enables a detailed spectral analysis of each individual image pixel, increasing the data density by a factor of 30. A neural network was trained on a pixel-by-pixel basis from this data in order to clearly identify the rubbers in the images.

The cooperation partner German Institute for Rubber Technology e.V. provides additional macroscopic sensor data such as Mooney viscosity, tensile strength and melting point of the end product. In addition, process parameters such as temperature and pressure are recorded during processing. All sensor data undergo data reduction and are then correlated with the product properties in order to train a neural network to actively control the production process.



ATR-FTIR-Spektren verschiedener EPDM-Kautschukproben mit verschiedenem Anteil der Konstituenten. Hier sind die Unterschiede in den Spektren deutlich zu erkennen.

ATR-FTIR spectra of various EPDM rubber samples with different proportions of constituents. The differences in the spectra are clearly visible here.

Photonische Sensorik Photonic Sensor Technologies

Prozesssteuerung und Echtzeit-Materialanalyse

Für die Qualitätssicherung direkt in der Produktion sind innovative Sensortechnologien unverzichtbar. Mit dem Ziel, eine direkte Prozesssteuerung für eine Extrusionslinie zur Herstellung von Gummiprodukten zu ermöglichen, wurden in Zusammenarbeit mit mehreren Projektpartnern entsprechende Sensoren entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Dabei kam die LIBS-Technologie (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) zur Echtzeit-Materialanalyse zum Einsatz. LIBS ist eine schnelle, berührungsfreie Methode zur elementaren Analyse. Durch den Einsatz intensiver Laserpulse werden Materialproben verdampft und ein Plasma generiert. Dieses Plasma wird spektroskopisch analysiert, wobei die Emissionen den einzelnen Elementen in der Probe zugeordnet werden können.

Am IFNANO wurde ein Zweifarben-Doppel-puls-LIBS-System mit deutlich verbesserter Leistung entwickelt. Die Verwendung zweier Laserpulse unterschiedlicher Wellenlängen ermöglichte eine signifikante Verstärkung der Signale, was entscheidend für den Einsatz an einer laufenden Extrusionslinie ist. Eine wesentliche Herausforderung bestand dabei in der Synchronisierung der Laserpulse mit

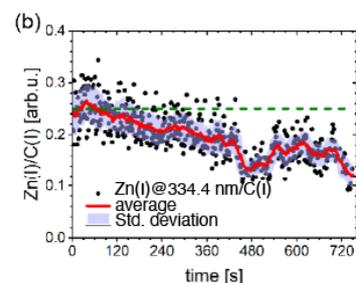
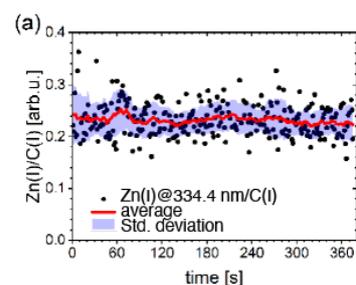
Process control and real-time material analysis

Innovative sensor technologies are indispensable for quality assurance directly in production. With the aim of enabling direct process control for an extrusion line for the manufacture of rubber products, appropriate sensors were developed and successfully used in collaboration with several project partners. LIBS technology (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) was used for real-time material analysis. LIBS is a fast, non-contact method for elemental analysis. By using intense laser pulses, material samples are vaporized and a plasma is generated. This plasma is analyzed spectroscopically, whereby the emissions can be assigned to the individual elements in the sample.

At IFNANO, a two-color, double-pulse LIBS system with significantly improved performance was developed. The use of two laser pulses of different wavelengths enabled a significant amplification of the signals, which is crucial for use on a running extrusion line. A major challenge was synchronizing the laser pulses with the movement of the extrudate.



◀ Schematische Ansicht des LIBS-Moduls am Förderband. Schematic of the LIBS module on the conveyor belt.



Beispielhafte Ergebnisse von Messungen an der Extrusionslinie. (a) Konstante Produktionsqualität innerhalb der Parameter. (b) Abfallen der Zink-Konzentration beim Wechsel des Materials.

Example results of measurements on the extrusion line. (a) Constant production quality within the parameters. (b) Drop in zinc concentration when changing the material.

Photonische Sensorik

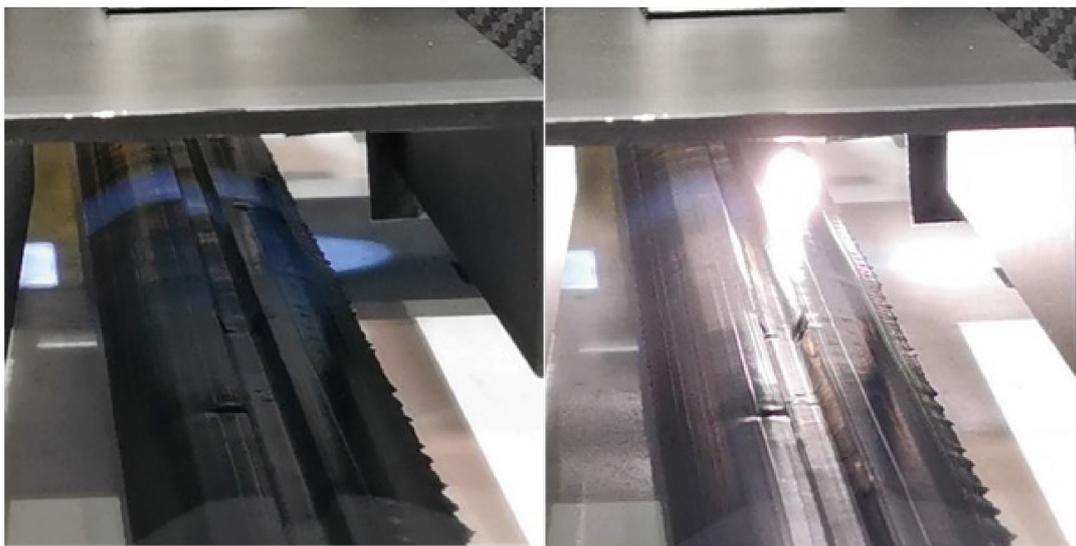
Photonic Sensor Technologies

der Bewegung des Extrudats. Um dies zu ermöglichen, wurde eine zusätzliche Translationseinheit implementiert, die die Analyseposition dynamisch anpasste.

Es konnte gezeigt werden, dass das System in der Lage ist, die Verteilung von Schlüsselbestandteilen, insbesondere Zink aus Zinkoxid, zu überwachen. Die homogene Verteilung von Zinkoxid ist für die Qualität des Vulkanisationssystems von zentraler Bedeutung. Trotz der dynamischen Umgebungsbedingungen in der Werkhalle, der erhöhten und schwankenden Temperatur des Extrudats sowie dessen variabler Positionierung auf dem Förderband zeigte das LIBS-System eine robuste Leistung. Schwankungen in der Signalqualität, die auf Variationen in der Extrudatgeometrie und der Oberflächenstruktur zurückzuführen waren, konnten detektiert werden. Unterschiede in der Zinkkonzentration zwischen verschiedenen Rezepturen der Kautschukmischungen konnten ebenfalls eindeutig erkannt werden. Diese Ergebnisse belegen das Potenzial der LIBS-Technologie, Materialabweichungen in Echtzeit zu erkennen und somit fehlerhafte Chargen frühzeitig auszusortieren.

To make this possible, an additional translation unit was implemented that dynamically adjusted the analysis position.

It was shown that the system is able to monitor the distribution of key components, especially zinc from zinc oxide. The homogeneous distribution of zinc oxide is of central importance for the quality of the vulcanization system. Despite the dynamic environmental conditions in the workshop, the increased and fluctuating temperature of the extrudate and its variable positioning on the conveyor belt, the LIBS system showed robust performance. Fluctuations in signal quality due to variations in the extrudate geometry and surface structure could be detected. Differences in zinc concentration between different formulations of the rubber compounds could also be clearly identified. These results demonstrate the potential of LIBS technology to detect material deviations in real time and thus sort out defective batches



Fotos des Extrudats auf dem Förderband. (Links) Blick hinter die optische Abschirmung, direkt auf das Extrudat. (Rechts) Plasmaflamme während der LIBS-Messung.

Photos of the extrudate on the conveyor belt. (Left) View behind the optical shield, directly onto the extrudate. (Right) Plasma flame during the LIBS measurement.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Schnelle optische Messung der Glasspannung in drei Dimensionen

Glas ist als Werkstoff in vielen Bereichen unverzichtbar. Neue Entwicklungen, vor allem in umweltrelevanten Bereichen sorgen dafür, dass hohe Ansprüche an die Glaseigenschaften und -qualität gestellt werden. Diese Anforderungen, z.B. an Windschutzscheiben, führen auch dazu, dass bei der Glasherstellung viel engere Zielparamete, wie z.B. beim Spannungshaushalt des Glases, eingehalten werden müssen. Somit ist es entscheidend für industrielle Prozesse, die Glasspannungen schon innerhalb der Produktionskette präzise zu bestimmen, um ressourcenschonender zu arbeiten, indem Glasbruch vorgebeugt wird und Fehlproduktionen direkt unterbunden werden.

Der Stand der Technik von bisher erhältlichen Messgeräten weist Lücken in Praktikabilität, Handhabung und Genauigkeit auf, insbesondere im Hinblick auf automatisierte Messungen von Glasspannungen. Daher hat sich ein Verbund mit Schmidt&Haensch, Saint-Gobain Sekurit und VW für dieses Projekt zusammengeschlossen. Ziel ist es, eine nicht-invasiven optischen Methode zur Messung der Eigenspannung speziell von Fahrzeugverglasungen zu entwickeln.

Die hier entwickelte Messmethode soll kontaktlos

Fast optical measurement of the glass tension in three dimensions

Glass is an indispensable material in many areas. New developments, especially in environmentally relevant areas, mean that high demands are placed on the properties and quality of glass. These requirements, e.g. for windshields, also mean that much tighter target parameters, such as the stress balance of the glass, must be adhered to during glass production. It is therefore crucial for industrial processes to precisely determine the glass stresses within the production chain in order to work more efficiently by preventing glass breakage and directly preventing defective production.

The state of the art of measuring devices available to date has gaps in practicality, handling, and accuracy, especially with regard to automated measurements of glass stresses. A group of Schmidt&Haensch, Saint-Gobain Sekurit and VW has therefore joined forces for this project. The aim is to develop a non-invasive optical method for measuring the residual stresses of vehicle glazing in particular.

The measurement method developed here is intended to work without contact and be capable of automation in order to determine the stress balance of the disks in-line. This takes advantage of the fact that the polarization of an incident light beam is changed by the stresses in the disk, so that the stress can be determined by precisely measuring the polarization. A robot arm is used to scan the disk without contact.



◀ Zerborstene Frontscheibe im Auto.
Broken windshield in a car.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

arbeiten und automatisierungsfähig sein, um in-line den Spannungshaushalt der Scheiben zu bestimmen. Dabei wird ausgenutzt, dass die Polarisation eines eingestrahlten Lichtstrahls durch die Spannungen in der Scheibe geändert wird, so dass sich über die genaue Messung der Polarisation die Spannung bestimmen lässt. Zur kontaktlosen Rasterung der Scheibe wird dabei ein Roboterarm eingesetzt. Die Bestimmung des Auflösungsvermögens wird mittels einer dafür angefertigten Federkraft-Spannvorrichtung ermöglicht, womit externe Spannungen auf die Scheibe aufgebracht werden können. So kann bei einer eingestellten Spannung entlang einer Raumrichtung das entsprechende Polarisationsignal gemessen werden. Mittels der Spannvorrichtung können Messungen in verschiedenen Raumrichtungen eine Datenbasis für die Quantisierung der Methode schaffen, um tatsächliche Spannungswerte an beliebigen Proben messen zu können. Eine theoretische berechnete Datenbank wurde bereits erzeugt und liefert vielversprechende Ergebnisse, womit sich die Methode der Spannungszustandsquantisierung validieren lässt. Die Ergebnisse aus dem Projekt führten zu einer Erfindungsmeldung bezüglich der technischen Realisierung der Messmethoden und der Ausrichtung der Messapparatur zu einer gekrümmten Scheibe.

Konzeptueller Aufbau des Polarimeters und der Ausrichtungapparatur auf dem Roboterarm vor einem Einscheibensicherheitsglas. ►
 Conceptual setup of the polarimeter and alignment apparatus on the robot arm in front of a safety glass.

The determination of the resolution is made possible by means of a spring-force clamping device made for this purpose, with which external stresses can be applied to the disk. In this way, the corresponding polarization signal can be measured for a set stress along a spatial direction. Using the clamping device, measurements in different spatial directions can create a database for quantizing the method in order to be able to measure actual stress values on any sample.

A theoretically calculated database has already been created and delivers promising results, which can be used to validate the stress state quantization method.

The results of the project led to an invention report regarding the technical realization of the measuring methods and the alignment of the measuring apparatus to a curved glass pane.



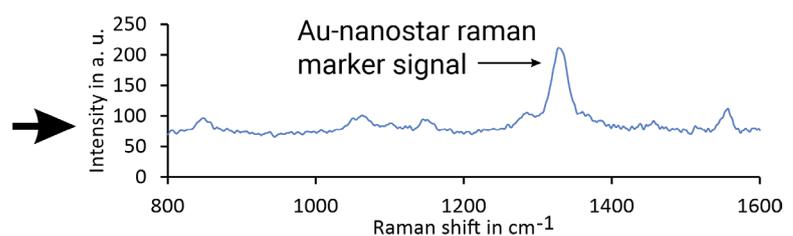
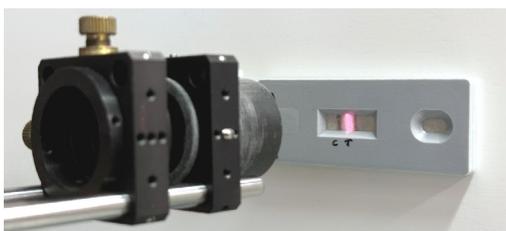
Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Multiplex-POC-Tests für die Tiermedizin

Im Rahmen des Südniedersachsen Point-of-Care-Clusters (SNIPOCC) sollen innovative analytische Schnelltests entwickelt werden, die deutlich über dem aktuellen Stand der Technik hinausgehen. Diese Schnelltests finden Anwendung in der Veterinär- und Humanmedizin (Point-of-Care-Tests, POC) sowie in der Forensik, Umwelt- und Gefahrstoffanalytik. Das IFNANO bringt dabei seine Expertise in Auslesetechnologien für Lateral Flow Tests (LFT) auf Basis der Raman-Spektroskopie ein.

Zur Analyse der Test- und Kontrolllinien von LFTs stehen verschiedene spektroskopische Methoden zur Verfügung. Die Raman-Spektroskopie zeichnet sich durch die Fähigkeit aus, deutlich voneinander abgegrenzte Molekülbänder zu erzeugen, die sich klar vom Hintergrundspektrum abheben. Dies ermöglicht eine zuverlässige Identifizierung der Markierungen an den Test- und Kontrolllinien, was die Tests spezifischer und empfindlicher macht und eine verbesserte Quantifizierung der Analyten erlaubt.



Erstellen eines gleichmäßigen Linienfokus mithilfe einer rechteckigen Faser zur Generierung von Raman-Spektren der Test- und Kontrolllinie. Der Raman-Streuquerschnitt wird durch die Verwendung eines Au-Nanostar-Raman-Markers von Nanowerke (Velbert, Deutschland) verbessert.

Creating a uniform line focus using a rectangle fiber to generate Raman spectra of the test and control line. The Raman scattering cross section is improved by using Au-nanostar Raman marker made by Nanowerke (Velbert Germany).

Multiplex lateral POC tests for veterinary medicine

As part of the Southern Lower Saxony Point-of-Care Cluster (SNIPOCC), innovative analytical rapid tests are being developed that go significantly beyond the current state of the art. These rapid tests are intended for use in veterinary and human medicine (Point-of-Care Tests, POC), as well as in forensic science, environmental analysis, and hazardous substance detection. IFNANO contributes its expertise in readout technologies for lateral flow tests (LFT) based on Raman spectroscopy.

Various spectroscopic methods are available to analyze the test and control lines of LFTs. Raman spectroscopy is distinguished by its ability to generate well-separated molecular bands that clearly stand out from the background spectrum. This allows for reliable identification of the markers on the test and control lines, leading to tests that are both more specific and sensitive, enabling better quantification of analytes. Although pure Raman scattering suffers from a low quantum yield, this limitation can be

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Obwohl die reine Raman-Streuung eine geringe Quantenausbeute aufweist, kann diese Limitierung durch den Einsatz von Markierungspartikeln, die die Raman-Streuung durch plasmonische Effekte erhöhen, überwunden werden. Diese Technik ist als oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie (SERS) bekannt.

Eine zentrale Herausforderung bei der Raman-Spektroskopie besteht darin, die maximale Quantenausbeute zu erzielen, ohne thermische Schäden am LFT zu verursachen. Um dieses Risiko zu verringern, ist es vorteilhaft, einen Linienfokus anstelle eines Punktfokus für den Anregungslaser zu verwenden. Dies kann durch den Einsatz einer Zylinderlinse zur Erzeugung eines Linienfokus erreicht werden. Allerdings zeigt sich auch bei dieser Technik häufig ein Intensitätsmaximum in der Mitte der Linie. Das Ziel unserer Forschungsarbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, die einen gleichmäßigen Linienfokus erzeugt, um ein zerstörungsfreies Auslesen der LFTs ohne thermische Schäden oder Überhitzung zu gewährleisten. Gleichzeitig soll die Streulichtausbeute maximiert werden.

Zwei Ansätze wurden untersucht: Im ersten Ansatz wurde eine Strahlformungslinse verwendet, die stabile und reproduzierbare Messungen lieferte, aber zusätzliche optische Komponenten erforderte und den Abstand zwischen der Raman-Sonde und der Probe vergrößerte, was zu einer deutlichen Signal-dämpfung führte. Im zweiten Ansatz kam eine rechteckige Faser in Verbindung mit einer Zylinderlinse zum Einsatz, um einen gleichmäßigen Linienfokus zu erzeugen. Diese Lösung führte zu einem homogenen Ausgangsstrahl ohne zusätzliche optische Elemente und erwies sich als die effektivere Methode.

overcome by using labeling particles that enhance the Raman scattering through plasmonic effects—a technique known as surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS).

A central challenge in Raman spectroscopy is balancing maximum quantum yield with the risk of thermal damage to the LFT. To mitigate this risk, it is preferable to use a line focus for the excitation laser instead of a traditional point focus. This can be achieved by using a cylindrical lens to form the line focus. However, even with this technique, there is often a significant intensity peak in the middle of the line. The goal of our research is to develop a method that generates a uniform line focus, enabling the non-destructive reading of LFTs without thermal damage or overheating, while maximizing the scattered light yield.

Two approaches were investigated: In the first approach, a beam-shaping lens was used, which provided stable and reproducible measurements but required additional optical components and increased the distance between the Raman probe and the sample, leading to significant signal attenuation. In the second approach, a rectangular fiber was used in combination with a cylindrical lens to create a uniform line focus, resulting in a homogeneous output beam without the need for additional optical elements. This novel solution proved to be the more effective method.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

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

Schnelltests als diagnostisches Mittel, ermöglichen eine rasche Einschätzung des Gesundheitszustands, doch ihre derzeitige Funktionalität und Produktion sind noch verbesserungswürdig.

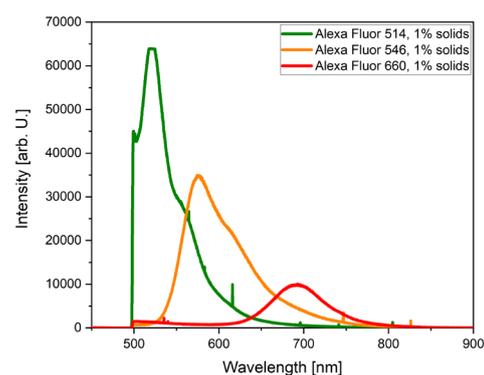
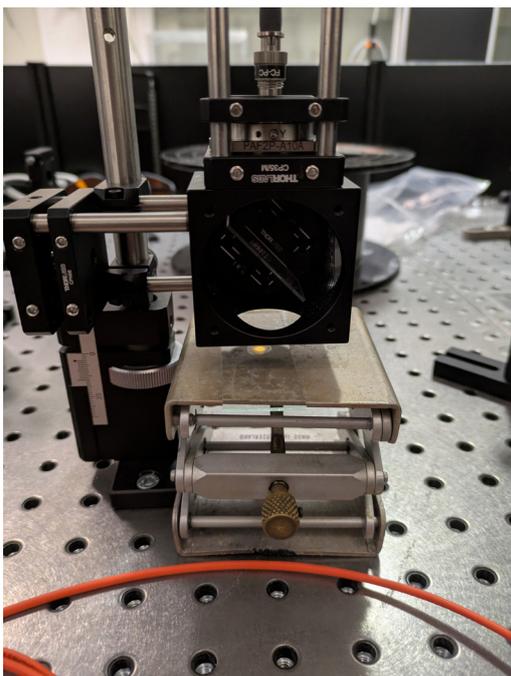
Das regionale Bündnis SNIPOCC aus Industrie und Wissenschaft hat sich zum Ziel gesetzt, Göttingen und Südniedersachsen zum Hotspot für die Entwicklung diagnostischer Schnelltests zu machen. Dazu sollen die bestehenden Limitierungen – wie fehlende Quantifizierung, begrenzte Multiparameteranalyse und geringe Digitalisierung – überwunden werden. Das IFNANO entwickelt in Zusammenarbeit mit der FiSens GmbH eine neuartige Fluoreszenzspektroskopie-basierte Auslesemethode sowie eine kostengünstige, kompakte Ausleseeinheit, die Schnelltests sowohl qualitativ als auch quantitativ auswertet und die Daten digital bereitstellt. Dabei wurde darauf geachtet, den Reader breit einsetzbar zu gestalten, so dass eine hohe Anzahl der gängigen Fluorophore

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

Lateral flow tests as a diagnostic tool enable a rapid assessment of health status, but their current functionality and production still need improvement.

The regional SNIPOCC alliance of industry and science has set itself the goal of making Göttingen and southern Lower Saxony a hotspot for the development of rapid diagnostic tests. To do this, the existing limitations - such as a lack of quantification, limited multi-parameter analysis and low digitization - are to be overcome.

In collaboration with FiSens GmbH, IFNANO is developing a novel fluorescence spectroscopy-based readout method and a cost-effective, compact readout unit that evaluates rapid tests both qualitatively and quantitatively and makes the data available digitally. Care was taken to design the reader for a wide range of uses so that a large number of common fluorophores can be excited simultaneously.



Fluoreszenzspektren der drei benutzten Fluorophore aufgenommen mit dem Fluoreszenz-Reader.

Fluorescence spectra of the three fluorophores used recorded with the fluorescence reader.

Aufbau des kompakten Fluoreszenz-Readers.
Compact setup of the fluorescence reader.

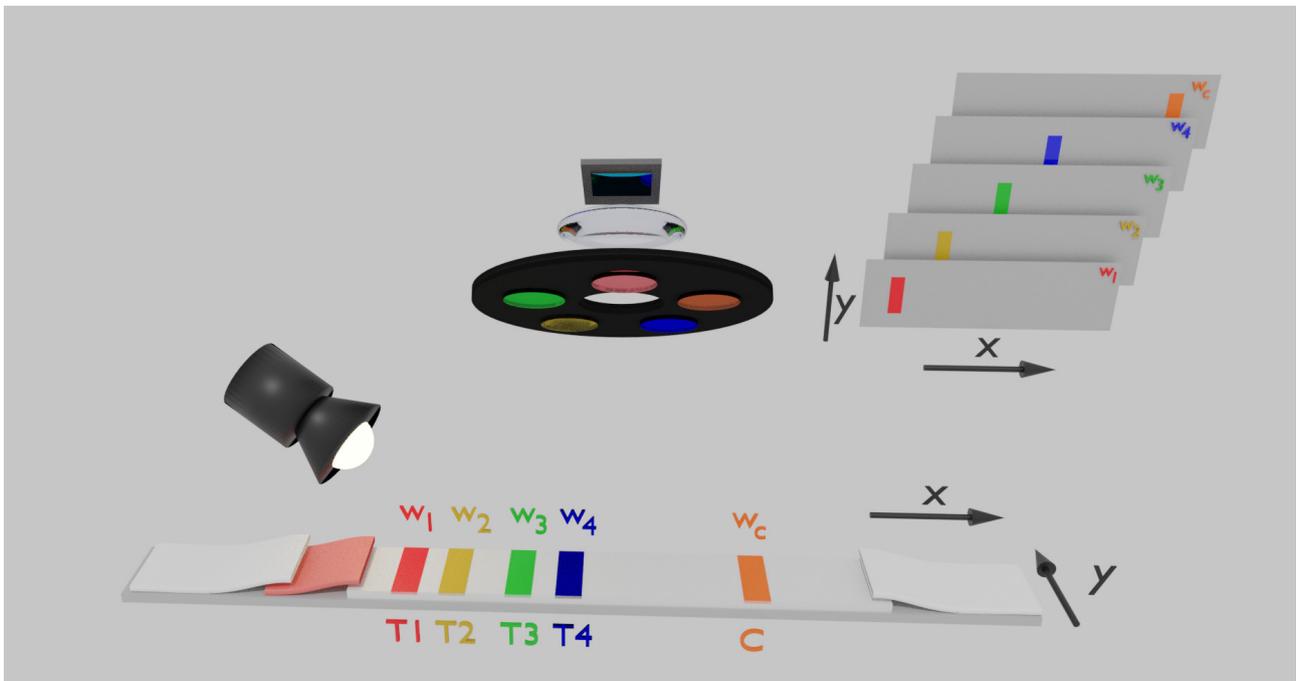
Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

gleichzeitig angeregt werden können.

Ein weiteres Ziel in dem Projekt ist die Entwicklung eines hyperspektralen Ausleseverfahrens für Lateral-Flow-Tests (LFTs), das Multiplexing ermöglicht. Dadurch können mehrere Analyten gleichzeitig bestimmt werden, was einen entscheidenden Fortschritt in der quantitativen Erkennung von Krankheitserregern darstellt.

Another goal of the project is to develop a hyperspectral readout method for lateral flow tests (LFTs) that enables multiplexing. This allows multiple analytes to be determined simultaneously, representing a crucial advance in the quantitative detection of pathogens.



Schematischer Aufbau eines hyperspektralen Fluoreszenz-Readers. Der Teststreifen wird dabei komplett abgebildet und mit Hilfe eines dispersiven Elementes (hier einzelne Filter) spektral aufgespalten aufgenommen. Das Ergebnis ist ein spektraler Hyperkubus, bei dem zu jeder Frequenz/Wellenlänge ein komplettes Bild aufgenommen wird. Die einzelnen Analytsignale sind dann nur im dazugehörigen Frequenzband sichtbar.

Schematic setup of a hyperspectral fluorescence reader. The test strip is imaged in its entirety and spectrally split using a dispersive element (here individual filters). The result is a spectral hypercube in which a complete image is recorded for each frequency/wavelength. The individual analyte signals are then only visible in the associated frequency band.

Photonische Sensorik

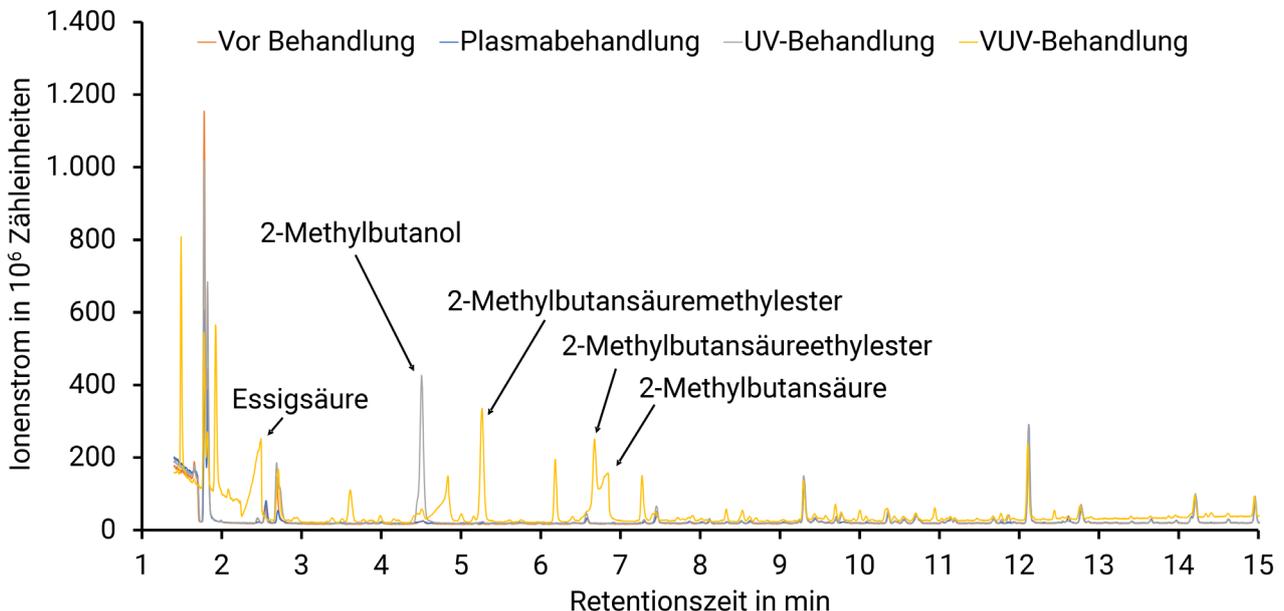
Photonic Sensor Technologies

Inaktivierung von Mikroorganismen und Kleinstlebewesen auf Schüttgütern

Für Hersteller und Lieferanten von Kräutern, Tees und Gewürzen stellen Kontaminationen durch Mikroorganismen in Form von Pilzen und Bakterien sowie Kleinstlebewesen wie Milben eine große Herausforderung dar. Diese Verunreinigungen betreffen sowohl die Produktqualität als auch die Sicherheit für den Verbraucher sowie die Haltbarkeit der Produkte. Herkömmliche Methoden zur Deaktivierung dieser Organismen, wie Wasserdampf- oder CO₂-Behandlung, sind oft unzureichend oder ungeeignet. Besonders für Naturrohstoffe sind alternative Verfahren wie die Inaktivierung durch UV-Licht oder der Einsatz von Plasmen vielversprechend, aber noch nicht vollständig erforscht.

Inactivation of microorganisms and small organisms on bulk materials

For producers and suppliers of herbs, teas, and spices, contamination by microorganisms in the form of fungi and bacteria, as well as small organisms such as mites, presents a significant challenge. These contaminations affect both product quality and consumer safety, as well as the shelf life of the products. Conventional methods for deactivating these organisms, such as steam or CO₂ treatment, are often inadequate or unsuitable. For natural raw materials, alternative methods such as inactivation by UV light or the use of plasmas are promising, but still under-researched.



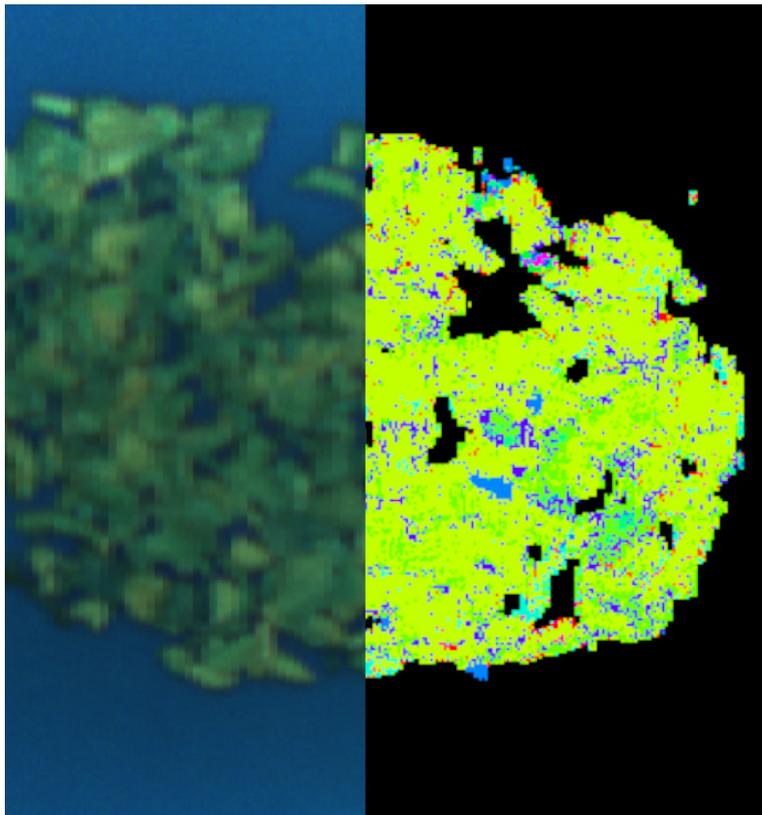
▲ Ausschnitt aus Chromatogrammen generiert mittels Festphasenmikroextraktion aus dem Dampfraum über geschnittenen Bibernellwurzeln vor und nach verschiedenen Deaktivierungsprozeduren.
Section of chromatograms generated by solid phase microextraction from the vapor space over cut burnet roots before and after various deactivation procedures.

Photonische Sensorik

Photonic Sensor Technologies

Im Rahmen eines Verbundprojekts untersucht das IFNANO die Wirkung dieser Verfahren auf Bioprodukte, indem Veränderungen der Produkte vor und nach der Behandlung mit Plasma oder UV-Strahlung analysiert werden. Erste positive Ergebnisse zeigen, dass chromatographische Messmethoden geeignet sind, um Veränderungen in den Produkten zu erfassen. Insbesondere nach der Behandlung mit Vakuum-UV-Strahlung (VUV, 185 nm) wurden deutliche Unterschiede in den ausgasenden Substanzen festgestellt. Derzeit wird auch der Einsatz fototechnischer Verfahren wie der Hyperspektralanalyse in Kombination mit neuronalen Netzen untersucht.

As part of a collaborative project, IFNANO is investigating the effects of these methods on bioproducts by analyzing changes in the products before and after treatment with plasma or UV radiation. Initial positive results indicate that chromatographic measurement methods are suitable for detecting changes in the products. In particular, significant differences in the emitted substances were observed after treatment with vacuum UV light (VUV, 185 nm). The use of phototechnical methods, such as hyperspectral analysis, is currently also explored in combination with neural networks.



Ein hyperspektrales Falschfarbenbild eines Bibernellwurzelschnipsels (linke Hälfte) und die zugehörige, pixelbasierte Vorhersage des Naturrohstoffs durch ein neuronales Netz (rechte Hälfte). Jede Farbe steht hierbei für einen anderen Stoff, wobei helles Grün die korrekte Vorhersage von Bibernellwurzel symbolisiert.

A hyperspectral false-color image of a burnet root fragment (left side) and the corresponding pixel-based prediction of the natural raw material by a neural network (right side). Each color represents a different substance, with light green indicating the correct prediction of burnet root.

Projekte

Projects

Projekt Biolumineszenz-Imaging:

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

Projekt DIGIT RUBBER:

Erforschung von Techniken zur Überwachung des Extrusionsprozesses mittels spektroskopischer Methoden,
gefördert vom BMBF im Rahmen der Fördermaßnahme „Digitalisierung der Materialforschung in Deutschland (MaterialDigital)“

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 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)

Projekt NanoVidere II:

Schnelle monochromatische Reflexionsnanoskopie mittels Absorptionsmodulation,
gefördert von der DFG

Projekte

Projects

Projekt NanoPhotonik:

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

Projekt NanoTools:

Nanophotonische Werkzeuge zur Stärkung der Niedersächsischen Innovations- und Wirtschaftslandschaft, 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 OMeGlas.3:

Erforschung eines schnellen, sensitiven Verfahrens zur Oberflächen- und tiefenselektiven Messung der Spannung von Verbundgläsern, gefördert vom BMBF durch die Fördermaßnahme „KMU-innovativ: Photonik und Quantentechnologien“ im Rahmen des Programms „Photonik Forschung Deutschland“

Projekt PhotoPlasma:

Kombination photonisch induzierter Verfahren mit plasmabasierten Techniken zur nachhaltigen Inaktivierung von Mikroorganismen auf Schüttgütern in der Agrarwirtschaft, EIP Agri zusammen mit dem Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Projekt PURPLE:

Entwicklung eines high-power Pulskompressors für Durchschnittsleistungen über 1 kW zur Erzeugung ultrakurzer Laserpulse, gefördert vom BMWK (ZIM)

Projekt 5D-FIBER:

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

Projekt Rubin SNIPOCC:

Süd-niedersachsen Point of Care Cluster, Erfassung des Entwicklungsbedarfs 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 SiKoPla:

Laserbasierte Methoden zur Steigerung der Photolumineszenz von Si-Quantenpunkten durch Kopplung an plasmonische Partikel, gefördert von der DFG

Projekt ToxAR:

Analyse von Senfgas unter Berücksichtigung ein BEAUTY2025 es sicheren Probenumgangs und TNT-Sensor

für Taucher und ROV/AUV,

gefördert vom BMWi im Rahmen der Fördermaßnahme „Maritimes Forschungsprogramm“

Projekt ultra-nanoSCALE:

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

Publikationen

Publications

C. Gregor, F. Grimm, J. Rehman, C. A. Wurm, A. Egner:

Click Chemistry with Cell-Permeable Fluorophores Expands the Choice of Bioorthogonal Markers for Two-Color Live-Cell STED Nanoscopy, *Cells* 13(8), 683 (2024)

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

Autonomous bioluminescence emission from transgenic mice, *bioRxiv*, doi: 10.1101/2024.06.13.598801 (2024)

T. Brinker, C. Gregor:

Increased autonomous bioluminescence emission from mammalian cells by enhanced cofactor synthesis, *Chemosensors* 12 (11), 223 (2024)

J. I. Gallea, O. Nevskiy, Z. Kaźmierczak, T. Chen, P. Miernikiewicz, A. Chizhik, K. Dąbrowska, M. Bates, J. Enderlein:

Super-resolution going viral: T4 virus particles as perfect nature-designed 3D-Bio-NanoRulers, *bioRxiv*, doi: 10.1101/2024.04.04.588072 (2024)

N. Bakhtiari, J. Ihlemann:

Fabrication of Fluidic Submicron-Channels by Pulsed Laser-Induced Buckling of SiO_x Films on Fused Silica, *Discover Nano* 19, 46 (2024)

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* <https://doi.org/10.1002/xrs.3474> (Accepted 2024)

C. Lenth, H. Wackerbarth:

Senfgasanalytik für Munitionsaltlasten im Meer, *Wiley Analytical Science newsletter*, <https://analyticalscience.wiley.com> (2024)

A. Aschemann, P.-F. Hagen, S. Albers, R. Rofallski, S. Schwabe, M. Dagher, M. Lukas, S. Leineweber, B. Klie, P. Schneider, H. Bossemeyer, L. Hinz, M. Kästner, B. Reitz, E. Reithmeier, T. Luhmann, H. Wackerbarth, L. Overmeyer, U. Giese:

Smart Rubber Extrusion Line Combining Multiple Sensor Techniques for AI-Based Process Control, *Adv. Eng. Mater.* 2401316 (2024)

B. Klie, S. Schwabe, C. Lenth, U. Giese, H. Wackerbarth:

Conversion of an industrial LIBS system to double-pulse operation to improve sulphur detection in rubber-based parts, *Spectrochim. Acta B* 106923 (2024)

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

Analysis of infusion solutions using a multi-sensory approach consisting of Raman spectroscopy, refractometry, and UV/Vis spectroscopy to prevent medication errors, *Proc. SPIE* 13008, *Biophotonics in Point-of-Care III*, 130080I (2024)

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

Mapping surface stress of automotive glass by non-contact polarimetric scans, *Proc. of SPIE* 12950, 129500Q (2024)

S. V. Schweighofer, D. C. Jans, J. Keller-Findeisen, A. Folmeg, P. Ilgen, M. Bates, S. Jakobs:

Endogenous BAX and BAK form mosaic rings of variable size and composition on apoptotic mitochondria, *Cell Death & Differentiation* 31(4), 469 – 479 (2024)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

C. Venugopal Srmbickal, H. Esmaeeli, J. Piguet, L. Reinkensmeier, R. Siegmund, M. Bates, A. Egner, J. Widengren:
Near-infrared MINFLUX imaging enabled by suppression of fluorophore blinking, bioRxiv, doi: 10.1101/2024.08.27.609859 (2024)

T. Stephan, S. Stoldt, M. Barbot, T. D. Carney, F. Lange, M. Bates, P. Bou Dib, K. Inamdar, H. R. Shcherbata, M. Meinecke, D. Riedel, S. Dennerlein, P. Rehling, S. Jakobs:
Drosophila MIC10b can polymerize into cristae-shaping filaments, Life Science Alliance 7(4), e202302177 (2024)

Konferenzbeiträge/ Conference contributions

N. Bakhtiari, J. Ihlemann:
Fabrication of Nanofluidic Channels by Pulsed Laser Irradiation of SiO_x-coated Fused Silica
DPG Frühjahrstagung, Fachverband
Oberflächenphysik
Berlin (03.2024)

N. Bakhtiari, J. Ihlemann:
Fabrication of Nanofluidic Channels by Pulsed Laser Irradiation of SiO_x-coated Fused Silica
CINsaT Spring Colloquium
Paderborn (03.2024)

L. Reinkensmeier:
COMET – Cost-function optimized maximal overlap drift Estimation, Focus on Microscopy 2024, Genua, Italien (03.2024)

C. Lenth, A. Schumann, F. Ude, H. Wackerbarth:
Eine neuartige Probenahmetechnik basierend auf Ionenmobilitätsspektroskopie, Gaschromatographie und Festphasenextraktion zur Bestimmung von S-Lost in Meeresböden, IMS - Anwender*Innentreffen 2024, Innsbruck (03.2024)

F. Müller, H. Wackerbarth, G. Ctistis:
Evaluation of optical anisotropy on the surface of stressed glass using a reflective polarimetric setup, Annual Spring Meeting of the German Physical Society: Section Solid State Matter, Berlin (03.2024)

Y. Pulnova, T. Parkman, B. Angelov, I. Baranova, A. Zymakova, S. Cipiccia, L. Fardin, R. Antipenkov, D. Peceli, O. Hort, D.- D. Mai, J. Andreasson, J. Nejdil:
Compact laser-driven plasma X-ray source for time-resolved diffraction, spectroscopy, and imaging experiments at ELI Beamlines, Journal of Synchrotron Radiation (submitted for publication 2024)

F. Müller, H. Wackerbarth, G. Ctistis:
Mapping surface stress of automotive glass by non-contact polarimetric scans, SPIE Smart Structures and Nondestructive Evaluation, Long Beach (03.2024)

F. Wieduwilt, J. Geweke, F. Merker-Müller, G. Ctistis, H. Wackerbarth:
Analysis of infusion solutions using a multi-sensory approach consisting of Raman spectroscopy, refractometry, and UV/Vis spectroscopy to prevent medication errors, SPIE Photonics Europe, Strasbourg (04.2024)

L. J. Richter, C. M. Beckmann, J. Ihlemann:
Erzeugung schwarzer Markierungen durch UV-Laser Bestrahlung von TiO₂-haltigen handelsüblichen Gläsern
125. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO)
Aachen (05.2024)

C. Lenth, A. Schumann, F. Ude, H. Wackerbarth:
A novel sampling technique based on SPME/GC for degeneration products of sulphur mustard in seabed, Wasser 2024, Limburg/Lahn (05.2024)

Konferenzbeiträge

Conference contributions

J. Ihlemann, N. Bakhtiari, J. Meinertz,

L. Janos Richter:

Laser precision microfabrication of optical and fluidic components on the basis of silicon suboxide thin films, 25th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2024) San Sebastian, Spain (05.2024)

J. Holburg, A. Ahrens, M. Lübbecke, J. Thieme, S. Figul, G. Marowsky, K. Mann, D.-D. Mai:

Table-Top System for High-Resolution Soft X-ray Absorption Spectroscopy, European X-ray Spectrometry Conference (EXRS 2024), Athen, Griechenland (06. 2024)

M. Bates:

Visualizing protein complex architecture with Super-resolution fluorescence microscopy, EMBO Practical Course: Structural characterisation of macromolecular complexes, Grenoble, Frankreich (06.2024)

Q. Song, F. Wieduwilt, Y. Cai, P. Vana:

Gold Nanostar-satellite Nanoprobes for Surface Enhanced Raman Spectroscopy, 19th European Student Colloid Conference, Bordeaux (06.2024)

Y. AlSalka, J. Geweke, P. Schröder, C. Lenth, S. Schwabe, H. Wackerbarth:

Digitalization of quality control in incoming goods inspection in the rubber industry using photonic sensors, DKT 2024 - German Rubber Conference, Nürnberg (07.2024)

S. Schwabe, B. Klie, P. Schröder, A. Aschemann, M. Dagher, C. Lenth, H. Wackerbarth, U. Giese:

Static and in-line distribution quality assessment of crosslinking chemicals in rubber production intermediates by double-pulse LIBS, DKT 2024 - German Rubber Conference, Nürnberg (07.2024)

L. Reinkensmeier, A. Egner, M. Bates:

COMET - Cost-function Optimized Maximal overlap EsTimation, 3rd Leuven Advanced Microscopy Symposium, Leuven, Belgien (08.2024)

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

Broadband pump probe setup for ultrafast transient reflectivity measurements COLA 2024, 17th International Conference on Laser Ablation Hersonissos, Crete, Greece (09.2024)

S. Schwabe, P. Schröder, M. Dagher,

H. Wackerbarth:

Inline-Qualitätsüberwachung am Extrudat & Prozessautomatisierung, MaterialDigital Vollversammlung 2024, Berlin (09.2024)

J. Geweke, Y. AlSalka, P. Schröder, C. Lenth, S. Schwabe, H. Wackerbarth:

Digitalisierung der Qualitätskontrolle von Kautschuken, MaterialDigital Vollversammlung 2024, Berlin (09.2024)

A. Egner:

Pushing the Limits: Innovations in Super-Resolution Fluorescence Microscopy, Soft Matter Nanospectroscopy Workshop, München (11.2024)

A. Röben, J. Meinertz, J. Ihlemann:

Laserbasierte Spannungskompensation bei Glassubstraten in der Dünnschichttechnologie F.O.M-Konferenz "GEMEINSAMER FORTSCHRITT DURCH IGF-FORSCHUNG IN OPTIK, PHOTONIK, ANALYSEN- UND MEDIZINTECHNIK", Berlin (11.2024)

M. Dagher, C. Lenth, H. Wackerbarth:

Innovative Raman Measurement Technique with a Uniform Line Focus for LFT readout, Raman Fest 2024, Paris (11.2024)

Abschlussarbeiten

Final Thesis

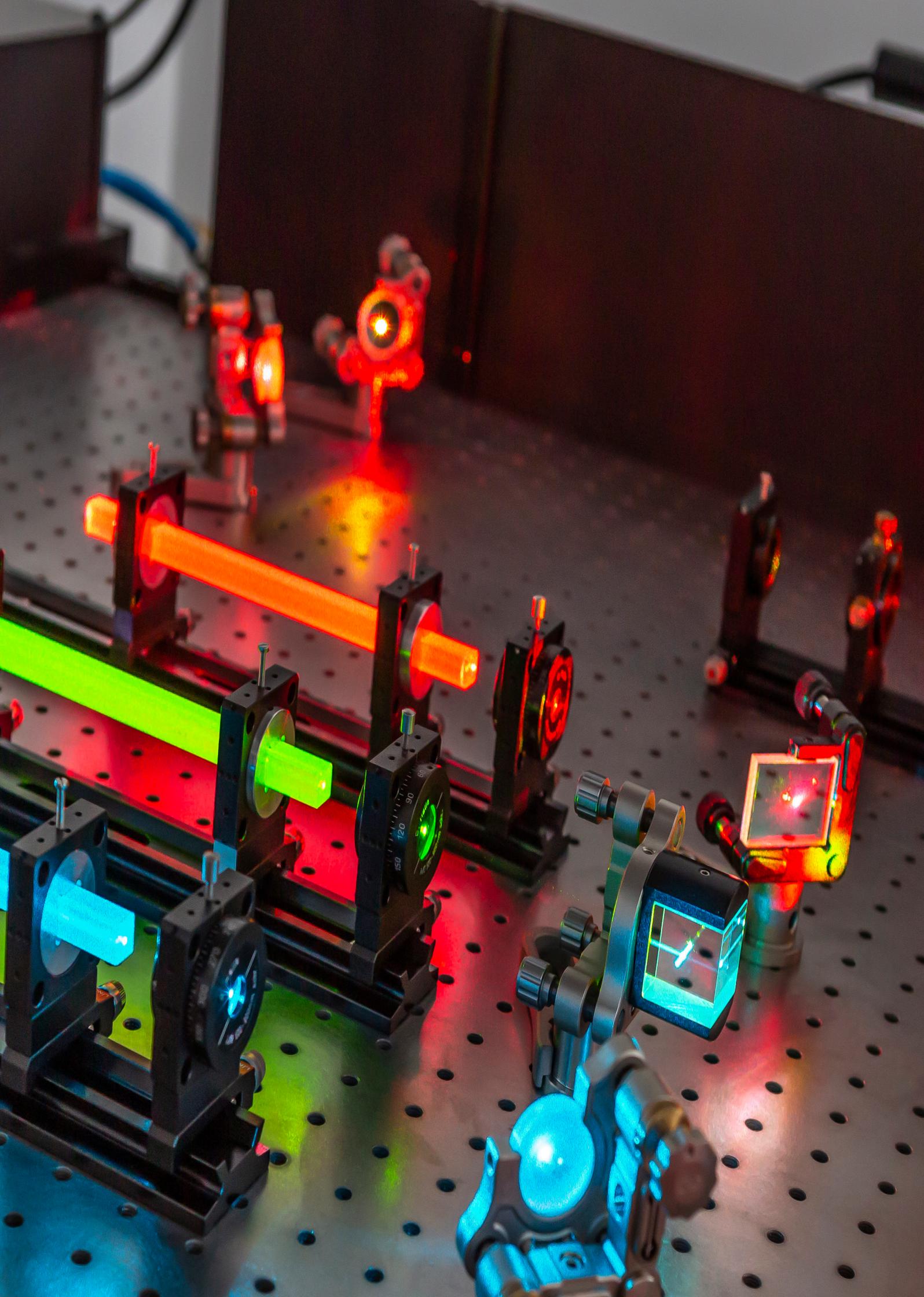
Junsung Kim

Construction of a photoelectrochemical cell
and characterization of surfaces using Raman
spectroscopy for modern energy supply,

Masterarbeit

Hochschule Darmstadt (09.2024)





Ausgewählte Kooperationspartner Selected Cooperation Partners

INTERNATIONAL



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

NATIONAL



UNIKASSEL
VERSITÄT



R
P TU
Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau



LOKAL



SARTORIUS



INNOVAVENT®



JAHRESRÜCKBLICK 2024

DIE ZUSE-GEMEINSCHAFT – unsere bundesweite Stimme der wirtschaftsnahen Forschung

Unser Institut gehört zu den 84 Forschungseinrichtungen der Zuse-Gemeinschaft. Ein branchenübergreifender und technologieoffener Forschungsverbund, der als gemeinnütziger, praxisnaher Transferpartner von Unternehmen Erkenntnisse der Wissenschaft in anwendbare Technologien übersetzt.

Durch die schwierige bundesweite Haushaltslage und die ungelöste Problematik des Besserstellungsverbot fand eine sehr intensive Kommunikation mit den Vertretern der Politik und den Ministerien statt. Dadurch stieg die Bekanntheit der Zuse-Gemeinschaft deutlich.

Angesichts der geplanten Kürzungen der Haushaltsmittel für die wichtigen Förderprogramme der wirtschaftsnahen Forschung ZIM und IGP sowie dem im Vergleich zum Vorjahr unveränderten Ansatz für IGF und INNO-KOM im Entwurf des Bundeshaushalts 2025 forderte die Zuse-Gemeinschaft,

die praxisnahe Industrieforschung nicht weiter zu schwächen, sondern zu deren Förderung mindestens 950 Millionen Euro bereits im Bundeshaushalt 2025 bereitzustellen.

Der Senat der Zuse-Gemeinschaft begrüßte die neu entsandten Vertreter der Ministerien Mitja Müller, Referatsleiter für Innovationsförderung und Strukturstärkung im Bundesministerium für Bildung und Forschung und Tanja Alemany Sanchez de León, Unterabteilungsleiterin für Innovationspolitik und digitale Wirtschaft im Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

Das Cluster Digitalisierung & KI der Zuse-Gemeinschaft nahm Bezug auf das diesjährige Gutachten der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) und veröffentlichte eine Stellungnahme zum aktuellen Thema „Künstliche Intelligenz als Schlüsseltechnologie“ mit folgenden Handlungsempfehlungen aus:



Senatssitzung im September im dbb forum berlin © Zuse-Gemeinschaft

1. **Praxisorientierte Forschungsförderung:** Der Technologietransfer in die betriebliche Praxis muss gezielt gestärkt werden, wobei die Institute der Zuse-Gemeinschaft als Katalysatoren wirken können.
2. **Dateninfrastruktur:** Der Zugang zu anonymisierten und qualitätsgesicherten Daten für Forschung und Entwicklung sollte erleichtert werden, um innovative KI-Anwendungen zu fördern.
3. **Kooperationsförderung:** Die Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Unternehmen sollte intensiviert werden, um die Kluft zwischen Theorie und Praxis zu überbrücken.
4. **Diversifizierung der Förderung:** Förderprogramme sollten ressortübergreifend gestaltet werden, um vielfältige Perspektiven und Anwendungsfelder zu berücksichtigen.
5. **Aufklärung für KMU:** Maßgeschneiderte Informations- und Beratungsangebote für KMUs müssen gestärkt werden, um deren Verständnis und Nutzung von KI-Potenzialen zu fördern.

Ein weiteres Highlight im Jahr 2024 war die Teilnahme der Zuse-Gemeinschaft am InnoNation-Festival des BDI. Mit dem Projekt „InnoNation“ setzt sich der BDI für ein zukunftsfähiges und innovatives Deutschland ein.



Am Stand der Zuse-Gemeinschaft beim InnoNation-Festival des BDI © Zuse-Gemeinschaft

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



ZUSE-GEMEINSCHAFT
 FORSCHUNG, DIE ANKOMMT.

Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events



IdeenExpo 2024

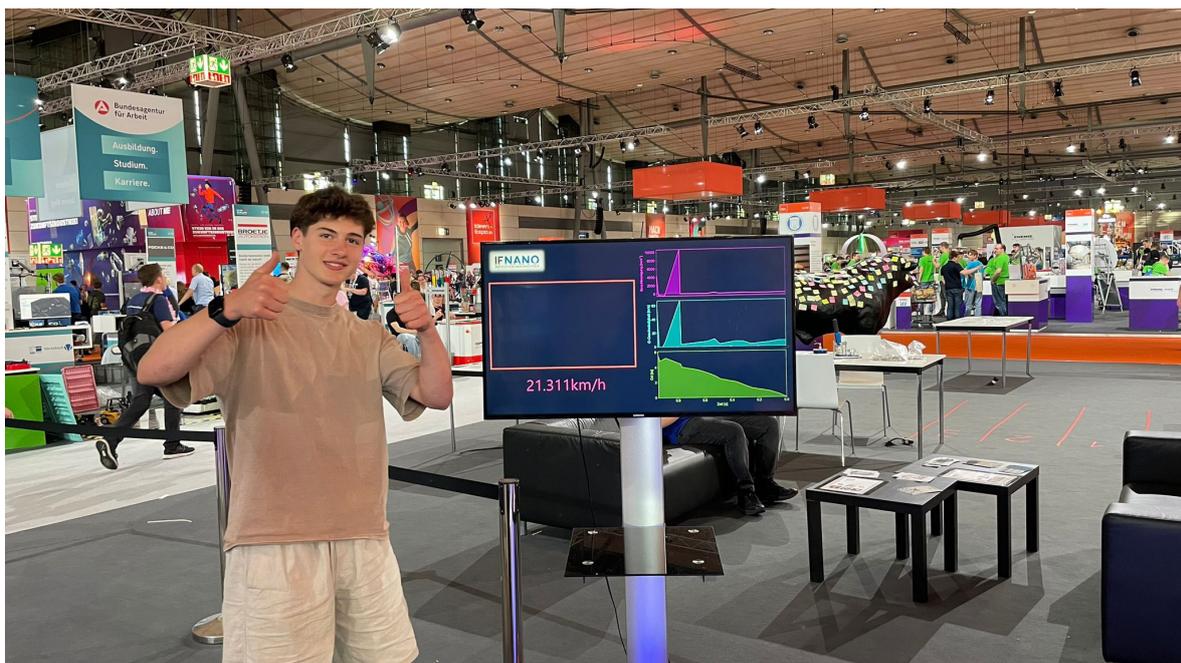
Am 8. Juni war es wieder soweit: Die IdeenExpo, das größte Jugend-Event für Technik und Naturwissenschaften in Europa, öffnete in Hannover ihre Tore. Alle zwei Jahre zieht diese beeindruckende Veranstaltung, die sich selbst als „das größte Klassenzimmer der Welt“ bezeichnet, Hunderttausende von jungen Talenten an. Mit einer Vielzahl interaktiver Exponate, spannenden Workshops und fesselnden Bühnenshows gelingt es den Ausstellern, das Interesse und die Begeisterung der Besucher für unterschiedlichste Berufsfelder zu wecken. Dabei bietet die IdeenExpo eine Plattform, um die nächsten Generationen von Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern zu inspirieren und für die Welt der Forschung und Innovation zu begeistern.

Auch in diesem Jahr war das IFNANO wieder mit einem Stand vertreten, um den Besucherinnen und Besuchern auf anschauliche Weise die Welt der Nanotechnologie näherzubringen.

Ideenexpo 2024

On June 8th, it was time again: IdeasExpo, Europe's largest youth event for technology and natural sciences, opened its doors in Hannover. Every two years, this impressive event, which calls itself "the largest classroom in the world," attracts hundreds of thousands of young talents. With a wide range of interactive exhibits, exciting workshops, and captivating stage shows, exhibitors manage to spark the interest and enthusiasm of visitors for various fields of work. IdeasExpo provides a platform to inspire the next generation of scientists, engineers, and technicians and to introduce them to the world of research and innovation.

This year, IFNANO was once again represented with a booth to bring the world of nanotechnology closer to the visitors in an engaging way.



Messen und Veranstaltungen

Exhibitions and Events



Unter dem Motto „Bist du schneller als das Licht?“ hatten die Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit, ihre eigenen Antrittsschnelligkeiten bei einem 6-Meter-Sprint zu testen. Auf einer speziell eingerichteten Strecke konnten die jungen Teilnehmer ihre Geschwindigkeit unter realistischen Bedingungen messen und mit den eigenen Ergebnissen experimentieren.

Mit modernen optischen Sensoren maßen die Mitglieder des IFNANO-Teams nicht nur die Geschwindigkeit, sondern auch die Beschleunigung der Teilnehmer, und erfassten dabei einige wirklich beeindruckende Werte. Die Schülerinnen und Schüler waren sichtlich begeistert, als sie ihre Fortschritte in Echtzeit verfolgen konnten und miteinander verglichen, wer den schnellsten Antritt hinlegte.



Trotz des wissenschaftlichen Hintergrunds und der präzisen Messungen stand der Spaß immer im Vordergrund. Das Event ermöglichte es den Jugendlichen, auf spielerische Weise mehr über Technologie und Physik zu lernen und dabei in einem interaktiven und dynamischen Umfeld ihr eigenes Potential zu entdecken.

Under the motto “Are you faster than light?”, students had the opportunity to test their sprinting speed in a 6-meter dash. On a specially designed track, young participants could measure their speed under realistic conditions and experiment with their results.

Using modern optical sensors, the IFNANO team not only measured the participants' speed but also recorded their acceleration, capturing some truly impressive results. The students were visibly excited as they were able to track their progress in real-time and compare who achieved the fastest start.



Despite the scientific background and precise measurements, fun was always at the forefront. The event allowed young people to learn about technology and physics in a playful way, while discovering their own potential in an interactive and dynamic environment.

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 27. April 2023 hatten zehn 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 27, 2023, ten 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.

